



XIII COLOQUIO DE ANÁLISIS, DISEÑO Y MONITOREO ESTRUCTURAL

Optimización híbrida del ciclo de vida de puentes y estructuras mixtas y modulares (HYDELIFE)

Hybrid life cycle optimization of composite and modular bridges and structures (HYDELIFE)

Víctor Yepes

ICITECH, Universitat Politècnica de València, España. vyepesp@cst.upv.es

Resumen:

El proyecto HYDELIFE aborda directamente el reto de la sostenibilidad social y medioambiental de las estructuras a lo largo de su ciclo de vida, desde el proyecto hasta la demolición. El objetivo consiste en la formulación y resolución del problema de optimización multiobjetivo que contemple el ciclo completo de construcciones modulares, puentes mixtos y estructuras híbridas. Para ello se han utilizado metaheurísticas híbridas con aprendizaje profundo, el empleo de la lógica neutrosófica y las redes bayesianas combinada con el análisis del ciclo de vida, análisis basado en fiabilidad, diseño óptimo robusto, metamodelos y técnicas de minería de datos. La principal contribución es la incorporación de las emergentes metaheurísticas híbridas basadas en el aprendizaje profundo para abordar la variabilidad de los parámetros y restricciones del problema de optimización multiobjetivo basado en criterios de sostenibilidad social y medioambiental. Por tanto, el proyecto aporta un mejor conocimiento en el diseño de las construcciones industrializadas, puentes mixtos y estructuras híbridas, tanto en el caso de obra nueva, como en el mantenimiento robusto si se aplica a infraestructuras existentes, mejorando la capacitación tecnológica de las empresas del sector y optimizando sus procesos de diseño, con el objetivo último de generar un beneficio social y medioambiental.



Abstract:

The HYDELIFE project directly addresses structures' social and environmental sustainability challenges throughout their lifecycle, from inception to demolition. The objective is to formulate and solve the multi-objective optimization problem that considers the complete lifecycle of modular constructions, mixed bridges, and hybrid structures. To achieve this, hybrid metaheuristics with Deep Learning have been employed, along with neutrosophic logic and Bayesian networks combined with lifecycle analysis, reliability-based analysis, robust optimal design, metamodels, and data mining techniques. The primary contribution lies in incorporating emerging hybrid metaheuristics based on Deep Learning to address the variability in parameters and constraints in the multi-objective optimization problem based on social and environmental sustainability criteria. Therefore, the project provides enhanced knowledge in the design of industrialized constructions, mixed bridges, and hybrid structures, whether for new construction or robust maintenance of existing infrastructures. This enhances the technological capabilities of companies in the sector and optimizes their design processes to generate social and environmental benefits.

Palabras Clave: Estructuras; Optimización; Puentes; Ciclo de Vida; Estructuras híbridas; Sostenibilidad.

Keywords: Structures; Optimization; Bridges; Life Cycle; Hybrid Structures; Sustainability.

1. Introducción

1.1 Antecedentes y justificación del proyecto

La sostenibilidad económica y el desarrollo social de la mayoría de los países dependen en gran medida del comportamiento confiable y duradero de sus infraestructuras (Frangopol, 2011). La construcción y el mantenimiento de estas infraestructuras ejercen una influencia significativa en la actividad económica, el crecimiento y el empleo. Sin embargo, estas actividades también ejercen un impacto considerable en el medio ambiente, pueden generar efectos irreversibles y poner en riesgo el futuro de la sociedad.



IV Convención Científica Internacional UCLV 2023
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Optimización híbrida del ciclo de vida de puentes y estructuras mixtas y modulares (HYDELIFE)

Por lo tanto, el desafío radica en desarrollar infraestructuras que puedan maximizar su beneficio social sin comprometer su sostenibilidad (Aguado et al., 2012).

Por otro lado, el envejecimiento de las infraestructuras, el aumento en la demanda de su rendimiento (como el incremento del tráfico, por ejemplo) y la creciente amenaza de desastres naturales, como terremotos, huracanes e inundaciones, afectan negativamente al rendimiento esperado de estas infraestructuras (Biondini y Frangopol, 2016). Esta situación constituye una verdadera bomba de relojería (Thurlby, 2013) que, sumada al desafío de reducir los impactos ambientales, proporciona razones más que suficientes para mejorar el mantenimiento de nuestros puentes.

Un estudio sobre las "Necesidades de Inversión en Conservación 2019-2020" realizado por la Asociación Española de Carreteras, que se centró en firmes y señalización, estima un déficit acumulado de 7.500 millones de euros en cuanto al deterioro del patrimonio viario. Sin embargo, este problema es común en otros países desarrollados. En 2019, más del 20% de los puentes en Estados Unidos, es decir, 47,000 puentes, presentaban deficiencias estructurales (American Road & Transportation Builders Association, 2019). En el Reino Unido, más de 3,000 puentes estaban por debajo de los estándares y necesitaban reparación (RAC Foundation, 2019). El problema se vuelve aún más serio cuando una parte significativa de la infraestructura se acerca al final de su vida útil, y especialmente cuando existen riesgos de alto impacto y baja probabilidad que podrían afectar gravemente a estas infraestructuras. Todos estos factores subrayan la necesidad de extender la vida útil de los puentes.

En definitiva, la sociedad se enfrenta a una auténtica crisis en el ámbito de las infraestructuras. El desafío social reside en la aplicación de presupuestos restrictivos que minimicen los impactos ambientales y los riesgos para las personas, y que la gestión sea socialmente sostenible dentro de una política de conservación del patrimonio. Por lo tanto, se trata de un problema de optimización sumamente complejo, con numerosas restricciones y sometido a una gran incertidumbre, lo que representa un importante desafío científico, pues no se presta fácilmente a la exploración con las herramientas analíticas y de previsión tradicionales.

La relevancia de esta propuesta se encuentra en dos aspectos fundamentales: el uso de una metodología emergente y novedosa en el ámbito de las estructuras, que implica la combinación de metaheurísticas con la inteligencia artificial, en particular el aprendizaje



IV Convención Científica Internacional UCLV 2023
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Optimización híbrida del ciclo de vida de puentes y estructuras
mixtas y modulares (HYDELIFE)

profundo (*Deep Learning*, DL), y el objeto de estudio, que abarca la construcción industrializada modular en edificaciones, puentes mixtos de hormigón y acero, así como estructuras híbridas de acero. A continuación, se justifica la importancia de la propuesta. En las últimas décadas, la Inteligencia Artificial (IA) ha sido ampliamente utilizada en investigaciones relacionadas con la ingeniería civil (Yepes et al., 2023), especialmente en el ámbito de las estructuras e infraestructuras (Taffese et al., 2017). Sin embargo, métodos más recientes como el reconocimiento de patrones (Pattern Recognition, PR), el aprendizaje automático (*Machine Learning*, ML) y el aprendizaje profundo (DL) representan enfoques emergentes en este campo de la ingeniería (Salehi et al., 2018). Estas técnicas tienen la capacidad de aprender las complejas interacciones entre parámetros y variables, lo que les permite resolver una variedad de problemas difíciles, o incluso imposibles de resolver con métodos tradicionales. Pueden descubrir información oculta y no trivial sobre el rendimiento de una estructura al analizar la influencia de varios mecanismos de daño o degradación, así como los datos recopilados de sensores. Además, el ML y el DL demuestran un gran potencial en el ámbito de la mecánica computacional, como por ejemplo, para optimizar los procesos en el método de elementos finitos y mejorar la eficiencia de los cálculos (García et al., 2022).

La optimización de estructuras ha sido objeto de una intensa investigación en las últimas décadas (Afzal et al., 2020). Dado que los problemas del mundo real involucran un gran número de variables, la solución exacta de los problemas de optimización asociados se torna prácticamente inalcanzable. Estos problemas se conocen como NP-hard y poseen una complejidad computacional elevada, lo que requiere el uso de metaheurísticas para obtener soluciones satisfactorias en tiempos de cómputo razonables. El aprovechamiento de la gran cantidad de datos generados por las numerosas iteraciones necesarias en la optimización estructural a través de metaheurísticas es un aspecto fundamental. Esta área es especialmente adecuada para la aplicación de la inteligencia artificial, pues permite extraer información para acelerar y perfeccionar la búsqueda de soluciones óptimas. Un ejemplo es el trabajo de García-Segura et al. (2017a) sobre la optimización multiobjetivo de puentes cajón, donde una red neuronal aprendía de los datos intermedios de la búsqueda y luego predecía con una precisión excepcional los cálculos de los puentes, sin necesidad de realizar cálculos completos. Esto reduce significativamente el tiempo de computación final. Sin embargo, esta aplicación es relativamente sencilla, pues solo



IV Convención Científica Internacional UCLV 2023
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Optimización híbrida del ciclo de vida de puentes y estructuras
mixtas y modulares (HYDELIFE)

reduce el tiempo de cálculo (cada evaluación completa de un puente a través del método de elementos finitos es mucho más lenta que una predicción con una red neuronal). HYDELIFE ha llevado esta idea un paso más allá al hacer que la metaheurística aprenda de los datos recopilados utilizando la inteligencia artificial, lo que no solo la hará más rápida, sino también más efectiva.

En concreto, esta propuesta se enfoca en el aprendizaje profundo (DL), una rama del Machine Learning (ML) que utiliza algoritmos altamente sofisticados construidos a partir de principios de redes neuronales. El enfoque metodológico central de este proyecto se concentra en la investigación de la integración específica del DL en las metaheurísticas, con el propósito de mejorar tanto la calidad de las soluciones como los tiempos de convergencia al abordar la optimización de estructuras (Martínez-Muñoz et al., 2023a).

En lo que respecta al enfoque de este proyecto, se centra en el aprendizaje profundo (DL), una rama del Aprendizaje Automático (*Machine Learning*, ML) que utiliza algoritmos avanzados basados en redes neuronales. El objetivo metodológico central de este proyecto ha sido la integración específica del DL en las metaheurísticas con el propósito de mejorar tanto la calidad de las soluciones como los tiempos de convergencia al abordar la optimización de estructuras.

En cuanto al ámbito de estudio, la construcción industrializada modular, ya sea en edificaciones, puentes mixtos de hormigón y acero, o estructuras híbridas de acero, su relevancia se deriva de su creciente importancia y de las brechas identificadas en la investigación. Aunque la construcción modular y la prefabricación son técnicas con décadas de experiencia, desde que Eugène Freyssinet construyó el primer puente de hormigón pretensado del mundo en 1936, la verdadera revolución está siendo impulsada por la Inteligencia Artificial (IA), las tecnologías BIM y los desafíos de la sostenibilidad, lo que está llevando esta práctica a una nueva dimensión (Maureira et al., 2021).

La norma UNE 127050:2020 se enfoca en sistemas constructivos industrializados para edificios construidos a partir de elementos prefabricados de hormigón, estableciendo requisitos de comportamiento, fabricación, instalación y verificación. Los "*Modern Methods of Construction*" (MMC), también conocidos como "construcción inteligente", representan una alternativa a la construcción tradicional, abarcando una amplia gama de tecnologías basadas en la fabricación modular, ya sea en el lugar de construcción o en fábricas, lo que está transformando la forma de construir, haciéndola más rápida, rentable



y eficiente (Sánchez-Garrido et al., 2022, 2023). Un ejemplo notable fue la construcción de dos hospitales de campaña en Wuhan (China) en tan solo 12 días durante la crisis de la COVID-19. Países como Suecia y Japón lideran en el uso de MMC, con Suecia utilizando este enfoque en casi la mitad de las nuevas viviendas y Japón en una proporción menor pero significativa. La construcción MMC ofrece ventajas como el ahorro de tiempo de hasta un 50%, la utilización de materiales sostenibles, la reducción de desperdicios y un mayor control de calidad, al evitar que los materiales estén expuestos a las inclemencias climáticas durante la construcción.

No obstante, en algunos países, la adopción de MMC presenta costos más elevados que la construcción tradicional, junto con desafíos como la escasez de mano de obra especializada y barreras regulatorias. Sin embargo, la crisis pasada del COVID-19 ha acelerado los cambios necesarios. Los métodos MMC no compiten con la construcción tradicional, sino que la complementan, con el objetivo de aumentar la productividad, mejorar la calidad, la eficiencia empresarial, la satisfacción del cliente, el rendimiento ambiental, la sostenibilidad y el control de los plazos de entrega. Un estudio realizado por Sánchez-Garrido et al. (2020) aplicó técnicas analíticas de toma de decisiones multicriterio (MCDM) y análisis del ciclo de vida para comparar la construcción tradicional de una vivienda unifamiliar con dos alternativas basadas en MMC. Se propuso un índice de sostenibilidad que abarca atributos tangibles e intangibles, así como factores de incertidumbre y riesgos, lo que permite a los promotores priorizar soluciones que aseguren la sostenibilidad económica, social y medioambiental. HYDELIFE profundiza en esta línea mediante la optimización multiobjetivo de la construcción modular.

Otro de los vacíos identificados por nuestro grupo se refiere a los puentes mixtos (Yepes et al., 2019; Martínez-Muñoz et al., 2020). El estado del arte indica que la investigación se ha centrado principalmente en el diseño preliminar de puentes con un enfoque económico, sin abordar la optimización multiobjetivo social y ambiental a lo largo de su ciclo de vida completo, lo que permitiría la aplicación de técnicas de toma de decisiones desde la etapa de diseño. A nivel global, la preocupación se centra en la búsqueda de soluciones sostenibles (Martínez-Muñoz et al., 2020, 2021, 2022). Además, se ha detectado una falta de investigación en puentes con vigas armadas híbridas (Terreros-Bedoya et al., 2023), lo que presenta desafíos en términos de optimización a lo largo de su vida útil, especialmente en lo que respecta a la inestabilidad y otros fenómenos



relacionados con la reducción de espesores. Esto constituye un caso de optimización de gran interés que este proyecto ha abordado (Negrín et al., 2023a). En este tipo de estructuras se utilizan diferentes límites elásticos de acero en las chapas de alas y alma para disminuir el espesor de las chapas de mayor límite elástico, lo cual supone una reducción de peso por unidad de longitud de la sección transversal (Chacón, 2014).

En resumen, el proyecto HYDELIFE aborda de manera integral estos vacíos en la investigación, aprovechando la inteligencia artificial y las tecnologías emergentes para optimizar tanto la construcción modular como los puentes mixtos, con el objetivo de mejorar la sostenibilidad y eficiencia en estos campos clave de la ingeniería.

1.2 Objetivos generales y específicos

El objetivo principal de este proyecto radica en abordar el desafío social que representa la construcción y conservación de construcciones modulares y puentes mixtos en situaciones de restricciones presupuestarias significativas. Para lograrlo, es esencial dar un salto científico que permita integrar diversos actores y grupos de expertos en el proceso de toma de decisiones, teniendo en cuenta criterios de sostenibilidad social y ambiental a lo largo de todo el ciclo de vida de las infraestructuras, considerando la variabilidad inherente en el mundo real (Navarro et al., 2022; Sánchez-Garrido et al. 2020, 2022).

Para lidiar con las incertidumbres que impactan en este sistema, el proyecto propuso la aplicación de técnicas metaheurísticas híbridas basadas en la fiabilidad. Estas técnicas no solo se aplican en el diseño de nuevas estructuras, sino también en el mantenimiento de las infraestructuras existentes (Salas y Yepes, 2022). Además, se realizó un estudio de sensibilidad que abordará diferentes escenarios presupuestarios y evaluará las hipótesis utilizadas en los análisis del ciclo de vida. Esto proporciona conocimientos valiosos y no triviales sobre las mejores prácticas en este campo. Es importante destacar que esta metodología también es aplicable a otros tipos de infraestructuras (Martínez-Fernández et al. 2022).

El objetivo general se desarrolló mediante los objetivos específicos mostrados en la Figura 1 y que se describen a continuación:

1. Análisis de funciones de distribución específicas para el diseño óptimo basado en fiabilidad que integre aspectos ambientales, sociales y económicos que sirva para la toma de decisión multicriterio (García-Segura et al., 2017b; Sierra et al., 2021).



IV Convención Científica Internacional UCLV 2023
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Optimización híbrida del ciclo de vida de puentes y estructuras mixtas y modulares (HYDELIFE)

2. Determinación de indicadores clave basados en redes bayesianas y lógica neutrosófica para garantizar una efectiva integración de la sostenibilidad ambiental y social en la licitación de proyectos mantenimiento de construcciones modulares, puentes mixtos e híbridos (Sánchez-Garrido et al, 2021; Zhou et al., 2021; Navarro et al., 2022).
3. Identificación de estrategias de mantenimiento robusto óptimo de construcciones modulares y puentes mixtos y estructuras híbridas.
4. Formulación y resolución del problema de optimización multiobjetivo que contemple el ciclo completo de construcciones modulares, puentes mixtos y estructuras híbridas mediante metaheurísticas híbridas (Ruiz-Velez et al., 2023).
5. Comparación del diseño robusto óptimo respecto a la optimización heurística considerando incertidumbres en los escenarios presupuestarios y en las hipótesis del análisis del ciclo de vida.
6. Difusión de resultados y redacción de informes (ver referencias).

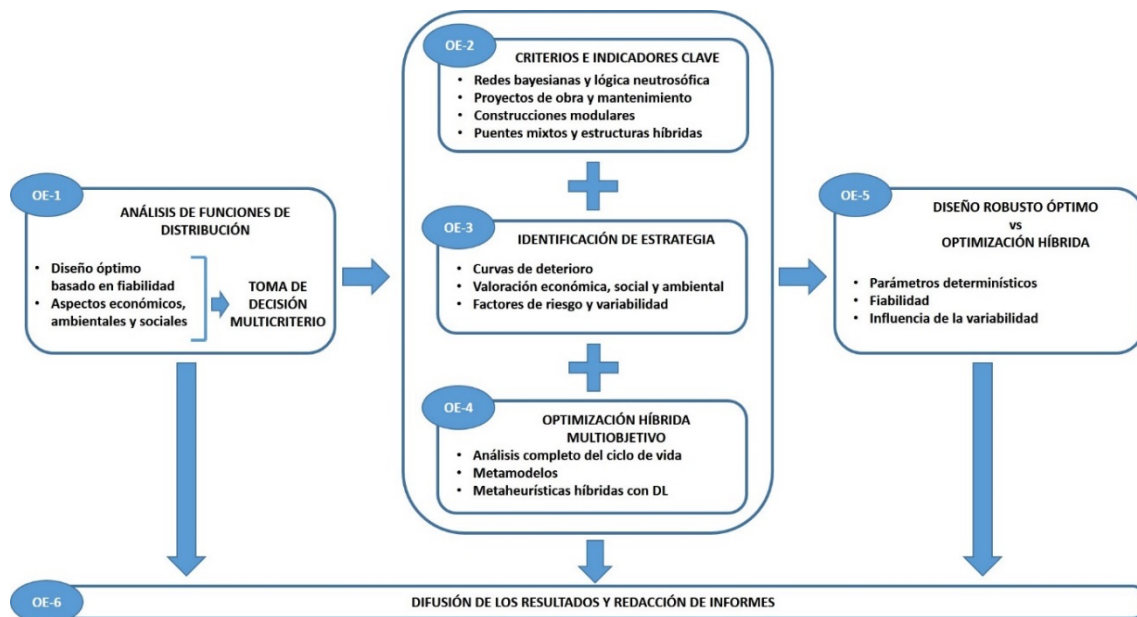


Figura 1. Objetivos específicos del proyecto HYDELIFE.

2. Metodología

El análisis del estado del arte ha identificado dos lagunas en la investigación: la falta de utilización de metaheurísticas híbridas en combinación con Deep Learning, así como su aplicación en construcciones modulares, puentes mixtos y estructuras híbridas. Además,



IV Convención Científica Internacional UCLV 2023
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Optimización híbrida del ciclo de vida de puentes y estructuras mixtas y modulares (HYDELIFE)

el empleo de la lógica neutrosófica y las redes bayesianas presenta oportunidades en el campo de la toma de decisiones multicriterio. Estas innovaciones se integran en la metodología propuesta junto con técnicas y enfoques previamente empleados en proyectos anteriores, como el análisis del ciclo de vida, análisis basado en fiabilidad, diseño óptimo robusto, metamodelos y técnicas de minería de datos. Por lo tanto, el enfoque integrado tiene como objetivo priorizar el tipo de diseño, ya sea para estructuras nuevas o para su mantenimiento, teniendo en cuenta criterios de sostenibilidad social y ambiental en el contexto de restricciones presupuestarias, y considerando la variabilidad inherente a los problemas del mundo real.

La Figura 2 presenta el esquema metodológico propuesto, estableciendo conexiones entre las fases y los objetivos planteados. Este enfoque es de naturaleza mixta e interactiva, en el cual el decisor proporciona información sobre sus preferencias al analista. Luego, tras llevar a cabo una optimización multiobjetivo basada en fiabilidad y metamodelos, se genera un conjunto de soluciones eficientes que el decisor debe evaluar antes de tomar una decisión final. La innovación clave de esta metodología de tres fases radica en la integración de técnicas de información a priori, donde el decisor (grupos de interés) comparte sus preferencias con el analista en términos de tipologías, métodos de construcción, conservación, etc. Esta información se utiliza en una optimización multiobjetivo que es capaz de generar alternativas eficientes aprovechando la variabilidad en los parámetros, variables y restricciones. La última fase implica un proceso de retroalimentación para que el decisor pueda considerar aspectos no contemplados en la optimización y, finalmente, tomar una decisión completa.



IV Convención Científica Internacional UCLV 2023
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Optimización híbrida del ciclo de vida de puentes y estructuras mixtas y modulares (HYDELIFE)

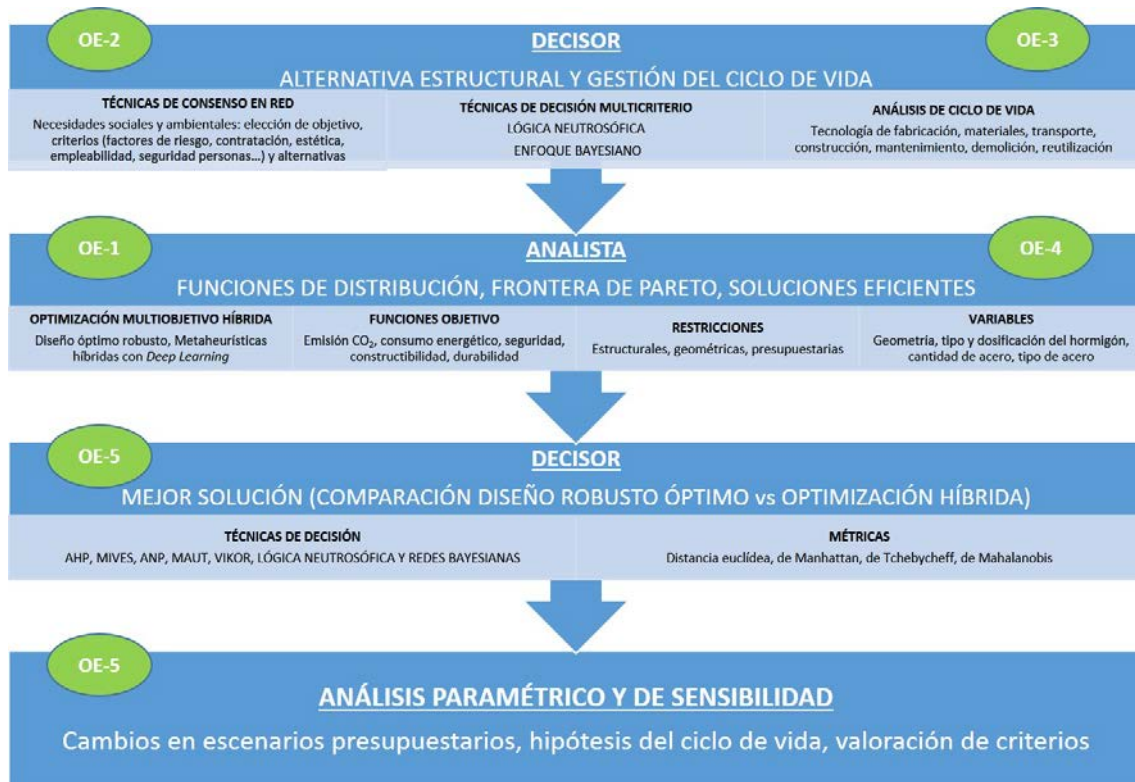


Figura 2. Esquema metodológico diseñado para HYDELIFE en relación con los objetivos.

3. Resultados y discusión

Aunque el proyecto de investigación empezó en el año 2021 y termina a finales del 2023, aporta avances significativos en el campo de la toma de decisiones relacionadas con el diseño óptimo robusto y el mantenimiento de construcciones modulares y puentes mixtos basándose en fiabilidad, teniendo en cuenta presupuestos restrictivos. La principal contribución es la incorporación de las emergentes metaheurísticas híbridas basadas en Deep Learning para abordar la variabilidad de los parámetros y restricciones del problema de optimización multiobjetivo basado en criterios de sostenibilidad social y medioambiental. Se ha aportado un mejor conocimiento en el diseño de las construcciones industrializadas, puentes mixtos y estructuras híbridas, tanto en el caso de obra nueva, como en el mantenimiento robusto si se aplica a infraestructuras existentes, mejorando la capacitación tecnológica de las empresas del sector y optimizando sus procesos de diseño, con el objetivo último de generar un beneficio social y medioambiental. Los resultados son directamente transferibles a códigos y normativas,



IV Convención Científica Internacional UCLV 2023
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Optimización híbrida del ciclo de vida de puentes y estructuras mixtas y modulares (HYDELIFE)

paquetes informáticos de software para proyectistas y recomendaciones tanto para el proyecto como para el mantenimiento.

Además de estas contribuciones, el proyecto ofrece resultados científicos que pueden ser la base para futuras investigaciones:

- 1) Formulación de una metodología de participación social de actores implicados y expertos que definan un proceso de decisión multicriterio, que integre aspectos objetivos y subjetivos. Desarrollo de técnicas emergentes como la lógica neutrosófica y otras consolidadas como redes bayesianas para abordar la incertidumbre, tanto en los criterios como en los expertos.
- 2) Propuesta de nuevas técnicas de optimización multiobjetivo basada en metaheurísticas híbridas basadas en Deep Learning y fiabilidad que integren metamodelos para acelerar la convergencia de cálculo considerando el ciclo de vida.
- 3) Propuesta de nuevas métricas que prioricen las soluciones eficientes (frontera de Pareto) obtenidas de procesos de optimización multiobjetivo robusto y que permitan alimentar un post-proceso de toma de decisiones multicriterio.
- 4) Definición del tipo de política presupuestaria que perjudica en mayor medida la sostenibilidad social y ambiental a lo largo del ciclo de vida en construcción modular y puentes mixtos y estructuras híbridas. Definición de buenas prácticas de diseño y mantenimiento robustas a los cambios en los escenarios presupuestarios.
- 5) Valoración de la influencia de la optimización multiobjetivo basada en fiabilidad según el momento en que se aplique: obra nueva (diseño) o mantenimiento del parque de infraestructuras viarias.
- 6) Valoración de la influencia de la variabilidad en la cercanía a la infactibilidad de las soluciones optimizadas con criterios deterministas o estocásticos. Se buscan recomendaciones de diseño o de mantenimiento considerando la robustez de la solución.
- 7) Desarrollar una guía de ayuda para clientes públicos y privados que permita potenciar la incorporación de criterios sostenibles en los procedimientos de licitación



IV Convención Científica Internacional UCLV 2023
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Optimización híbrida del ciclo de vida de puentes y estructuras
mixtas y modulares (HYDELIFE)

El proyecto HYDELIFE ha superado algunas limitaciones que tenían las líneas de investigación dentro de nuestro grupo, entre las que destacan las siguientes:

- Ampliación del análisis del ciclo de vida no solo a los puentes de hormigón, sino a otras tipologías como puentes mixtos y estructuras híbridas, además de estructuras industrializadas modulares.
- Uso de metaheurísticas híbridas basadas en la inteligencia artificial con un doble objetivo: mejorar la calidad de las soluciones al incorporar el aprendizaje profundo en la base de datos generadas en la búsqueda de los algoritmos y reducir los tiempos de cálculo.
- Exploración del efecto de la aleatoriedad de los parámetros con la incorporación del diseño óptimo robusto y del diseño óptimo basado en fiabilidad para evitar que los proyectos reales optimizados sean infactibles ante pequeños cambios.
- Profundización en las funciones de distribución de los impactos sociales y ambientales en las construcciones modulares y mixtas.
- Intensificación en la investigación dirigida a la fase de mantenimiento, centrando más el problema social que plantean las estructuras modulares y mixtas en servicio.
- Análisis de la sensibilidad que existe en las políticas presupuestarias poco sensibles a la realidad del sector en la gestión de las estructuras. Ello supone modelar distintos escenarios económicos y analizar las soluciones eficientes derivadas, especialmente en épocas de crisis.
- Investigación de los factores determinantes en la toma de decisión multicriterio.
- Análisis de los costes de mantenimiento y los esperados en caso de fallo. Además, las incertidumbres asociadas con el deterioro requieren métodos probabilísticos.
- Estudio en el análisis de ciclo de vida la inclusión de la demolición y reutilización de los materiales de las infraestructuras, siendo una de las variables de diseño la durabilidad.

En los casi tres años en los que se ha desarrollado esta investigación, la producción científica ha superado los 60 artículos indexados en revistas de alto impacto del JCR (ver algunas de las más significativas en las referencias). Además, se han terminado dos tesis doctorales, dos de ellas están a punto de terminar y se encuentran ocho más en marcha.



4. Conclusiones

El proyecto de investigación HYDELIFE ha introducido, en primer lugar, técnicas emergentes del aprendizaje profundo en la hibridación de las metaheurísticas. Esto es crucial para no perder la capacidad predictiva de la inteligencia artificial y la eficiencia de esta nueva generación de algoritmos. En segundo lugar, el proyecto aborda la construcción industrializada modular en los ámbitos de edificación y obra civil, analizando detalladamente puentes mixtos y estructuras híbridas en comparación con soluciones de hormigón. Se realizó un análisis completo de ciclo de vida que considera la sostenibilidad social y medioambiental. Para ello, se han profundizado en técnicas emergentes de toma de decisiones, como la lógica neutrosófica y el uso de redes bayesianas.

En este contexto, a pesar de los avances en la optimización multiobjetivo de estructuras, en el mundo real existen incertidumbres, imperfecciones y desviaciones con respecto a los parámetros utilizados en los códigos, como las propiedades del material, la geometría y las cargas. Las estructuras óptimas a menudo se encuentran cerca de la región de infactibilidad. Por lo tanto, el proyecto ha incorporado estas incertidumbres para desarrollar diseños más robustos y confiables, tanto en el enfoque de diseño basado en fiabilidad como en el diseño óptimo robusto. No obstante, el gran desafío de la optimización multiobjetivo de estructuras con incertidumbres es el alto costo computacional. Para abordar este problema, el proyecto utiliza metamodelos que ofrecen aproximaciones funcionales de las variables de diseño en relación con sus respuestas, lo que reduce la necesidad de realizar un gran número de análisis completos. Además, las metaheurísticas híbridas basadas en aprendizaje profundo emergen como enfoques que pueden mejorar estas estrategias previas.

Este enfoque también responde a una necesidad social. Las incertidumbres en la toma de decisiones, tanto en el diseño de nuevas infraestructuras como en su mantenimiento, especialmente cuando se consideran aspectos de sostenibilidad social y ambiental en situaciones de restricciones presupuestarias extremas, son problemas que afectan directamente a las infraestructuras viarias. El análisis basado en la fiabilidad y el diseño robusto se han explorado en profundidad para garantizar que las soluciones optimizadas sean resistentes a la variabilidad intrínseca de los parámetros. La contratación pública



sostenible, tanto para nuevas infraestructuras como para su mantenimiento, se ha incorporado debido a su gran influencia en el sector. Esto permitirá proponer políticas de actuación, pues las exigencias de las administraciones públicas tendrán un papel fundamental en el diseño, construcción y mantenimiento de infraestructuras, considerando las restricciones presupuestarias existentes.

Aunque el proyecto aún no ha concluido, los resultados obtenidos y publicados hasta el momento sugieren que esta línea de investigación ofrece una amplia gama de posibles extensiones. Esto puede requerir colaboraciones con otros grupos de investigación para lograr resultados de mayor alcance.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación del proyecto PID2020-117056RB-I00 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por "FEDER Una manera de hacer Europa".

6. Referencias bibliográficas

1. Afzal, M., Liu, Y., Cheng, J. C., & Gan, V. J. (2020). Reinforced concrete structural design optimization: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 260, 120623.
2. Aguado, A., Caño, A. D., de la Cruz, M. P., Gómez, D., & Josa, A. (2012). Sustainability assessment of concrete structures within the Spanish structural concrete code. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(2), 268-276.
3. American Road & Transportation Builders Association (2019). 2019 Bridge Report. <https://artbabridgereport.org/>
4. Ata-Ali, N., Penadés-Plà, V., Martínez-Muñoz, D., & Yepes, V. (2021). Recycled versus non-recycled insulation alternatives: LCA analysis for different climatic conditions in Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 175, 105838.
5. Bianchi, P. F., Yepes, V., Vitorio Jr, P. C., & Kripka, M. (2021). Study of alternatives for the design of sustainable low-income housing in Brazil. *Sustainability*, 13(9), 4757.



IV Convención Científica Internacional UCLV 2023
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Optimización híbrida del ciclo de vida de puentes y estructuras
mixtas y modulares (HYDELIFE)

6. Biondini, F., & Frangopol, D. M. (2016). Life-cycle performance of deteriorating structural systems under uncertainty. *Journal of Structural Engineering*, 142(9), F4016001.
7. Chacón Flores, R. A. (2014). Vigas armadas híbridas de acero: estado del conocimiento. *Revista ciencia e ingeniería*, 35(2), 95-102.
8. 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.
9. Frangopol, D. M. (2019). Life-cycle performance, management, and optimisation of structural systems under uncertainty: Accomplishments and challenges. *Structures and Infrastructure Systems*, 5-29.
10. Garcia, J., Villavicencio, G., Altimiras, F., Crawford, B., Soto, R., Minatogawa, 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.
11. García-Segura, T., Yepes, V., & Frangopol, D. M. (2017a). Multi-objective design of post-tensioned concrete road bridges using artificial neural networks. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 56, 139-150.
12. García-Segura, T., Yepes, V., Frangopol, D. M., & Yang, D. Y. (2017b). Lifetime reliability-based optimization of post-tensioned box-girder bridges. *Engineering Structures*, 145, 381-391.
13. Hadizadeh-Bazaz, M., Navarro, I. J., & Yepes, V. (2023). Life Cycle Assessment of a Coastal Concrete Bridge Aided by Non-Destructive Damage Detection Methods. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(9), 1656.
14. 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.
15. Lemus-Romani, J., Ossandón, D., Sepúlveda, R., Carrasco-Astudillo, N., Yepes, V., & García, J. (2023). Optimizing Retaining Walls through Reinforcement Learning Approaches and Metaheuristic Techniques. *Mathematics*, 11(9), 2104.
16. Martínez Fernández, P., Villalba Sanchís, I., Insa Franco, R., & Yepes, V. (2022). Slab Track Optimization Using Metamodels to Improve Rail Construction



- Sustainability. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(7), 04022053.
17. Martínez-Muñoz, D., García, J., Martí, J. V., & Yepes, V. (2022a). Discrete swarm intelligence optimization algorithms applied to steel–concrete composite bridges. *Engineering Structures*, 266, 114607.
 18. Martínez-Muñoz, D., García, J., Martí, J. V., & Yepes, V. (2022b). Optimal design of steel–concrete composite bridge based on a transfer function discrete swarm intelligence algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65(11), 312.
 19. Martínez-Muñoz, D., García, J., Martí, J. V., & Yepes, V. (2023a). Deep learning classifier for life cycle optimization of steel–concrete composite bridges. *Structures*, 57, 105347.
 20. Martínez-Muñoz, D., García, J., Martí, J. V., & Yepes, V. (2023b). Hybrid Swarm Intelligence Optimization Methods for Low-Embodied Energy Steel-Concrete Composite Bridges. *Mathematics*, 11(1), 140.
 21. Martínez-Muñoz, D., Martí, J. V., & Yepes, V. (2020). Steel-concrete composite bridges: design, life cycle assessment, maintenance, and decision-making. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1-13.
 22. Martínez-Muñoz, D., Martí, J. V., & Yepes, V. (2021). Comparative life cycle analysis of concrete and composite bridges varying steel recycling ratio. *Materials*, 14(15), 4218.
 23. Martínez-Muñoz, D., Martí, J. V., & Yepes, V. (2022). Social impact assessment comparison of composite and concrete bridge alternatives. *Sustainability*, 14(9), 5186.
 24. Martínez-Muñoz, D., Martí, J. V., García, J., & Yepes, V. (2021). Embodied energy optimization of buttressed earth-retaining walls with hybrid simulated annealing. *Applied Sciences*, 11(4), 1800.
 25. Mathern, A., Penadés-Plà, V., Armesto Barros, J., & Yepes, V. (2022). Practical metamodel-assisted multi-objective design optimization for improved sustainability and buildability of wind turbine foundations. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65(2), 46.



26. Maureira, C., Pinto, H., Yepes, V., & García, J. (2021). Towards an AEC-AI industry optimization algorithmic knowledge mapping: an adaptive methodology for macroscopic conceptual analysis. *IEEE Access*, 9, 110842-110879.
27. Navarro, I. J., Martí, J. V., & Yepes, V. (2022). Analytic network process-based sustainability life cycle assessment of concrete bridges in coastal regions. *Sustainability*, 14(17), 10688.
28. Negrin, I., Kripka, M., & Yepes, V. (2023a). Design optimization of welded steel plate girders configured as a hybrid structure. *Journal of Constructional Steel Research*, 211, 108131.
29. Negrin, I., Kripka, M., & Yepes, V. (2023b). Metamodel-assisted design optimization in the field of structural engineering: A literature review. *Structures*, 52, 609-631.
30. Negrin, I., Kripka, M., & Yepes, V. (2023c). Metamodel-assisted meta-heuristic design optimization of reinforced concrete frame structures considering soil-structure interaction. *Engineering Structures*, 293, 116657.
31. Negrin, I., Kripka, M., & Yepes, V. (2023d). Multi-criteria optimization for sustainability-based design of reinforced concrete frame buildings. *Journal of Cleaner Production*, 139115.
32. RAC Foundation. (2019). Bridge maintenance table – GB local authorities. <https://www.racfoundation.org/media-centre/bridge-maintenance-backlog-grows>
33. Ruiz-Vélez, A., Alcalá, J., & Yepes, V. (2022). Optimal Design of Sustainable Reinforced Concrete Precast Hinged Frames. *Materials*, 16(1), 204.
34. Ruiz-Vélez, A., Alcalá, J., & Yepes, V. (2023). A Parametric Study of Optimum Road Modular Hinged Frames by Hybrid Metaheuristics. *Materials*, 16(3), 931.
35. Salas, J., & Yepes, V. (2022). Improved delivery of social benefits through the maintenance planning of public assets. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1-16.
36. Salehi, H., & Burgueño, R. (2018). Emerging artificial intelligence methods in structural engineering. *Engineering structures*, 171, 170-189.
37. Sánchez-Garrido, A. J., & Yepes, V. (2020). Multi-criteria assessment of alternative sustainable structures for a self-promoted, single-family home. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120556.



38. Sánchez-Garrido, A. J., Navarro, I. J., & Yepes, V. (2021). Neutrosophic multi-criteria evaluation of sustainable alternatives for the structure of single-family homes. *Environmental Impact Assessment Review*, 89, 106572.
39. Sánchez-Garrido, A. J., Navarro, I. J., & Yepes, V. (2022). Evaluating the sustainability of soil improvement techniques in foundation substructures. *Journal of Cleaner Production*, 351, 131463.
40. Sánchez-Garrido, A. J., Navarro, I. J., & Yepes, V. (2022). Multi-criteria decision-making applied to the sustainability of building structures based on Modern Methods of Construction. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129724.
41. 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*, 106725.
42. Sierra, L., Araya, F., & Yepes, V. (2021). Consideration of uncertainty and multiple disciplines in the determination of sustainable criteria for rural roads using neutrosophic logic. *Sustainability*, 13(17), 9854.
43. Taffese, W. Z., & Sistonen, E. (2017). Machine learning for durability and service-life assessment of reinforced concrete structures: Recent advances and future directions. *Automation in Construction*, 77, 1-14.
44. Terreros-Bedoya, A., Negrin, 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.
45. Thurlby, R. (2013). Managing the asset time bomb: a system dynamics approach. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Forensic Engineering*, 166(3), 134-142.
46. Vitorio Junior, P. C., Yepes, V., & Kripka, M. (2022). Comparison of Brazilian Social Interest Housing Projects Considering Sustainability. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(10), 6213.
47. Yepes, V., Dasí-Gil, M., Martínez-Muñoz, D., López-Desfilis, V. J., & Martí, J. V. (2019). Heuristic techniques for the design of steel-concrete composite pedestrian bridges. *Applied Sciences*, 9(16), 3253.



48. Yepes, V., Kripka, M., Yepes-Bellver, L., & García, J. (2023). La inteligencia artificial en la ingeniería civil: oportunidades y desafíos. *IC Ingeniería Civil*, 642:20-23.
49. Yepes, V., Martí, J. V., & García-Segura, T. (2015). Cost and CO2 emission optimization of precast–prestressed concrete U-beam road bridges by a hybrid glowworm swarm algorithm. *Automation in Construction*, 49, 123-134.
50. Yepes, V., Martí, J. V., García-Segura, T., & González-Vidosa, F. (2017). Heuristics in optimal detailed design of precast road bridges. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(4), 738-749.
51. Yepes-Bellver, L., Brun-Izquierdo, A., Alcalá, J., & Yepes, V. (2022). CO₂-optimization of post-tensioned concrete slab-bridge decks using surrogate modeling. *Materials*, 15(14), 4776.
52. Yepes-Bellver, L., Brun-Izquierdo, A., Alcalá, J., & Yepes, V. (2023). Embodied Energy Optimization of Prestressed Concrete Road Flyovers by a Two-Phase Kriging Surrogate Model. *Materials*, 16(20), 6767.
53. Zhou, Z. W., Alcalá, J., & Yepes, V. (2022). Regional sustainable development impact through sustainable bridge optimization. *Structures*, 41, 1061-1076.
54. Zhou, Z. W., Alcalá, J., & Yepes, V. (2022). Research on the optimized environment of large bridges based on multi-constraint coupling. *Environmental Impact Assessment Review*, 97, 106914.
55. Zhou, Z. W., Alcalá, J., & Yepes, V. (2023). Carbon impact assessment of bridge construction based on resilience theory. *Journal of Civil Engineering and Management*, 29(6), 561-576.
56. Zhou, Z. W., Alcalá, J., Kripka, M., & Yepes, V. (2021). Life cycle assessment of bridges using Bayesian networks and fuzzy mathematics. *Applied Sciences*, 11(11), 4916.
57. Zhou, Z., Alcalá, J., & Yepes, V. (2021). Optimized application of sustainable development strategy in international engineering project management. *Mathematics*, 9(14), 1633.
58. Zhou, Z., Alcalá, J., & Yepes, V. (2022). Research on Sustainable Development of the Regional Construction Industry Based on Entropy Theory. *Sustainability*, 14(24), 16645.



IV Convención Científica Internacional UCLV 2023
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Optimización híbrida del ciclo de vida de puentes y estructuras mixtas y modulares (HYDELIFE)

59. 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.