

Optimización resiliente del ciclo de vida de estructuras híbridas y modulares de alta eficiencia social y medioambiental bajo condiciones extremas

Resilient lifecycle optimization of socially and environmentally efficient hybrid and modular structures under extreme conditions

Víctor Yepes^{*, a}, Julián Alcalá^b, José A. García^c y Moacir Kripka^d

^aDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ICITECH, Universitat Politècnica de València. Catedrático de Universidad.

vyepesp@cst.upv.es

^bDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ICITECH, Universitat Politècnica de València. Profesor Titular de Universidad.

jualgon@cst.upv.es

^cDr. Ciencias Exactas y Dr. Informática. Profesor Titular de Universidad. Universidad Pontificia de Valparaíso, Chile.

jose.garcia@pucv.cl

^dDr. Ingeniero Civil. Catedrático de Universidad. Universidade de Passo Fundo, Brasil. mkripka@upf.br

* Persona de contacto / Corresponding author

RESUMEN

Los desastres naturales y humanos causan grandes pérdidas humanas y económicas. RESILIFE optimiza el diseño y construcción de estructuras híbridas modulares, sostenibles y resilientes a eventos extremos, equiparables en seguridad a las tradicionales. Utiliza inteligencia artificial, metaheurísticas híbridas, aprendizaje profundo y teoría de juegos para evaluar y mejorar la resiliencia. Con técnicas multicriterio como lógica neutrosófica y redes bayesianas, optimiza diseño, mantenimiento y reparación, reduciendo costes y mejorando la recuperación social y ambiental.

ABSTRACT

Natural and human disasters cause significant human and economic losses. RESILIFE optimizes the design and construction of modular hybrid structures that are sustainable, resilient to extreme events, and comparable in safety to traditional ones. It uses artificial intelligence, hybrid metaheuristics, deep learning, and game theory to evaluate and improve resilience. Using multi-criteria techniques such as neutrosophic logic and Bayesian networks, it optimizes design, maintenance, and repair, reducing costs and improving social and environmental recovery.

PALABRAS CLAVE: Sostenibilidad, estructuras, resiliencia, optimización, eventos extremos.

KEYWORDS: Sustainability, structures, resilience, optimization, extreme events.

1. Introducción

Entre 2003 y 2013, diversos desastres naturales (terremotos, tsunamis, tifones, deslizamientos o inundaciones) y provocados por humanos (explosiones, vertidos o impactos), ocasionaron más de 1.1 millones de muertes,

afectaron a más de 2 mil millones de personas y provocaron pérdidas estimadas en 1.5 billones de dólares [1]. Estos eventos, que siguen siendo una realidad en los últimos años, resaltan la urgencia de desarrollar estructuras resilientes,

sostenibles y de alto rendimiento que protejan la vida y la economía. Además, los eventos extremos requieren adaptaciones eficaces y económicas en el diseño, construcción, reparación y mantenimiento de infraestructuras, lo que impulsa la investigación en construcción sostenible para reducir la huella de carbono y otros impactos.

El crecimiento económico, demográfico y de la urbanización, así como el calentamiento global y la explotación de los recursos naturales, implican que la construcción de estructuras deba tener en cuenta la sostenibilidad, la durabilidad y una gestión inteligente del ciclo de vida, además de la seguridad, el rendimiento y la resiliencia. Para ello, es necesario emplear materiales sostenibles y residuos industriales en la construcción, así como adoptar nuevas formas y diseños estructurales para controlar vibraciones y mitigar efectos de carga, tecnologías de prefabricación innovadoras mediante impresión 3D y construcción modular para minimizar las interrupciones en obra y mejorar el control de calidad, y nuevos conceptos de diseño y construcción, como estructuras desplegadas y estructuras de sacrificio, que aumentan la resiliencia y la resistencia a cargas extremas.

La recuperación de estructuras dañadas requiere muchos recursos y genera emisiones considerables. Por tanto, el diseño y la construcción de estructuras deben centrarse en la sostenibilidad, la durabilidad, la resistencia múltiple, la resiliencia y la monitorización inteligente del ciclo de vida. Este enfoque es esencial para alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas y hacer frente a los desafíos climáticos y ambientales.

2. Antecedentes y justificación del proyecto

Los eventos extremos, junto con errores de diseño, construcción y falta de mantenimiento, suelen provocar daños

estructurales locales que pueden provocar el colapso progresivo del edificio completo [2]. Este tipo de colapso se debe a errores de construcción y diseño en el 65 % de los casos estudiados [3]. Ciertos eventos han demostrado la importancia del mantenimiento y de las intervenciones preventivas locales para salvar vidas humanas y de infraestructuras. La falta de eficacia en las reparaciones de hormigón es uno de los principales problemas en ingeniería estructural. En Europa, solo el 50 % de las operaciones de restauración en edificaciones de hormigón es efectiva, a pesar de que la rehabilitación representa casi la mitad de las inversiones en construcción [4].

No obstante, la modernización de las infraestructuras tiene un coste prohibitivo, lo que destaca la necesidad de asignar eficazmente los recursos presupuestarios limitados. Ante la complejidad de este desafío, se plantean propuestas de optimización resiliente para facilitar la toma de decisiones teniendo en cuenta la aleatoriedad e incertidumbres inherentes. Por ejemplo, en el caso de las redes eléctricas, los apagones derivados de condiciones meteorológicas adversas generaron costes anuales de entre 18 000 y 33 000 millones de dólares entre 2003 y 2012 [5].

Una estructura resiliente y bien diseñada puede no necesitar reparación o puede recuperarse con reparaciones menores después de un evento extremo, como ocurre con los puentes con resiliencia sísmica [6]. Guaygua et al. [7] revelaron la correlación entre los edificios prefabricados y aspectos como las conexiones secas, la disipación de energía, el diseño óptimo y el colapso progresivo. Los últimos avances en estructuras industrializadas consisten en mejorar las uniones de las estructuras prefabricadas, que son los puntos más vulnerables de un sismo, y conseguir edificios que igualan en prestaciones y en seguridad a las estructuras tradicionales sancionadas por la práctica mediante ingeniosos métodos de disipación de energía. Sánchez-Garrido et al. [8] detectan lagunas en la

investigación, incluida la necesidad de aplicar más las estructuras innovadoras basadas en métodos modernos de construcción (Modern Methods of Construction, MMC). Asimismo, resaltan la importancia de abordar la mejora del entorno construido a través del paradigma del diseño regenerativo. Se necesita más investigación para comprender los sistemas de construcción interdependientes mediante el uso de gemelos digitales.

Aunque se consideraba que las estructuras de acero eran resistentes a los terremotos, esta percepción cambió tras los seísmos de Northridge en 1994 y Kobe en 1995, que revelaron fracturas frágiles, especialmente en las conexiones viga-columna. Desde entonces, se ha investigado el uso de materiales y diseños innovadores para reducir el riesgo de fallo frágil temprano [9]. Los cambios extremos de temperatura afectan a la resistencia y la rigidez de las estructuras de acero, por lo que es necesario aumentar las secciones transversales para compensar la reducción de la rigidez y evitar fallos estructurales [10]. Esta reducción de la capacidad resistente con la temperatura también ocurre con las estructuras de hormigón [11]. Las vigas de acero híbridas optimizan la resistencia a flexión y cortante, y mejoran los elementos de acero homogéneos. No obstante, la investigación debe abordar las lagunas existentes en cuanto a su aplicación en estructuras complejas y su capacidad para resistir acciones extremas [12]. Otra oportunidad son los materiales compuestos multifuncionales aplicados en columnas, que permiten reducir peso y mejorar la resistencia en edificios altos y entornos agresivos. Estas innovaciones superan las limitaciones de las estructuras tradicionales de acero y hormigón, así como de las tecnologías convencionales de construcción [13].

Sin embargo, no todas las estructuras pueden diseñarse para resistir cualquier evento extremo, sino que la tendencia es aumentar su funcionalidad todo lo posible. El diseño de estructuras resilientes requiere esfuerzos

colaborativos e interdisciplinarios para formular nuevos enfoques y métricas que tengan en cuenta el rendimiento y los aspectos funcionales posteriores al evento. Las estructuras resilientes deben tener en cuenta su vida útil en relación con los impactos de los desastres, las reparaciones, el mantenimiento y la evolución de las acciones sobre ellas. Actualmente, no existen procedimientos explícitos para cuantificar la resiliencia de las estructuras e infraestructuras en el contexto de múltiples amenazas ni para comparar las estructuras y los sistemas en términos de resiliencia [14]. Surge la oportunidad de implementar aspectos de la resiliencia estructural, como la funcionalidad técnico-socioeconómica, los principios de diseño basados en el riesgo probabilístico y la resiliencia, las dependencias ambientales y los sistemas de apoyo a la toma de decisiones basados en la resiliencia. Para ello, es fundamental integrar el proyecto estructural dentro del paradigma de modelos de información en la construcción (BIM) [15].

3. Objetivos generales del proyecto

El objetivo general consiste en afrontar el reto social y medioambiental que suponen el proyecto, el mantenimiento y la reparación de estructuras híbridas y MMC frente a situaciones extremas mediante la optimización de los problemas complejos relacionados con la toma de decisiones en los ámbitos público y privado. Para alcanzar este objetivo, es necesario avanzar en el ámbito científico para integrar a diversos actores y grupos de expertos en la toma de decisiones, teniendo en cuenta criterios de sostenibilidad social (incluida la IAGI) y ambiental en todo el ciclo de vida de las estructuras, considerando la variabilidad inherente al mundo real. Para abordar las incertidumbres que afectan al sistema, se propone la aplicación de metamodelos y metaheurísticas híbridas basadas en fiabilidad. Estas se aplicarán no solo al diseño de nuevas

estructuras, sino también al mantenimiento y la reparación de las existentes. Un análisis de sensibilidad de los escenarios presupuestarios y de las hipótesis de los inventarios del ciclo de vida proporcionará información valiosa sobre las mejores prácticas. Cabe destacar que esta metodología se podrá adaptar a otros tipos de infraestructuras.

El objetivo general se desarrollará mediante los objetivos específicos:

- Análisis de funciones de distribución de eventos extremos para el diseño óptimo basado en fiabilidad que integre aspectos ambientales, sociales y económicos, y que sirva para la toma de decisiones multicriterio.
- Cuantificación de la resiliencia de las estructuras sometidas a múltiples amenazas para garantizar la integración de la sostenibilidad en el

diseño, mantenimiento y reparación de estructuras híbridas de acero y modulares.

- Identificación de estrategias de reparación y mantenimiento robusto y óptimo de estructuras híbridas de acero y modulares resilientes.
- Formulación y resolución del problema de optimización multiobjetivo que contemple el ciclo completo de estructuras híbridas de acero y modulares mediante metaheurísticas híbridas.
- Comparación de estructuras y sistemas en términos de resiliencia respecto a la optimización heurística, teniendo en cuenta incertidumbres presupuestarias en su ciclo de vida.

Para alcanzar estos objetivos, se ha colaborado con los grupos de investigación de los profesores Kripka (Brasil), Zhou (China) y García Conejeros (Chile).

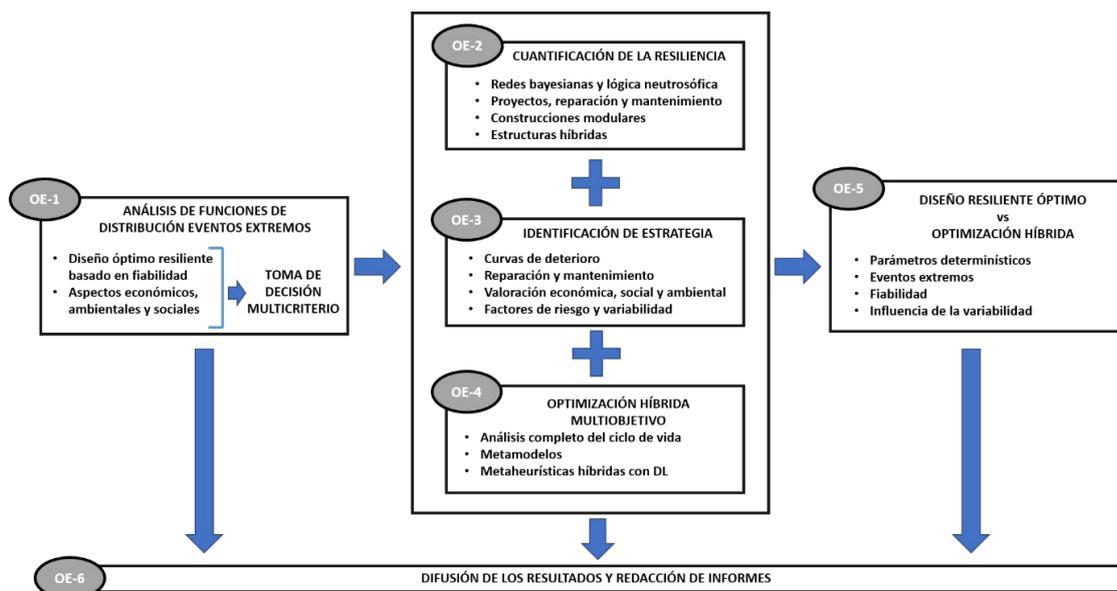


Figura 1. Objetivos específicos del proyecto RESILIFE.

4. Metodología

El análisis del estado del arte, desarrollado específicamente por el grupo para elaborar este proyecto, puso de manifiesto lagunas significativas en la investigación. Por un lado, la optimización del diseño de estructuras híbridas y basadas en MMC que incorporan daños por eventos extremos no se ha abordado de manera

integral, lo que dificulta una recuperación rápida y la minimización de impactos sociales y ambientales. Estas estructuras tienen un gran potencial [8,12], pero aún no se han explorado metaheurísticas híbridas con DL y teoría de juegos para optimizar su resiliencia. Además, la lógica neutrosófica y las redes bayesianas abren nuevas posibilidades en el ámbito de la decisión multicriterio. Estas innovaciones se fusionan en nuestra metodología con técnicas como el

análisis del ciclo de vida, el análisis basado en fiabilidad, el diseño óptimo robusto, los metamodelos y las técnicas de minería de datos. La metodología propuesta prioriza el diseño de estructuras, su reparación o mantenimiento, considerando criterios de sostenibilidad social y ambiental dentro de restricciones presupuestarias y teniendo en cuenta la variabilidad inherente a los desafíos prácticos.

La Figura 2 presenta el esquema metodológico propuesto para RESILIFE, en el que se vinculan las fases con los objetivos específicos. Se adopta un enfoque mixto e interactivo en el que el decisor proporciona información sobre sus preferencias al analista. Posteriormente, mediante una optimización multiobjetivo basada en fiabilidad y

metamodelos, el analista genera un conjunto de soluciones eficientes que el decisor evalúa antes de tomar una decisión. Por tanto, la novedad de la propuesta metodológica trifásica consiste en la integración de técnicas de información a priori, en las que el decisor (grupos de interés) informa de sus preferencias al analista, abarcando métodos constructivos, de reparación, de conservación, etc. La optimización multiobjetivo, apoyada en la variabilidad de parámetros, variables y restricciones, produce alternativas eficientes. La última fase implica un proceso de información a posteriori para que el decisor tenga en cuenta aspectos no contemplados en la optimización, lo que da como resultado una solución final completa.

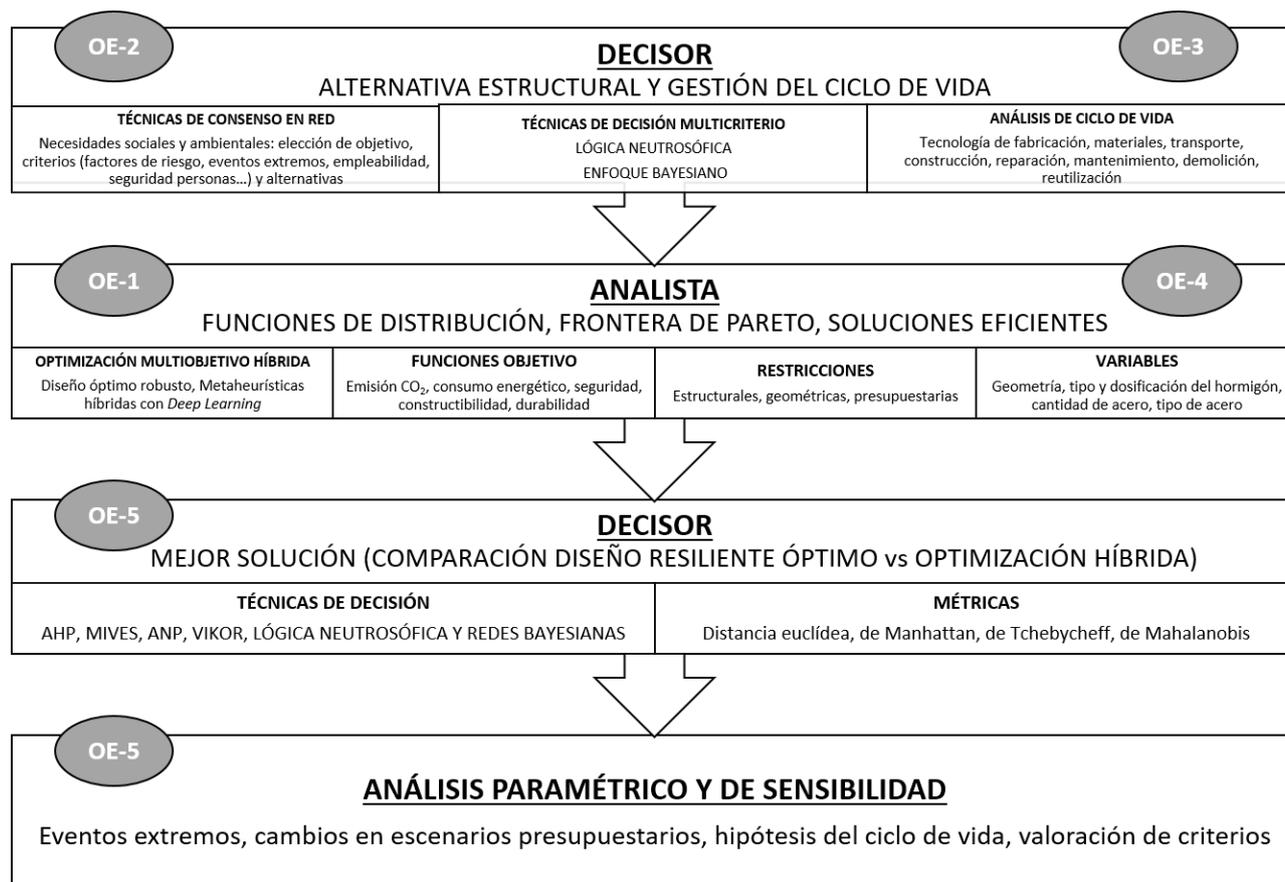


Figura 2. La figura puede disponerse con una anchura equivalente al ancho de página.

La metodología se aplicará, como mínimo, a los siguientes casos de estudio: En primer lugar, a la optimización de pórticos de edificios altos con estructura de acero híbrido y

de hormigón armado, sometida a un fuerte incremento de temperatura. De hecho, Keles et al. [10] optimizan estructuras de acero tradicionales en las que la temperatura modifica

sus propiedades mecánicas, y Negrín et al. [16] comprueban las ventajas de las estructuras híbridas frente a las tradicionales. El segundo caso se aplica a pórticos de edificación, tanto de hormigón armado como híbridos, donde se optimiza suponiendo el fallo completo de uno o varios de los soportes, de forma que el entramado siga manteniendo su funcionalidad. Esto permite mantener cierta funcionalidad estructural capaz de evacuar a las personas con seguridad y, al mismo tiempo, realizar tareas de reparación o mantenimiento de los elementos dañados, con ligeros cambios en el diseño. La mejora no solo se pretende conseguir mediante la optimización, sino también mediante aspectos de diseño que impidan el colapso progresivo. Un aspecto similar ha sido estudiado por Negrín et al. [17] en el caso de fuertes interacciones suelo-estructura. Otro caso de estudio es la optimización resiliente de viviendas sociales prefabricadas en zonas sísmicas, con el reto que supone resistir acciones extremas y la posibilidad de reparar rápidamente los efectos de los daños [7]. Otro caso previsto es la optimización resiliente del mantenimiento y la reparación de patologías resultantes de eventos extremos. Los casos anteriores, fuertemente centrados en viviendas, también se extenderán en este proyecto a otras estructuras como puentes híbridos o estructuras modulares, en consonancia con la experiencia previa del equipo de investigación. La optimización siempre es multiobjetivo y se apoya en técnicas de aprendizaje profundo a lo largo del ciclo de vida, con la novedad del uso de la teoría de juegos.

5. Resultados

El proyecto de investigación, que se inició en 2024 y se prevé que finalizará a finales de 2027, ha logrado avances significativos en su fase inicial. La contribución principal es el desarrollo de procedimientos para cuantificar la resiliencia de estructuras híbridas y basadas en MMC frente a múltiples amenazas, lo que

permite compararlas en términos de resiliencia. RESILIFE busca un avance cualitativo en la investigación, superando las limitaciones previas. Para ello, el grupo ha llevado a cabo seis estudios sobre BIM en estructuras [15], inteligencia artificial en construcción [18], estructuras modulares [8], estructuras prefabricadas ante sismos [7], estructuras híbridas de acero [12] y metamodelos [19]. Esto ha permitido identificar oportunidades para optimizar el ciclo de vida de las estructuras, integrando la capacidad de hacerles frente desde el diseño para que puedan recuperar su funcionalidad rápidamente y con un bajo coste social y medioambiental. Las estructuras híbridas de acero y MMC tienen un gran potencial para mejorar la resiliencia estructural, por lo que son campos de investigación prometedores. Además, la incorporación de inteligencia artificial, la toma de decisiones multicriterio considerando incertidumbres, el uso de metamodelos, la teoría de juegos en la optimización multiobjetivo y el empleo de BIM y realidad virtual en la modelización representan desafíos clave en la investigación de estas estructuras. También se destaca el uso de técnicas no destructivas para detectar daños [20] y tecnologías de reparación eficientes [21].

Los resultados obtenidos en 2024 han supuesto avances en sostenibilidad y resiliencia en ingeniería civil. En [26], se optimizan estrategias de mantenimiento preventivo para estructuras de hormigón en entornos adversos, mientras que en [27] se revisan métodos multicriterio para evaluar y rehabilitar edificios de forma sostenible. El artículo [28] optimiza las emisiones y fuga de carbono en proyectos internacionales, y [29] mejora la robustez de marcos modulares prefabricados mediante el uso de algoritmos avanzados. En [30], se propone un diseño híbrido optimizado para vigas de acero sostenibles, y [31] analiza alternativas sísmicas para columnas de hormigón a lo largo de su ciclo de vida. En [32], un algoritmo personalizado optimiza la toma de decisiones en infraestructura

vial sostenible. El artículo [33] demuestra cómo planificar el mantenimiento de activos públicos aumenta los beneficios sociales. Finalmente, los artículos [34] y [35] evalúan la sostenibilidad a largo plazo de la construcción regional mediante un modelo multidisciplinario y optimizan el impacto ambiental de los puentes, respectivamente, reduciendo emisiones. Estos trabajos aportan herramientas fundamentales para avanzar hacia infraestructuras más sostenibles y resilientes.

El objetivo de RESILIFE es superar varias limitaciones en la investigación, tales como:

- Analizar el ciclo de vida de estructuras híbridas de acero y basadas en MMC frente a eventos extremos (aumento de temperatura, explosiones, sismos, etc.), para mejorar su resiliencia.
- Prever, en el diseño óptimo, la reparación y el mantenimiento de las MMC ante eventos extremos, garantizando que los elementos estructurales sean reparables de manera eficiente y rápida, considerando los impactos sociales y ambientales.
- Emplear metaheurísticas híbridas basadas en inteligencia artificial, metamodelos y teoría de juegos para mejorar la calidad de las soluciones, integrando aprendizaje profundo en la base de datos generada y reduciendo los tiempos de cálculo.
- Explorar el impacto de la aleatoriedad de los parámetros mediante un diseño óptimo resiliente y basado en fiabilidad, evitando que los proyectos optimizados sean inviables ante pequeños cambios.
- Profundizar en el análisis de los impactos sociales y ambientales de las estructuras MMC.
- Analizar la sensibilidad de las políticas presupuestarias poco realistas en la gestión de las estructuras.

RESILIFE busca innovar en la toma de decisiones para el diseño óptimo y resiliente de estructuras híbridas de acero y métodos de construcción modernos (MMC), enfocándose

especialmente en estructuras modulares a lo largo de su ciclo de vida. Su objetivo principal es mejorar la resiliencia de estas estructuras frente a eventos extremos (naturales o humanos), optimizando su capacidad para recuperar funcionalidad rápidamente y reducir costos sociales y ambientales, evitando colapsos progresivos.

Para ello, emplea metaheurísticas híbridas basadas en *deep learning* y teoría de juegos, abordando la variabilidad de parámetros y restricciones en la optimización multiobjetivo con criterios de sostenibilidad. El proyecto promete avances en el diseño de construcciones industrializadas y en la reparación de infraestructuras, beneficiando a las empresas del sector mediante procesos más eficientes y sostenibles. Además, sus resultados serán aplicables a normativas, software de diseño y recomendaciones para proyectos y mantenimiento.

El proyecto busca generar resultados científicos que sirvan como base para futuras investigaciones nacionales e internacionales. Sus principales contribuciones incluyen:

- Desarrollo de soluciones constructivas innovadoras (como conexiones especiales y estructuras fusibles) en estructuras de acero híbridas y MMC para aumentar la resiliencia y evitar el colapso progresivo.
- Formulación de metodologías de participación social que integren criterios objetivos y subjetivos en decisiones multicriterio, utilizando técnicas como lógica neutrosófica y redes bayesianas para manejar la incertidumbre.
- Propuesta de técnicas de optimización multiobjetivo basadas en metaheurísticas híbridas de *deep learning* que incorporen teoría de juegos y fiabilidad, acelerando cálculos con metamodelos.
- Introducción de nuevas métricas que prioricen soluciones resilientes en la frontera de Pareto para alimentar procesos de toma de decisiones multicriterio.

- Identificación de políticas presupuestarias que afectan negativamente la sostenibilidad y definición de buenas prácticas de diseño, reparación y mantenimiento robusto en construcciones MMC y estructuras híbridas.
- Evaluación del impacto de la optimización multiobjetivo en obras nuevas frente al mantenimiento de infraestructuras existentes.
- Análisis de la variabilidad y robustez de soluciones optimizadas bajo criterios deterministas o estocásticos, ofreciendo recomendaciones prácticas para diseño, reparación y mantenimiento.

6. Conclusiones

Este proyecto aborda el desafío global de diseñar y mantener infraestructuras resilientes y sostenibles frente a eventos extremos naturales y humanos. Los desastres ocurridos entre 2003 y 2013, con grandes pérdidas humanas y económicas, destacan la urgencia de desarrollar estructuras de alto rendimiento que protejan a las personas y economías mientras se alinean con objetivos de sostenibilidad a largo plazo.

A pesar de avances en tecnología y diseño estructural, persisten lagunas en la optimización de estructuras híbridas y modulares para situaciones extremas. El proyecto identifica la necesidad de integrar materiales sostenibles, diseño basado en fiabilidad y tecnologías emergentes como inteligencia artificial y metamodelos para decisiones informadas durante todo el ciclo de vida de las infraestructuras, considerando criterios sociales y ambientales.

La resiliencia estructural se potencia combinando mejoras en materiales y diseño con metodologías que integren aspectos sociales y económicos. Técnicas de optimización multiobjetivo basadas en deep learning, teoría de juegos y metamodelos permiten gestionar incertidumbres en el diseño de infraestructuras.

Además, herramientas como gemelos digitales y BIM ofrecen control y adaptabilidad en tiempo real en construcción, reparación y mantenimiento.

El uso de estructuras híbridas y modulares no solo incrementa la resiliencia ante eventos extremos, sino que también optimiza costos y recursos, reduciendo emisiones durante la recuperación de daños. Este enfoque contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), enfrentando desafíos climáticos mediante soluciones sostenibles en la construcción.

El proyecto RESILIFE busca ofrecer un enfoque integral para optimizar estructuras híbridas y basadas en MMC durante su ciclo de vida, promoviendo avances tecnológicos en el sector y desarrollando infraestructuras más seguras, eficientes y respetuosas con el medio ambiente.

Agradecimientos

Ayuda PID2023-150003OB-I00 financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por “FEDER/UE”.

Referencias

- [1] Hao, H., & Li, J. (2019). Sustainable high-performance resilient structures. *Engineering*, 5(2), 197-198.
- [2] Adam, J. M., Parisi, F., Sagaseta, J., & Lu, X. (2018). Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*, 173, 122-149.
- [3] Caredda, G., Makoond, N., Buitrago, M., Sagaseta, J., Chryssanthopoulos, M., & Adam, J. M. (2023). Learning from the progressive collapse of buildings. *Development in Built Environment*, 15, 100194.
- [4] Borghese, V., Contiguglia, C. P., Lavorato, D., Santini, S., & Briseghella, B. (2023). Sustainable retrofits on reinforced concrete

- infrastructures. *Bulletin of Geophysics and Oceanography*.
<https://doi.org/10.4430/bgo00436>
- [5] Yuan, W., Wang, J., Qiu, F., Chen, C., Kang, C., & Zeng, B. (2016). Robust optimization-based resilient distribution network planning against natural disasters. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(6), 2817-2826.
- [6] Dong, H., Han, Q., Du, X., & Zhou, Y. (2022). Review on seismic resilient bridge structures. *Advances in Structural Engineering*, 25(7), 1565-1582.
- [7] Guaygua, B., Sánchez-Garrido, A., & Yepes, V. (2023). A systematic review of seismic-resistant precast concrete buildings. *Structures*, 58, 105598.
- [8] Sánchez-Garrido, A. J., Navarro, I. J., García, J., & Yepes, V. (2023). A systematic literature review on Modern Methods of Construction in building: an integrated approach using machine learning. *Journal of Building Engineering*, 73, 106725.
- [9] Fang, C., Wang, W., Qiu, C., Hu, S., MacRae, G. A., & Eartherton, M. R. (2022). Seismic resilient steel structures: A review of research, practice, challenges and opportunities. *Journal of Constructional Steel Research*, 191, 107172.
- [10] Keles, M., Artar, M., & Ergün, M. (2024). Investigation of temperature effect on the optimal weight design of steel truss bridges using cuckoo search algorithm. *Structures*, 59, 105819.
- [11] Tang, Y., Wang, Y., Wu, D., Chen, M., Pang, L., Sun, J., Feng, W., & Wang, X. (2023). Exploring temperature-resilient recycled aggregate concrete with waste rubber: An experimental and multi-objective optimization analysis. *Review of Advanced Materials Science*, 62(1), 20230347.
- [12] Terreros-Bedoya, A., Negrín, I., Payá-Zaforteza, I., & Yepes, V. (2023). Hybrid steel girders: review, advantages and new horizons in research and applications. *Journal of Constructional Steel Research*, 207, 107976.
- [13] Sojobi, A. O., & Liew, K. M. (2023). Multi-objective optimization of high performance concrete columns under compressive loading with potential applications for sustainable earthquake-resilient structures and infrastructures. *Composites Structures*, 315, 117007.
- [14] Khaloo, A., & Mobini, M. (2016). Towards resilient structures. *Science in Iran*, 23(5), 2077-2080.
- [15] Fernández-Mora, V., Navarro, I. J., & Yepes, V. (2022). Integration of the structural project into the BIM paradigm: a literature review. *Journal of Building Engineering*, 53, 104318.
- [16] Negrín, I., Kripka, M., & Yepes, V. (2023). Design optimization of welded steel plate girders configured as a hybrid structure. *Journal of Constructional Steel Research*, 211, 108131.
- [17] Negrín, I., Kripka, M., & Yepes, V. (2023). Metamodel-assisted meta-heuristic design optimization of reinforced concrete frame structures considering soil-structure interaction. *Engineering Structures*, 293, 116657.
- [18] García, J., Villavicencio, G., Altimiras, F., Crawford, B., Soto, R., Mintatogawa, V., Franco, M., Martínez-Muñoz, D., & Yepes, V. (2022). Machine learning techniques applied to construction: A hybrid bibliometric analysis of advances and future directions. *Automation in Construction*, 142, 104532.
- [19] Negrín, I., Kripka, M., & Yepes, V. (2023). Metamodel-assisted design optimization in the field of structural engineering: a literature review. *Structures*, 52, 609-631.
- [20] Hadizadeh-Bazaz, M., Navarro, I. J., & Yepes, V. (2023). Power spectral density method performance in detecting damages by

- chloride attack on coastal RC bridge. *Structural Engineering and Mechanics*, 85(2), 197-206.
- [21] Ortega, A. I., Pellicer, T. M., Calderón, P. A., & Adam, J. M. (2018). Cement-based mortar patch repair of RC columns. Comparison with all-four-sides and one-side repair. *Construction and Building Materials*, 186, 338-350.
- [22] Zhou, Z., & Liang, Z., Alcalá, J., & Yepes, V. (2024). Three-dimensional finite element coupled optimization assessment of extra-large bridges. *Structures*, 70, 107743.
- [23] Guaygua, B., Sánchez-Garrido, A., & Yepes, V. (2024). Life cycle assessment of seismic resistant prefabricated modular buildings. *Heliyon*, 10(20), e39458.
- [24] Yepes-Bellver, L., Brun-Izquierdo, A., Alcalá, J., & Yepes, V. (2024). Artificial neural network and Kriging surrogate model for embodied energy optimization of prestressed slab bridges. *Sustainability*, 16(19), 8450.
- [25] Ruiz-Vélez, A., García, J., Partskhaladze, G., Alcalá, J., & Yepes, V. (2024). Enhanced structural design of prestressed arched trusses through multi-objective optimization and MCDM. *Mathematics*, 12(16), 2567.
- [26] Sánchez-Garrido, A. J., Navarro, I. J., & Yepes, V. (2024). Sustainable preventive maintenance of MMC-based concrete building structures in a harsh environment. *Journal of Building Engineering*, 95, 110155.
- [27] Villalba, P., Sánchez-Garrido, A., & Yepes, V. (2024). A review of multi-criteria decision-making methods for building assessment, selection, and retrofit. *Journal of Civil Engineering and Management*, 30(5), 465–480.
- [28] Zhou, Z., Wang, Y., Alcalá, J., & Yepes, V. (2024). Research on coupling optimization of carbon emissions and carbon leakage in international construction projects. *Scientific Reports*, 14, 10752.
- [29] Ruiz-Vélez, A., García, J., Alcalá, J., & Yepes, V. (2024). Enhancing robustness in precast modular frame optimization: Integrating NSGA-II, NSGA-III, and RVEA for sustainable infrastructure. *Mathematics*, 12(10), 1478.
- [30] Negrín, I., Kripka, M., & Yepes, V. (2024). Optimized transverse-longitudinal hybrid construction for sustainable design of welded steel plate girders. *Advances in Civil Engineering*, 2024, 5561712.
- [31] Villalba, P., Sánchez-Garrido, A., & Yepes, V. (2024). Life cycle evaluation of seismic retrofit alternatives for reinforced concrete columns. *Journal of Cleaner Production*, 455, 142290.
- [32] Ruiz-Vélez, A., García, J., Alcalá, J., & Yepes, V. (2024). Sustainable road infrastructure decision-making: Custom NSGA-II with repair operators for multi-objective optimization. *Mathematics*, 12(5), 730.
- [33] Salas, J., & Yepes, V. (2024). Improved delivery of social benefits through the maintenance planning of public assets. *Structure and Infrastructure Engineering*, 20(5), 699–714.
- [34] Zhou, Z., Zhou, J., Zhang, B., Alcalá, J., & Yepes, V. (2024). The centennial sustainable assessment of regional construction industry under the multidisciplinary coupling model. *Sustainable Cities and Society*, 101, 105201.
- [35] Zhou, Z., Zhou, J., Alcalá, J., & Yepes, V. (2024). Thermal coupling optimization of bridge environmental impact under natural conditions. *Environmental Impact Assessment Review*, 104, 107316.