

OPTIMIZACIÓN DE MARCOS ARTICULADOS PREFABRICADOS DE HORMIGÓN ARMADO MEDIANTE RECOCIDO SIMULADO HÍBRIDO

REINFORCED CONCRETE PRECAST HINGED FRAMES OPTIMIZATION WITH HYBRID SIMULATED ANNEALING

Andrés Ruiz-Vélez¹, Julián Alcalá¹, Moacir Kripka², Víctor Yepes¹

¹ Instituto Universitario de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), Universitat Politècnica de València, Valencia, España. E-mail: aruivel@doctor.upv.es, jualgon@upv.es, vyepes@cst.upv.es

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGEng), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Brasil. E-mail: mkripka@upf.br

RESUMEN

Los marcos articulados prefabricados de hormigón armado son una estructura de uso común en las redes de carreteras. Los avances en las técnicas de optimización permiten mejorar el proceso de diseño tradicional, consiguiendo minimizar factores como el coste final de la estructura. El estudio llevó a cabo la optimización económica de un marco articulado prefabricado de hormigón armado mediante la técnica metaheurística híbrida de recocido simulado con operador de mutación. Los parámetros del algoritmo fueron calibrados mediante un diseño de experimentos factorial, consiguiendo que el algoritmo tuviera un muy buen rendimiento. Tras su calibración, la metaheurística híbrida fue aplicada, consiguiendo diseños con costes finales reducidos. Finalmente, se mencionan una serie de características principales de los marcos óptimos, pudiendo destacar diseños esbeltos con densidades de armado elevadas. Los resultados sitúan la tipología estructural considerada como una alternativa especialmente interesante frente a las estructuras ejecutadas in situ.

Palabras clave: Marco articulado, prefabricado, hormigón armado, optimización, metaheurísticas híbridas.

ABSTRACT

Reinforced concrete precast hinged frames are commonly used in transportation infrastructure. Advances in optimization techniques lead to improvements in the traditional structural design process. These allow for minimizing factors such as the final cost of the structure. The present study developed the economic optimization of a reinforced concrete precast hinged frame. In order to do so, the hybrid metaheuristic technique of simulated annealing with a mutation operator was applied. The algorithm parameters were tuned by means of a factorial Design of Experiments. This allowed the algorithm to show excellent performance. Once tuned, the hybrid metaheuristic was applied, achieving designs with reduced final costs. Finally, a series of main characteristics are mentioned. The designs present reduced depths and considerably dense passive reinforcement designs. The results obtained position the precast structure as a particularly interesting alternative to similar cast in place structures.

Key words: Hinged frame, precast, reinforced concrete, optimization, hybrid metaheuristic.

1. INTRODUCCIÓN

La evolución de un país depende, de forma directa, de que su infraestructura sea capaz de sustentar y acompañar ese avance. Consecuentemente, la construcción, mantenimiento y posterior demolición de las estructuras que nos rodean son procesos necesarios para asegurar el correcto desarrollo de las actividades socioeconómicas del ser humano (Ramesh *et al.*, 2010). En este contexto, los marcos articulados prefabricados de hormigón armado (MAPHA), son una de las estructuras propias de la infraestructura de transporte con un uso más extendido. Funcionando como solución al cruce de caminos, o como sistemas de drenaje, estas estructuras conforman una de las tipologías más comunes en la red de carreteras (Carbonell *et al.*, 2011).

El desarrollo de las técnicas de optimización, promovido por la mejora de las herramientas computacionales a disposición del técnico promedio, abre la puerta a una serie de consideraciones que permiten mejoras en los diseños de las estructuras (Dede *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2022). Tradicionalmente el proceso de diseño estructural parte de la completa definición de las distintas secciones de la estructura, para luego verificar el cumplimiento de los requerimientos estructurales. De no ser así, se modifica el grado o la cantidad de los materiales utilizados. Este proceso da lugar a diseños que cumplen los requisitos estipulados en norma, pero muy condicionados por la habilidad, experiencia previa y conocimientos técnicos del proyectista responsable (Milani *et al.*, 2020).

La aplicación de técnicas exactas en la resolución de la mayoría de los problemas de diseño estructural no conforma una vía de mejora adecuada. Esto se debe principalmente a que, a pesar de que estos métodos aseguran la obtención del óptimo global del problema, el coste computacional aumenta exponencialmente con el número de factores considerados (Cohn y Dinovitzer, 1994; Penadés-Plà *et al.*, 2019). La complejidad del proceso de diseño conlleva la consideración de un gran número de variables, algo que dificulta en gran medida la sistematización del proceso de obtención de resultados. En este contexto, la aplicación de técnicas metaheurísticas ha demostrado ser una opción viable ya que obtienen óptimos de muy buena calidad, manteniendo un coste computacional adecuado (Boscardin *et al.*, 2019; Martínez-Muñoz *et al.*, 2022a, 2022b; Yepes y Medina, 2006). Estas técnicas plantean el diseño de una estructura como un problema de optimización combinatoria que se resuelve mediante la aplicación de algoritmos metaheurísticos. Así, consiguen obtener diseños no tradicionales que, además de cumplir los requisitos estructurales, consiguen minimizar una determinada función objetivo (Ansah *et al.*, 2022; Molina-Moreno *et al.*, 2017).

La optimización de estructuras de hormigón armado tales como tableros pretensados (Jaouadi *et al.*, 2020; Martí *et al.*, 2013; Pons *et al.*, 2018) y las pilas (Kripka *et al.*, 2013; Martínez-Martín *et al.*, 2012) de diferentes tipologías de puentes, así como muros contrafuerte (Yepes *et al.*, 2008; Temur, 2021), ha demostrado obtener resultados especialmente interesantes. Mediante la aplicación de algoritmos que basan su funcionamiento en la búsqueda por descenso se consiguen reducciones considerables en los costes finales de la estructura, algo que conlleva un mejor uso de los materiales. Por otra parte, los algoritmos basados en poblaciones presentan una serie de características que pueden resultar interesantes para este tipo de problemas (Kaveh *et al.*, 2022; Kripka *et al.*, 2019). La hibridación de ambas técnicas permite mantener buenas características de los algoritmos de búsqueda por entornos además de considerar la variabilidad intrínseca propia de los algoritmos basados en poblaciones (Gang *et al.*, 2010; Pérez-López *et al.*, 2015).

En este contexto, el presente estudio lleva a cabo la optimización económica de un MAPHA mediante un algoritmo híbrido de recocido simulado con operador de mutación. La economía es el motor de la industria del prefabricado, además, el coste final de una estructura es un indicador directo del uso de materiales en su construcción. Minimizar el coste final conforma pues, una vía de mejora especialmente interesante. Este objetivo se consigue mediante el desarrollo de software propio que

permite el cálculo estructural, verificación de los estados límite último (ELU) y de servicio (ELS), así como la posterior optimización mediante la aplicación de la metaheurística híbrida de recocido simulado con operador de mutación. La calibración de los diversos parámetros que definen la metaheurística híbrida se lleva a cabo mediante un diseño de experimentos factorial. La aplicación de dicha técnica en la resolución de optimización combinatoria planteado permite la obtención de diseños con costes muy restringidos que hacen un uso óptimo de los materiales.

2. PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

El estudio plantea la generación de diseños de MAPHA como un problema de optimización combinatoria en el que el coste final de la estructura es la función objetivo. Su valor se calcula mediante la ecuación 1, donde c_i es el coste unitario de cada uno de los materiales, y m_i es la cantidad que se utiliza de dicho material. Los costes unitarios, contenidos en la tabla 1, se obtuvieron de la base de datos del BEDEC de la Fundación Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITeC, 2022). Los diseños obtenidos están sujetos al cumplimiento de una serie de restricciones responsables de asegurar que el modelo de cálculo represente la realidad de forma adecuada, así como de que el diseño cumpla los requerimientos estipulados en la normativa vigente (CEN, 2009, 2013; MFOM, 2009, 2011). Dichas restricciones son expresadas de forma genérica mediante la ecuación 2.

$$C(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot m_i(\vec{x}) \quad [1]$$

$$R(\vec{x}) \leq 0 \quad [2]$$

Tabla 1. Unidades y costes unitarios de los materiales considerados en el estudio (ITeC).

Material	Unidad	Coste unitario (€/ud.)
Hormigón HA-25	m ³	88,86
Hormigón HA-30	m ³	97,80
Hormigón HA-35	m ³	101,83
Hormigón HA-40	m ³	104,83
Acero B 400 S	kg	1,40
Acero B 500 S	kg	1,42

Además de la función objetivo y las restricciones impuestas, un problema de optimización combinatoria ha de contar con parámetros y variables. El conjunto de información correspondiente a estos dos componentes del problema ha de permitir la completa definición del marco diseñado. Los parámetros son información conocida cuya magnitud permanece constante durante el proceso de optimización. Pueden ser referentes a ciertas características geométricas de la estructura, a las acciones actuantes, o cualquier otro tipo de información necesaria durante el proceso de cálculo y verificación estructural. Por otra parte, las variables son aquellos valores cuya magnitud es objeto de optimización mediante la aplicación del algoritmo híbrido de recocido simulado.

Los MAPHA cuentan con una serie de características geométricas especialmente influyentes en su diseño. La primera de ellas es la luz salvada (L). Considerando su aplicación como solución al cruce de caminos, el estudio considera que el marco salva una luz de diez metros. Otro factor determinante es la altura libre del marco (H), parámetro cuya magnitud queda fijada en cinco metros de altura. Además, la naturaleza modular de los MAPHA da lugar a que la altura de la unión de ambas piezas (HR) sea un parámetro a fijar. El estudio considera que la unión se sitúa a 3/5 de la altura de los hastiales, algo

equivalente a tres metros de altura desde la losa inferior. Finalmente, la profundidad de enterramiento (PE) del marco se establece en un metro y medio.

Además de los parámetros geométricos es necesario establecer las características del terreno de relleno, y una serie de valores necesarios para determinar las acciones actuantes. También se establece un ambiente y nivel de control determinados, algo que permite determinar el recubrimiento nominal de las armaduras pasivas. El conjunto de parámetros considerados, junto con los valores que estos adoptan en el proceso de optimización, pueden consultarse en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros considerados para la optimización económica.

Descripción	Parámetro	Valor
Altura libre (m)	H	5
Luz salvada (m)	L	10
Altura de la unión articulada (m)	HR	3
Profundidad de enterramiento (m)	PE	1,5
Peso específico del hormigón armado (kN/m^3)	γ_{HA}	25
Peso específico de la tierra de relleno (kN/m^3)	γ_{TR}	20
Ángulo de rozamiento del relleno ($^\circ$)	α	30
Sobrecarga uniforme IAP (kN/m^2)	SU_{IAP}	10
Carro pesado IAP (kN/m^2)	CP_{IAP}	150
Coeficiente de minoración de resistencia del hormigón	γ_C	1,5
Coeficiente de minoración de resistencia del acero	γ_A	1,15
Nivel de control de ejecución	NCE	Normal
Clase de exposición	CE	XC2

Dando paso al último componente del problema de optimización combinatoria planteado, las variables han de permitir, en conjunto con los parámetros descritos anteriormente, la completa definición del diseño. El estudio considera un total de 38 variables referentes a características geométricas, al grado de los materiales, así como al diseño de la armadura pasiva.

Es importante destacar que las magnitudes a tener en cuenta, correspondientes a algunas de las variables consideradas, son de carácter continuo en la realidad. Con el objetivo de poder representar de forma adecuada estos valores, y poder adecuarlo al problema de optimización propuesto, que trata con variables discretas, es necesario discretizar el problema.

Tres de estas variables definen el canto de la losa superior (h_{LS}), de la losa inferior (h_{LI}) y de los hastiales (h_H). Además, dos variables definen el grado del hormigón y las armaduras pasivas. Las 33 variables restantes definen el diseño de la armadura pasiva, determinando el diámetro y número de barras de las armaduras longitudinales, así como el diámetro y separación entre ramas de la armadura de cortante.

En este contexto, las variables referentes al canto de las losas y hastiales pueden tomar valores cada dos centímetros dentro del rango estipulado. Por otra parte, las variables referentes a la separación entre armaduras de cortante pueden tomar valores cada cinco centímetros. Finalmente, las variables asociadas a las longitudes de las armaduras de refuerzo de esquinas, de flexión y de disposición de cortante, toman valores cada dos centímetros. Esta consideración permite aplicar la metaheurística híbrida considerada de forma adecuada, manteniendo la representatividad del problema de diseño real.

El conjunto de variables consideradas es representado en la figura 1, la denominación y el rango de valores que pueden adoptar durante el proceso de queda contenido en la tabla 3.

Tabla 3. Variables de diseño junto con el rango de valores que pueden adoptar.

Descripción		Variable	Rango de valores
Canto losa inferior	(m)	h_{LI}	0,3 a 1,2
Canto losa superior	(m)	h_{LS}	0,4 a 1,2
Canto hastiales	(m)	h_H	0,3 a 1,2
Tipo de hormigón	(MPa)	C	25 a 40
Tipo de acero	(MPa)	A	400 a 500
Armadura longitudinal AL1	(mm)	Φ_{AL1}	10 a 32
	(barras)	n_{AL1}	4 a 12
Armadura longitudinal AL2	(mm)	Φ_{AL2}	10 a 32
	(barras)	n_{AL2}	4 a 12
Armadura longitudinal AL3	(mm)	Φ_{AL3}	10 a 32
	(barras)	n_{AL3}	4 a 12
Armadura longitudinal AL4	(mm)	Φ_{AL4}	10 a 32
	(barras)	n_{AL4}	4 a 12
Armadura longitudinal AL5	(mm)	Φ_{AL5}	10 a 32
	(barras)	n_{AL5}	4 a 12
Armadura de refuerzo AL6	(mm)	Φ_{AL6}	10 a 32
	(barras)	n_{AL6}	4 a 12
Armadura longitudinal AL7	(mm)	Φ_{AL7}	10 a 32
	(barras)	n_{AL7}	4 a 12
Armadura longitudinal AL8	(mm)	Φ_{AL8}	10 a 32
	(barras)	n_{AL8}	4 a 12
Armadura de refuerzo de flexión ARF1	(mm)	Φ_{ARF1}	10 a 32
	(barras)	n_{ALRF1}	4 a 12
Armadura de refuerzo en esquina ARE1	(mm)	Φ_{ARE1}	10 a 32
	(barras)	n_{ARE1}	4 a 12
Armadura de refuerzo en esquina ARE2	(mm)	Φ_{ARE2}	10 a 32
	(barras)	n_{ARE2}	4 a 12
Armadura de cortante AC1	(m)	S_{AC1}	0,1 a 0,4
	(mm)	Φ_{AC1}	8 a 32
Armadura de cortante AC2	(m)	S_{AC2}	0,1 a 0,4
	(mm)	Φ_{AC2}	8 a 32

Además, ciertas variables determinan las longitudes de las armaduras de refuerzo de las esquinas, la longitud de la armadura de refuerzo de flexión negativa dispuesta en la losa superior, y el tramo en el que se dispone armadura de cortante. Estas se presentan en la tabla 4.

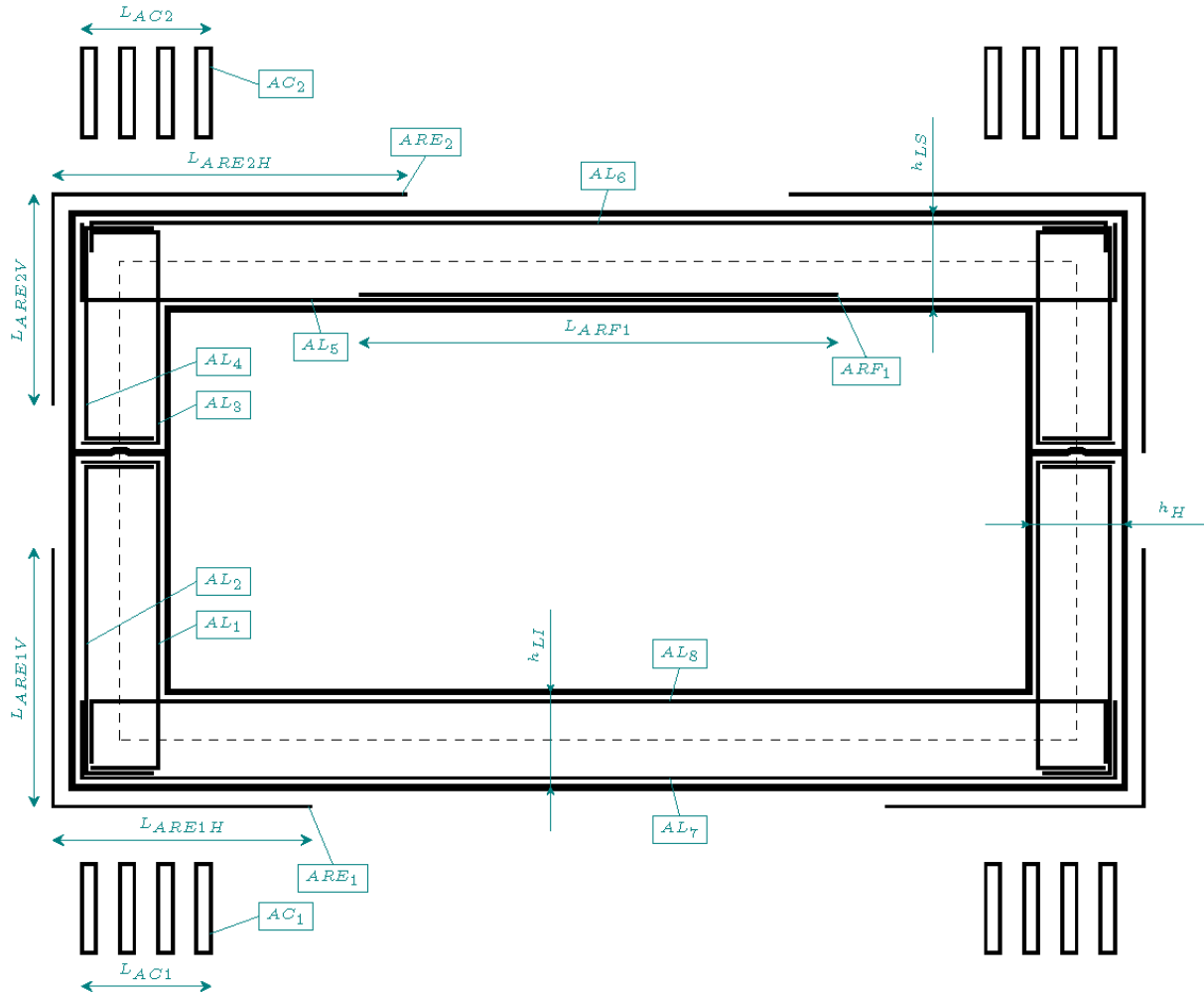


Figura 1. Variables de diseño consideradas en la optimización económica.

Tabla 4. Variables de diseño de armado.

Descripción		Variable	Rango de valores
Longitud armadura LRF1	(m)	L_{LRF1}	3 a 10
Longitud dirección horizontal armadura ARE1	(m)	L_{ARE1H}	1,5 a 5
Longitud dirección vertical armadura ARE 1	(m)	L_{ARE1V}	1 a 2
Longitud dirección horizontal armadura ARE2	(m)	L_{ARE2H}	1,5 a 5
Longitud dirección vertical armadura ARE2	(m)	L_{ARE2V}	1 a 3
Longitud de disposición armadura AC1	(m)	D_{AC1}	1 a 5
Longitud de disposición armadura AC2	(m)	D_{AC2}	1,5 a 5

3. METODOLOGÍA

La resolución de la optimización del coste final del MAPHA se llevó a cabo mediante la aplicación de la metaheurística híbrida de recocido simulado con operador de mutación. El funcionamiento de esta

es determinado por una serie de parámetros que fueron calibrados mediante un diseño de experimentos factorial. Este apartado se centra en describir el funcionamiento de la técnica aplicada, así como el diseño de experimentos llevado a cabo para la calibración del algoritmo híbrido.

3.1. Algoritmo de recocido simulado híbrido

El recocido simulado con operador de mutación basa su funcionamiento en la metaheurística propuesta inicialmente para el diseño de circuitos eléctricos (Kirkpatrick *et al.*, 1983). El algoritmo compara las diferentes soluciones del problema de optimización con los estados de cristalización que los materiales adoptan durante el proceso térmico de recocido. Consecuentemente, el valor de la función objetivo se compara con la energía interna asociada a cada uno de los estados. La evolución del algoritmo está gobernada por la temperatura (T) que, funcionando como parámetro de control del proceso, se reduce lentamente de forma geométrica a razón de un coeficiente de enfriamiento (k).

Partiendo de una solución inicial S_0 generada de forma aleatoria, el recocido simulado híbrido genera nuevas soluciones S_i mediante la aplicación de un movimiento y del operador de mutación. El coste final de estas es evaluado y comparado con el de la solución actual. En caso de que la nueva solución presente un coste final $f(S_i)$ inferior al de la solución actual $f(S_0)$, esta es aceptada de forma directa. Además, el algoritmo cuenta con la capacidad de aceptar soluciones que empeoran la actual en cierta medida mediante comparación directa de la expresión de Glauber (1963), expresada mediante la ecuación 3, con un valor aleatorio entre 0 y 1. Este proceso se lleva a cabo a una temperatura constante durante un número de iteraciones determinado que se denomina cadena de Markov. El valor inicial de la temperatura es fijado mediante el método propuesto por Medina (2001).

$$P = \frac{1}{1 + e^{\frac{\Delta E}{T}}} \quad [3]$$

El valor de la función de Glauber determina la probabilidad de aceptación de soluciones que empeoran la actual en función del grado de empeoramiento (ΔE), cuantificado mediante la diferencia entre costes, y la temperatura del proceso en ese momento. La naturaleza de la expresión hace ver que, conforme avanza el proceso, la probabilidad de aceptar soluciones que empeoran la actual se reduce considerablemente. Esto permite diferenciar tres fases dentro del proceso de resolución, el proceso de establecimiento de temperatura, seguido de una fase inicial de exploración en la que el algoritmo recorre el espacio de soluciones en busca de óptimos interesantes. Y una tercera fase de intensificación en la que el algoritmo estudia el óptimo de buena calidad que ha considerado más interesante. Ambas fases pueden verse de forma clara en la figura 2, donde se muestra la evolución del coste final del MAPHA y la temperatura en función del número de iteraciones para una de las ejecuciones.

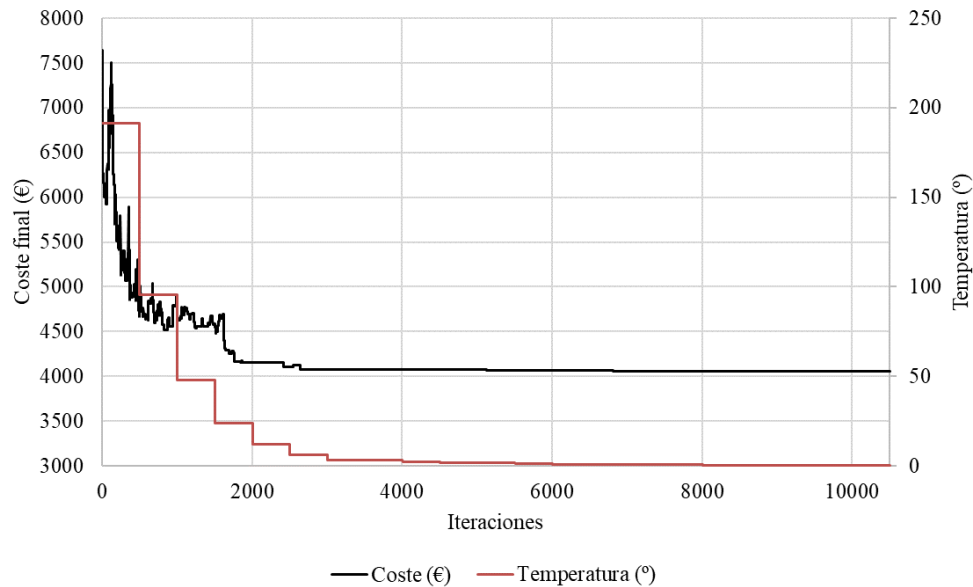


Figura 2. Evolución del coste final y temperatura del algoritmo de recocido simulado híbrido.

La hibridación mediante el operador de mutación proporciona variabilidad en el proceso de generación de nuevas soluciones, mejorando la capacidad exploratoria de la metaheurística (Soke y Bingul, 2006). El proceso termina cuando se cumple un criterio de terminación determinado, o cuando la temperatura alcanza un pequeño porcentaje de la temperatura inicial.

3.2. Calibración del algoritmo

El funcionamiento del algoritmo de recocido simulado híbrido es función de un total de cinco parámetros. La calidad de los resultados obtenidos mediante su aplicación está directamente relacionada con la correcta elección de su magnitud. En este contexto, se desarrolló un estudio de experimentos factorial fraccionado en el que se evalúa la influencia de los distintos parámetros, así como la combinación que da lugar a un mejor rendimiento (Jayasinghe *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022).

El primero de los parámetros se corresponde con la longitud de cadena de Markov (*LCM*), es decir, el número de iteraciones que permanecen a una temperatura constante. Al finalizar la cadena, la temperatura se reduce a razón del segundo de los parámetros de la metaheurística híbrida, denominado coeficiente de enfriamiento (*k*). El operador de mutación mediante el que se hibrida el algoritmo queda definido por dos parámetros, la desviación estándar (*DE*) y el número de variables a las que afecta (*NV*). Finalmente, el proceso ha de contar con un parámetro asociado al criterio de parada (*CP*), equivalente a un número de cadenas de Markov en las que la nueva solución no consigue mejorar la actual. Además, se establece el criterio de terminación del proceso cuando la temperatura alcanza el cinco por ciento de la temperatura inicial.

Considerando los cinco parámetros descritos, se llevó a cabo un estudio de experimentos factorial fraccionado 2^{k-1} . Los ensayos realizados valoran las distintas combinaciones de cada uno de los niveles de los factores, algo que permite evaluar la respuesta del algoritmo cuando varía el nivel del factor (Montgomery, 2002). Los niveles asignados a cada uno de los parámetros de la metaheurística híbrida pueden consultarse en la tabla 5.

Tabla 5. Niveles de cada uno de los factores del diseño de experimentos.

Parámetro	Factor	Nivel	
		-	+

Longitud cadena de Markov	LCM	500	1.000
Coeficiente de enfriamiento	CE	0,8	0,9
Criterio de parada	CP	1	5
Número de variables	NV	1	5
Desviación estándar	DS	0,1	0,3

La tabla 6, muestra el diseño de experimentos, junto con el valor medio del coste y el coste computacional asociado a la obtención de cada uno de los diseños óptimos. Se puede observar que el coste mínimo se obtiene mediante la configuración número catorce. Este cuenta con una *LCM* de 1000 iteraciones, *CE* de 0,90, *CP* de 1 cadena, y un operador de mutación que afecta a cinco variables (*NV*) caracterizado por una *DE* de 0,1.

Sin embargo, el rendimiento de la metaheurística híbrida no puede evaluarse únicamente mediante el valor medio del coste final. También es necesario considerar el coste computacional asociado a la obtención de dichas soluciones.

Tabla 6. Resultados del diseño de experimentos factorial fraccionado.

	LCM	DS	NV	CE	CP	Coste (€)	Iteraciones	% Min (€)	% Min (Iter.)
1	-	-	-	-	+	4.901,39	10.469	0,3291	0,3506
2	+	-	-	-	-	4.006,37	19.605	0,0864	0,6566
3	-	+	-	-	-	3.934,28	10.425	0,0668	0,3491
4	+	+	-	-	+	4.040,64	21.967	0,0957	0,7357
5	-	-	+	-	-	3.934,27	7.754	0,0668	0,2597
6	+	-	+	-	+	3.921,62	17.895	0,0634	0,5993
7	-	+	+	-	+	3.705,26	6.350	0,0047	0,2127
8	+	+	+	-	-	4.431,17	19.517	0,2016	0,6536
9	-	-	-	+	-	4.006,37	17.998	0,0864	0,6027
10	+	-	-	+	+	3.695,61	36.901	0,0021	1,2358
11	-	+	-	+	+	5.859,99	18.799	0,5890	0,6296
12	+	+	-	+	-	4.408,33	35.907	0,1954	1,2025
13	-	-	+	+	+	3.689,62	14.554	0,0005	0,4874
14	+	-	+	+	-	3.687,79	29.860	0,0000	1,0000
15	-	+	+	+	-	3.817,06	15.737	0,0351	0,5270
16	+	+	+	+	+	3.985,73	28.681	0,0808	0,9605
Coste mínimo (€)						3.687,79			

En este contexto, la séptima configuración logra obtener un coste final que, con ligero incremento respecto al mínimo, tiene un coste computacional asociado 4,7 veces inferior. De esta forma, en vista de las buenas características de la séptima configuración, se aplica un recocido simulado híbrido con

una *LCM* de 500 iteraciones, un *CE* de 0,8, un *CP* de 5 cadenas sin mejora y un operador de mutación caracterizado por una *DE* de 0,3 y *NV* equivalente a 1.

Es relevante destacar que los resultados del diseño de experimentos factorial fraccionado demuestran que los cinco parámetros, así como determinadas correlaciones entre ellos influyen de forma determinante en el coste final obtenido en la optimización.

4. RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA

Este apartado se centra en presentar y discutir los resultados obtenidos en la optimización del coste final del MAPHA. Con el objetivo de que los resultados sean representativos estadísticamente se llevaron a cabo veinte reinicios del recocido simulado híbrido. La evolución del coste mínimo, así como el coste computacional asociado al diseño obtenido en cada uno de ellos queda representada en la figura 3. Estos valores, en conjunto con el coste computacional asociado, así como la desviación respecto del valor mínimo, quedan contenidos en la tabla 7.

El coste mínimo se obtiene en el quinto reinicio, donde el MAPHA tiene un coste final de 3.650,13 euros. El rendimiento del recocido simulado híbrido fue adecuado a la hora de obtener resultados con presupuestos restringidos, consiguiendo costes finales inferiores a los que presentaría un marco tradicional ejecutado in situ (Perea *et al.*, 2010).

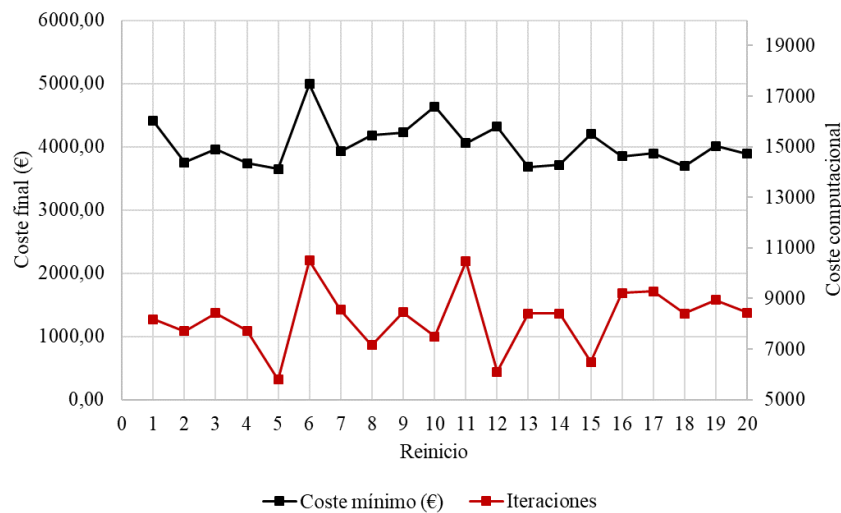


Figura 3. Evolución del coste final mínimo y el coste computacional asociado para cada uno de los veinte reinicios.

Tabla 7. Resultados obtenidos en los veinte reinicios del algoritmo de recocido simulado híbrido.

Reinicio	Coste (€)	Iteraciones	% Min (€)	% Min (Iter.)
1	4.408,38	8.179	0,2077	0,4109
2	3.752,28	7.703	0,0280	0,3288
3	3.959,54	8.424	0,0848	0,4532
4	3.740,44	7.731	0,0247	0,3336
5	3.650,13	5.797	0,0000	0,0000
6	4.992,39	10.506	0,3677	0,8123
7	3.926,76	8.554	0,0758	0,4756
8	4.181,66	7.150	0,1456	0,2334

9	4.225,32	8.458	0,1576	0,4590
10	4.637,70	7.495	0,2706	0,2929
11	4.057,37	10.460	0,1116	0,8044
12	4.319,87	6.094	0,1835	0,0512
13	3.682,73	8.407	0,0089	0,4502
14	3.713,67	8.404	0,0174	0,4497
15	4.197,53	6.485	0,1500	0,1187
16	3.849,91	9.210	0,0547	0,5888
17	3.896,73	9.281	0,0676	0,6010
18	3.693,33	8.406	0,0118	0,4501
19	4.012,22	8.937	0,0992	0,5417
20	3.890,25	8.446	0,0658	0,4570
Coste mínimo (€)				3.650,13
Coste medio (€)				4.039,41
Desviación típica (%)				0,09606

Las características del diseño óptimo del pueden consultarse en la tabla 8. Dicho MAPHA hace uso de un total de 18,03 m³ de hormigón con una resistencia característica de 25 MPa. Por otra parte, su armadura pasiva está compuesta por un total de 1.442,07 kg de acero tipo B 500 S. En general los MAPHA obtenidos mediante la aplicación del recocido simulado híbrido presentan cantos reducidos. Los diseños tradicionales hacen uso de cantos entre 1/10 y 1/15 de la luz salvada en el caso de las losas, y entre 1/12 y el canto de las losas para los hastiales. En el caso del diseño óptimo esta relación es inferior tanto en la losa inferior como en los muros laterales, con relaciones de 0,048 y 0,046, respectivamente. Esta reducción en el canto de la sección se solventa mediante un diseño de armado especialmente denso que llega a alcanzar los 79,97 kg/m³ en el diseño óptimo.

Tabla 8. Principales características del marco óptimo.

Descripción	Variable	Valor
Canto losa inferior	(m) h_{LI}	0,48
Canto losa superior	(m) h_{LS}	0,84
Canto hastiales	(m) h_H	0,46
Tipo de hormigón	(MPa) C	25
Tipo de acero	(MPa) A	500
Armadura longitudinal AL1	(cm ²) A_{AL1}	15,71
Armadura longitudinal AL2	(cm ²) A_{AL2}	6,79
Armadura longitudinal AL3	(cm ²) A_{AL3}	12,44
Armadura longitudinal AL4	(cm ²) A_{AL4}	9,42
Armadura longitudinal AL5	(cm ²) A_{AL5}	15,71
Armadura de refuerzo AL6	(cm ²) A_{AL6}	4,52

Armadura longitudinal AL7	(cm ²)	A_{AL7}	15,71
Armadura longitudinal AL8	(cm ²)	A_{AL8}	4,71
Armadura de refuerzo de flexión ARF1	(cm ²)	A_{ARF1}	40,21
Armadura de refuerzo en esquina ARE1	(cm ²)	A_{ARE1}	5,50
Armadura de refuerzo en esquina ARE2	(cm ²)	A_{ARE2}	11,31
Armadura de cortante AC1	(m)	S_{AC1}	0,30
	(mm)	Φ_{AC1}	12
Armadura de cortante AC2	(m)	S_{AC2}	0,15
	(mm)	Φ_{AC2}	20
Longitud armadura LRF1	(m)	L_{LRF1}	6,42
Longitud dirección horizontal armadura ARE1	(m)	L_{ARE1H}	4,26
Longitud dirección vertical armadura ARE 1	(m)	L_{ARE1V}	2,30
Longitud dirección horizontal armadura ARE2	(m)	L_{ARE2H}	4,06
Longitud dirección vertical armadura ARE2	(m)	L_{ARE2V}	1,10
Longitud de disposición armadura AC1	(m)	D_{AC1}	1,38
Longitud de disposición armadura AC2	(m)	D_{AC2}	3,47

Los diseños obtenidos presentan refuerzos de flexión negativa en la losa superior con una longitud efectiva media de 6,95 metros. Por otra parte, es especialmente interesante destacar que, en ciertos casos, el conjunto de refuerzos de flexión en las esquinas presenta incrementos localizados. Estos permiten una menor disposición de armadura de cortante respecto a un diseño tradicional ejecutado in situ, reduciendo en cierta medida el coste final de la estructura.

5. CONCLUSIONES

El estudio lleva a cabo la optimización económica de un marco articulado prefabricado de hormigón armado. Mediante la aplicación de una metaheurística híbrida de recocido simulado con operador de mutación se consiguen diseños con presupuestos muy reducidos. En vista de los resultados presentados los autores derivan las siguientes conclusiones.

La aplicación de metaheurísticas híbridas conforma una vía de mejora en el proceso de diseño de MAPHA. Manteniendo unos costes computacionales razonables permiten la obtención de diseños que hacen un uso óptimo de los materiales. Es especialmente relevante calibrar de forma adecuada los parámetros que definen estas técnicas ya que la calidad de los resultados obtenidos está directamente relacionada con su configuración. En este contexto, el recocido simulado híbrido con la configuración aplicada consigue los mejores resultados cuando se considera el coste final y el coste computacional asociado.

La hibridación de metaheurísticas basadas en búsqueda secuencial por entornos como el recocido simulado mediante operadores de mutación da lugar a técnicas con una muy buena capacidad de exploración. Esta característica hace que sean especialmente interesantes para su aplicación en la resolución de problemas de optimización combinatoria con características similares al presentado en el estudio.

Los marcos óptimos obtenidos en el estudio presentan secciones esbeltas de canto reducido en comparación con diseños tradicionales. Esta reducción del canto útil de la sección se solventa mediante diseños de armado muy denso cercano a los 80 kg/m^3 en el diseño óptimo. Además, una parte de los diseños obtenidos presentan reducciones en las armaduras de cortante que son sustituidas mediante aumentos localizados en la armadura longitudinal de flexión.

En general la mejora del proceso de diseño mediante metaheurísticas híbridas da lugar a diseños interesantes que permiten a los técnicos responsables valorar diseños con características menos comunes. Esto evita la predisposición intrínseca al proceso de diseño tradicional de crear estructuras altamente condicionadas por diseños existentes. Además, la capacidad de minimizar una determinada función objetivo permite hacer un uso óptimo de los materiales, algo especialmente interesante desde el punto de vista económico y ambiental.

Finalmente, es especialmente relevante considerar la naturaleza prefabricada de la tipología estructural considerada en el estudio. La reducción del coste final, y por lo tanto del uso de materiales, en una estructura ejecutada in situ es algo positivo. Sin embargo, es viable afirmar que estas reducciones serán considerablemente mayores en estructuras que siguen procesos de fabricación en serie. En este contexto, conseguir hacer un mejor uso de los materiales en los marcos articulados prefabricados y, consecuentemente, reducir los impactos ambientales, sociales y coste económico asociado, conforma una línea de investigación de especial interés.

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

ANSAH, M. K.; CHEN, X.; YANG H. X. A holistic environmental and economic design optimization of low carbon buildings considering climate change and cofounding factors. *Science of the Total Environment*, v. 821 de enero 2022.

BOSCARDIN, J. T.; YEPES, V.; KRIPKA, M. Optimization of reinforced concrete building frames with automated grouping of columns. *Automation in Construction*, v. 104, pág. 331-340 de agosto 2019.

CARBONELL, A.; GONZÁLEZ-VIDOSA, F.; YEPES, V. Design of reinforced concrete road vaults by heuristic optimization. *Advances in Engineering Software*, v. 42, núm. 4. pág. 151–159 de abril 2011.

COHN, M. Z.; DINOVTZER, A. S. Application of structural optimization. *Journal of Structural Engineering*, v. 120, núm. 2, pág. 617–650 de febrero 1994.

COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN (CEN) Eurocódigo 2: Diseño de estructuras de hormigón. Bruselas, Bélgica, 2013.

COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN (CEN). Eurocódigo 1: Acciones en estructuras, Bruselas, Bélgica, 2009.

DEDE, T.; KRIPKA, M.; TOGAN, V.; YEPES, V.; RAO, R.V. Advanced optimization techniques and their applications in civil engineering. *Advances in Civil Engineering*, v. 2018 de mayo 2018.

GANG, L.; HAIYAN, L; XIANG, L. A hybrid simulated annealing and optimality criteria method for optimum design of RC buildings. *Structural Engineering and Mechanics*, v. 35, núm. 1, pág. 19-35 de mayo 2010.

- GLAUBER R. J. Time-dependent statistics of the Ising model. *Journal of Mathematical Physics*, v. 4, núm. 294 de diciembre 1963.
- INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN DE CATALUÑA (ITeC). Banco Estructurado de Datos de Elementos Constructivos (BEDEC). Disponible en: <<https://metabase.itec.cat/vid/e/es/bedec>> Acceso: 10 sep. 2022.
- JAYASINGHE, A.; ORR, J.; IBELL, T.; BOSHOF, W. P. Minimising embodied carbon in reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, v. 232 de mayo 2021.
- KAVEH, A.; MOTTAGHI, L.; IZADIFARD, R. A. Optimal design of a non-prismatic reinforced concrete box girder bridge with three meta-heuristic algorithms. *Scientia Iranica*, v. 29, núm. 3, pág. 1154-1167 de enero 2022.
- KRIPKA, M.; OLIVEIRA NETO, L.; KRIPKA, R. M. L. Determinação do posicionamento ótimo de apoios em pontes. *Ciência & engenharia*, v. 22, núm. 2, pág. 29-36 de julio 2013.
- KRIPKA, M.; YEPES, V.; MILANI, C. J. Selection of sustainable short-span bridge design in Brazil. *Sustainability* v. 11, núm. 5, pág. 1307 de marzo 2019.
- LI, L.; LUAN, H. Y.; YIN, X. F.; DOU, Y. D.; YUAN, M. Q.; LI, Z. F. Understanding Sustainability in Off-Site Construction Management: State of the Art and Future Directions. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 148, núm. 11, pág de noviembre 2022.
- MARTÍ, J.V.; GONZÁLEZ-VIDOSA, F.; YEPES, V.; ALCALÁ, J. Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing. *Engineering Structures*, v. 48, pág. 342-352 de marzo 2013.
- MARTÍNEZ-MARTÍN, F. J.; GONZÁLEZ-VIDOSA, F.; HOSPITALER, A.; YEPES, V. Multi-objective optimization design of bridge piers with hybrid heuristic algorithms. *Journal of Zhejiang 35 University-Science A*, v. 13, núm. 6, pág. 420-432 de mayo 2012.
- MARTÍNEZ-MUÑOZ, D.; GARCÍA, J.; MARTÍ, J.V.; YEPES, V. Discrete swarm intelligence optimization algorithms applied to steel-concrete composite bridges. *Engineering Structures*, v. 266 de septiembre 2022a.
- MARTÍNEZ-MUÑOZ, D.; GARCÍA, J.; MARTÍ, J.V.; YEPES, V. Optimal design of steel-concrete composite bridge based on a transfer function discrete swarm intelligence algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 65 de octubre 2022b.
- MEDINA, J. Estimation of Incident and Reflected Waves Using Simulated Annealing. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering-ASCE*, v. 127, núm. 4 de agosto 2001.
- MILANI, C.J.; YEPES, V.; KRIPKA, M. Proposal of sustainability indicators for the design of small-span bridges. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, núm. 12, pág. 4488 de junio 2020.
- MINISTERIO DE FOMENTO (MFOM). Guía de cimentaciones en obra de carretera, Madrid, España, 2009.
- MINISTERIO DE FOMENTO (MFOM). IAP-11: Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera. Madrid, España, 2011.

- MOLINA-MORENO, F.; GARCÍA-SEGURA, T.; MARTÍ, J.V.; YEPES, V. Optimization of Buttressed Earth-Retaining Walls using Hybrid Harmony Search Algorithms. *Engineering Structures*, v. 134, pág. 205-216 de marzo 2017.
- MONTGOMERY, D. C. Diseño y análisis de experimentos, 2ª ed. México: Limusa-Wiley, 2002. 545 p.
- PENADÉS-PLÀ, V.; YEPES, V.; KRIPKA, M.. Optimización de puentes pretensados mediante la metodología de la superficie de respuesta. *CIATEC-UPF*, v. 11, núm. 2, pág. 22-35 de junio 2019.
- PEREA, C.; YEPES, V.; ALCALÁ, J.; HOSPITALER, A.; GONZÁLEZ-VIDOSA, F. A parametric study of optimum road frame bridges by threshold acceptance. *Indian Journal of Engineering Material Sciences*, v. 17, núm. 6, pág. 427–437 de diciembre 2010.
- PÉREZ-LÓPEZ, E.; GARCÍA-SEGURA, T.; YEPES, V.; ALCALÁ, J. Hybrid harmony search for sustainable design of post-tensioned concrete box-grider pedestrian bridges. *Engineering Structures*, v. 92, pág. 112–122 de junio 2015.
- PONS, J.; PENADÉS-PLÀ, V.; YEPES, V.; MARTÍ, J. V. Life cycle assessment of earth-retaining walls: An environmental comparison. *Journal of Cleaner Production*, v. 192, pág. 411-420 de agosto 2018.
- RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, v. 42, núm. 10, pág. 1592–1600 de octubre 2010.
- SOKE, A.; BINGUL, Z. Hybrid genetic algorithm and simulated annealing for two-dimensional non-guillotine rectangular packing problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 19, núm. 5, pág. 557–567 de agosto 2006.
- TEMUR, R. Optimum design of cantilever retaining walls under seismic loads using a hybrid TLBO algorithm. *Geomechanics and Engineering*, v. 24, núm. 3, pág. 237-251 de febrero 2021.
- WANG, J. J.; WANG, Y. F.; ZHANG, Y. R.; LIU Y. S.; SHI, C. C. Life cycle dynamic sustainability strategy optimization of fly ash RC beam based on Monte Carlo simulation. *Journal of Cleaner Production*, v. 351 de abril 2022.
- YEPES, V.; ALCALÁ, J.; PEREA, C.; GONZÁLEZ-VIDOSA, F. A Parametric Study of Optimum Earth Retaining Walls by Simulated Annealing. *Engineering Structures*, v. 30, núm. 3, pág. 821-830 de marzo 2008.
- YEPES, V.; MEDINA, J. Economic heuristic optimization for heterogeneous fleet VRPHESTW. *Journal of Transportation Engineering*, v. 132, núm. 4 de abril 2006.