

05-015

ENERGY CONSUMPTION OPTIMIZATION DESIGN OF PRECAST ROAD BRIDGES

Martí, José V.; Yepes, Víctor
Universitat Politècnica de València (ICITECH)

The traditional design of concrete structures concentrates on cost. However, other objectives, such as the consumption of energy now attract research attention. This paper focuses on the design of precast road bridges, with a double U-shaped cross-section and isostatic spans. A hybrid simulated annealing (SA) algorithm is applied to the consumption of energy and the economic cost of these structures. The precast bridge system studied consists of two simply-supported U-beams with a cast-in-situ reinforced concrete slab for road traffic. A span length of 25m and a deck width of 12m were considered. The basic costs considered and the energy consumption units were taken from the database of the ITeC. The method used in the present work is a hybrid SA algorithm with a mutation operator (SAMO). The analysis indicated that reducing costs by 1 € could save up to 4.76 Kwh in consumption of energy. Alternatively, when optimizing energy, the cost of the structure increases in 3.47 €/m². The analysis reveals that energy consumption and cost are closely related. Thus, the solutions that are acceptable in terms of energy consumption are also viable in terms of cost, and vice versa.

Keywords: *Heuristic optimization; Hybrid simulated annealing; Energy consumption; Precast beams; Structural design*

OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN EL DISEÑO CONSTRUCTIVO DE PUENTES PREFABRICADOS DE HORMIGÓN

El diseño de las estructuras de hormigón se centra principalmente en reducir su coste. Sin embargo, en los últimos años se está dando cada vez más importancia al consumo energético por una preocupación ambiental. Este artículo se centra en el diseño de los puentes isostáticos de carreteras de tableros formados por vigas artesa prefabricadas. Para la optimización del coste y el consumo energético de la estructura se aplica un algoritmo híbrido del recocido simulado (SA). El puente consta de dos vigas artesa prefabricadas de hormigón pretensado y un tablero de hormigón armado ejecutado in situ. El ejemplo tiene una luz de 25 m y un ancho de tablero de 12 m. El algoritmo utilizado es un SA híbrido con un mutador operacional (SAMO). El análisis señala que reduciendo los costes en 1 € se podría ahorrar hasta 4,76 Kwh en el consumo de energía. Por otro lado, cuando se optimiza la energía, el coste de la estructura aumenta de 3,47 €/m². El análisis revela que el consumo y el coste de energía están estrechamente relacionados. Por lo que, las soluciones que son aceptables en términos de consumo energético son también viables en términos de coste, y viceversa.

Palabras clave: *Optimización heurística; Recocido simulado híbrido; Consumo energético; Vigas pretensadas; Diseño de estructuras*

Correspondencia: José V. Martí Albiñana jvmartia@upv.es

Agradecimientos: Universitat Politècnica de València (Proyecto de Investigación SP20120341)

1. Introducción

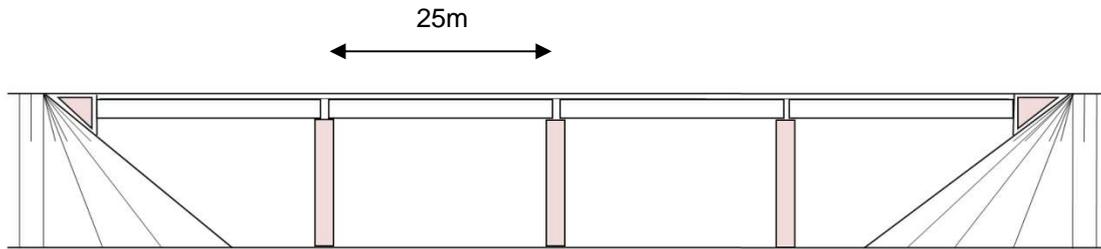
El diseño tradicional de las estructuras de hormigón se concentra principalmente en la reducción del coste económico. Sin embargo, debido a que la industria de la construcción explota una gran cantidad de recursos naturales del planeta: dos quintos de los áridos, un cuarto de la madera, el 40% de la energía total y el 16% del agua cada año (Horvath 2004), en los últimos años ha habido una tendencia a considerar también como criterio de optimización, la reducción del impacto ambiental que genera la construcción de estas estructuras. Por lo tanto, parece lógico que la reducción del consumo energético sea uno de los criterios que interese aplicar, ya que los datos relacionados con el impacto medioambiental de la fabricación de la mayor parte de los materiales de construcción han sido recopilados por distintas organizaciones como el Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (2012) y, de ahí, que se pueda calcular el impacto del consumo energético en la construcción de una estructura. Por lo que es importante incorporar criterios de diseño que permitan reducir al mínimo los consumos energéticos producidos en la construcción de estructuras de hormigón armado (HA) y pretensado (HP). En cuanto a esto, Yepes et al. (2011) y Yeo & Gabbai (2011) han conducido estudios de optimización basados en la eficiencia energética y el coste en puentes losa de HP y en una viga de HA respectivamente.

El uso de las técnicas de la optimización en el diseño de las estructuras de HA y HP está considerado como apropiado y factible puesto que el elemento estructural que se obtiene es más eficiente. Su desarrollo reciente está ligado a la evolución de la inteligencia artificial y proporciona buenas soluciones en un coste de tiempo computacional razonable. Una revisión exhaustiva de los métodos estructurales de la optimización fue realizada por Cohn y Dinovitzer (1994), que expresaron el distanciamiento existente entre los estudios teóricos y la aplicación práctica de los métodos de la optimización, y confirmaron que la mayoría de la investigación realizada hasta ese momento estaba centrada en las estructuras de acero mientras que solamente una fracción pequeña se había ocupado de las estructuras de HA. Siguiendo esta línea del trabajo, el grupo de investigación al que pertenecen los autores ha aplicado metaheurísticas a muros de contención, marcos de carreteras, pilas de puentes, puentes peatonales y pasos superiores prefabricados de hormigón pretensado (HP), bóvedas de carreteras y otros (Yepes et al. 2008; Perea et al. 2008; Paya et al. 2008; Martínez et al. 2011; Carbonell et al. 2011; Martí et al. 2010,2013).

La construcción de estructuras con piezas de hormigón prefabricado presenta claras ventajas económicas cuando éstas se fabrican en taller en grandes series. Hoy en día existen motivos adicionales basados en beneficios sociales y medioambientales que justifican la adopción de esta tecnología. Los ingenieros calculistas se han aprovechado de ello, especificando diseños que utilizan vigas estándares de longitudes relativamente cortas, valores comprendidos entre 10 y 40 metros (Fig. 1). En este contexto, la optimización de este tipo de estructuras, grandes y repetitivas, presenta gran interés en este ámbito de investigación debido al gran volumen de materiales utilizados en su proceso de fabricación.

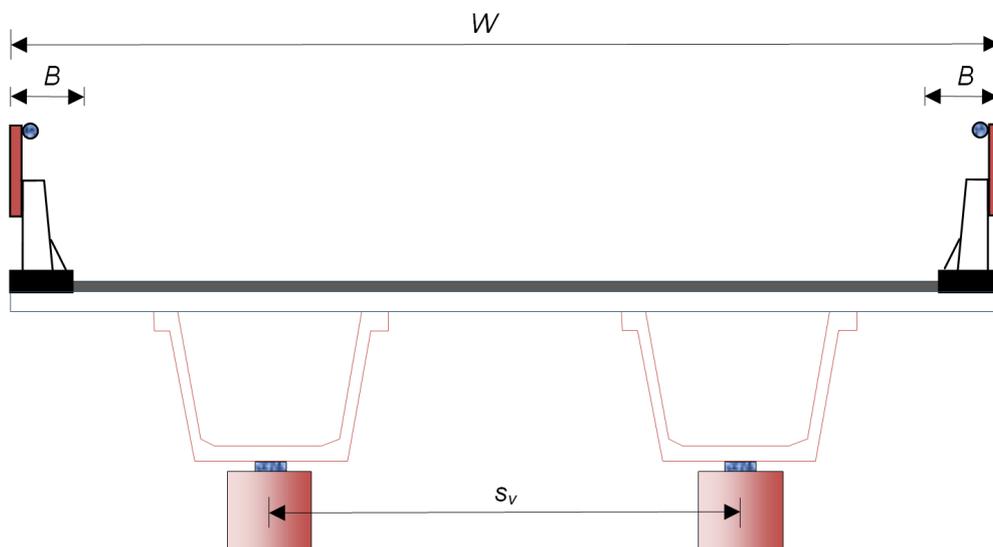
Este artículo describe una metodología para el diseño de los puentes prefabricados de carreteras de vigas artesa de HP, con la sección representativa de la doble U que integra una losa de hormigón armado en la parte superior para el tráfico de vehículos (Fig. 2). El diseño de esta estructura queda definido en la tesis doctoral de Martí (2011), con las variaciones: a) la separación entre vigas S_v (Fig.2) y la inclinación del alma de las vigas $Angl$ (Fig. 3) se convierten en variables y b) los refuerzos de la armadura transversal se unifican cada dos secciones consecutivas del modelo, reduciendo el número de variables a un total de 41.

Figura 1: Perfil longitudinal del puente



La metodología consiste en desarrollar un módulo de evaluación computacional en el cual las dimensiones de la sección transversal, los materiales y el refuerzo de acero son tomados como variables discretas. Este módulo evalúa el consumo energético en kwh y el coste en euros de una solución y comprueba todos los estados límite y de servicio relevantes. Posteriormente se ha desarrollado, una variante del algoritmo recocido simulado (SA) con un movimiento de vecindad basado en el operador de mutación de los algoritmos genéticos (SAMO), capaz de encontrar soluciones optimizadas en energía o en coste. El algoritmo se aplica a una función objetivo: la energía consumida por la estructura en diversas etapas de la producción de materiales, de la fabricación, del transporte y de la construcción, y simultáneamente obtiene el coste económico de la solución. Esta comunicación, tras realizar el planteamiento del problema y definición del algoritmo citado, presenta los resultados obtenidos, recogiendo las principales conclusiones

Figura 2: Sección transversal del puente



2. El problema del diseño óptimo

En este estudio, el problema de la optimización estructural se enmarca en una optimización mono-objetivo de la energía consumida y el cálculo del coste de la estructura. Por lo tanto, esta optimización apunta a reducir al mínimo la función objetivo f_1 o Eq.(1) y a calcular f_2 o Eq. (2) mientras que satisface las restricciones de Eq. (3).

$$E = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

$$C = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad (3)$$

Obsérvese que x_1, x_2, \dots, x_n son las variables del diseño elegidas para la formulación. El análisis incluye 41 variables del diseño (véase el Fig. 2). Las variables incluyen nueve valores geométricos: la altura de la viga (h_1), la anchura del ala inferior de la viga (b_1) y del canto del ala inferior (e_1), la anchura y el canto las alas superiores de la viga (b_3 y e_3), la inclinación de las almas (*Angl*), el ancho de las almas (e_2), el canto de la losa (e_4) y el espaciamiento entre las vigas (S_v). Con respecto a la resistencia del material, dos variables definen el tipo de hormigón de la losa y de la viga. El pretensado formado por torones de 0.6" se define por cuatro variables: primera, el número de torones en las alas superiores, segunda, el número de torones en la primeras, segunda y tercera capa del ala inferior, tercera, el número de secciones desde el exterior hacia el interior en que se modeliza la viga con fundas que envuelven los torones en la segunda capa, y cuarta, el número de secciones con fundas en la tercera capa. Finalmente, 26 variables definen los diámetros de las barras, el espaciamiento y las longitudes de los refuerzos de barras siguiendo una disposición estándar para la viga y la losa superior. El espacio de la solución es definido por el sistema de combinaciones de los valores para las 41 variables discretas. El número de combinaciones en este caso está en la orden de $5,6 \cdot 10^{47}$; tal espacio es, en la práctica, ilimitado. Los parámetros son todos los valores fijados en el problema planteado y que relacionan las acciones consideradas, valores geométricos, coeficientes parciales de seguridad y datos de la durabilidad. La Tabla 1 proporciona los detalles de los parámetros principales analizados.

La función objetivo cuantifica la cantidad total de la energía consumida resultante del uso de los materiales que incluyen (1) la extracción de materias primas, (2) el transporte de materias primas a la fábrica, (3) el proceso y fabricación de productos y maquinaria, y (4) el consumo energético de los equipos implicados en los procesos de la construcción para ejecutar las unidades de obra. Para este estudio se consideran los valores de la base de datos de los materiales de BEDEC (2012). Aunque este instituto asume una tecnología estándar para determinar los consumos energéticos de cada unidad de obra, la metodología aplicada adjunta no se basa en ninguna base de datos particular. Diversas alternativas estructurales se pueden determinar y comparar desde un punto de vista ambiental. El actual estudio analiza los puentes prefabricados con criterios sostenibles en base a una función de consumo energético, expresándose como sigue:

$$E = \sum_{i=1,r} e_i \times m_i \quad (4)$$

Considerando que e_i son las unidades de consumo energético; m_i son las mediciones de las unidades de obra (dependiendo de las geometría y armado de las variables de diseño), mientras que r es el número total de unidades de obra.

Figura 3: Variables geométricas y armaduras activa y pasiva

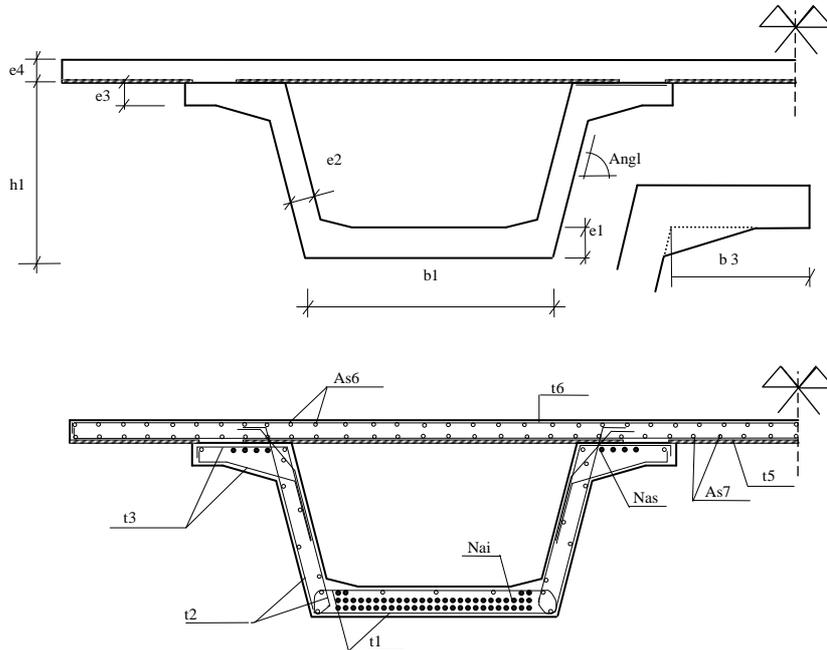


Tabla 1. Parámetros principales del problema

Parámetros	Notación y valores
Geométricos	
Ancho del tablero	$W = 12.00 \text{ m}$
Pendiente cartela ala superior (1: ns_3)	$ns_3 = 3$
División base ala superior	$s_3 = 3$
Pendiente cartela ala inferior (1: ni_3)	$ni_3 = 3$
División base ala inferior	$i_4 = 4$
Entrega de la viga	$Ent = 0.47 \text{ m}$
Esbeltez mínima viga	$Esb = (L/17)$
De carga	
Ancho de las barreras	$a_{\text{bar}} = 2 \times 0,5 \text{ m.}$
Espesor nominal del pavimento	$e_{\text{pav}} = 9 \text{ cm.}$
Carga muerta no procedente del pavimento	$Q_m = 2 \times 5.0 \text{ kN/m}$
De coste	
Distancia transporte (ida)	$d_{\text{transporte}} = 25 \text{ Km.}$
Despunte armadura activa	25%
De armado	
Tipo de acero pasivo (B-500-S)	$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$
Tipo de acero activo (Y1860-S7)	$f_{pk} = 1700 \text{ N/mm}^2$
Diámetro torones acero activo	$\Phi = 0.6''$
Fundas torones	Nivel 2 y 3
Esbeltez vertical cercos	200 (longitud / Φ)
De exposición	
Ambiente de exposición externo	IIb (EHE)

La función coste de la estructura se define en la ecuación (5), donde p_i son los precios unitarios; m_i son las mediciones de las unidades de obra, y r es el número total de unidades de obra. La función coste incluye el valor de los materiales (hormigón, pretensado, armadura pasiva, fibras de acero) y todos los elementos necesarios para evaluar el coste total del proceso constructivo del de puente. Los precios se han obtenido también de la base de datos BEDEC (2012) y figuran en la Tabla 2.

$$C = \sum_{i=1,r} p_i \times m_i \quad (5)$$

El presente problema sólo minimiza la función objetivo de las emisiones del E (4), y calcula para dicha solución la función coste (5). Las restricciones g_j en la ecuación (3) contempla todos los estados límite de servicio (ELS) y los estados límite últimos (ELU) que debe satisfacer la estructura, así como las limitaciones geométricas y de constructibilidad del problema. Este estudio sólo se limita a soluciones viables sin tomar en consideración las no factibles.

Tabla 2. Precios básicos y consumo energético

Descripción	E (kwh.)	Precio unitario (€)
Kilogramo del acero pasivo viga (B-500-S)	10,44	1,53
Kilogramo del acero pasivo losa (B-500-S)	10,47	1,18
Kilogramo del acero activo (Y-1860-S7)	12,99	2,32
m ² de molde en viga	51,99	21,21
m ² de encofrado en losa	124,67	32,00
m ³ de hormigón HA-25	412,99	94,00
m ³ de hormigón HA-30	438,84	102,72
m ³ de hormigón HA-35	464,97	109,85
m ³ de hormigón HA-40	495,11	117,27
m ³ de hormigón HP-35	477,83	138,74
m ³ de hormigón HP-40	501,72	144,96
m ³ de hormigón HP-45	514,49	155,70
m ³ de hormigón HP-50	525,50	167,46

3. Evaluación estructural del tablero

Una vez generados los datos necesarios que definen una estructura, el módulo de evaluación estructural calcula los estados tensionales y comprueba todos los estados límite y las restricciones geométricas representadas por Eq. (3). Las restricciones estructurales consideradas siguen los estándares seguidos por la Normativa Española (IAP-98 de 1998 y EHE-08 de 2008) para este tipo de estructuras, si bien cabe señalar que recientemente en España se ha modificado el tren de cargas para adaptarse al contenido de los Eurocódigos, incluyendo las comprobaciones en los ELS y ELU a flexión, cortante y torsión debido a las cargas. En primer lugar, se utiliza un modelo estructural de 20 barras para el análisis de la viga antes de ser conectada con la losa. Las tensiones y las reacciones se calculan mediante un programa que considera la matriz de rigidez de un modelo de emparrillado plano en 2-D formado por dos vigas de 20 barras y 21 secciones para cada viga, conectadas entre sí por tres barras en cada una de las 21 secciones (Manterola, 2006). El modelo completo consta de 103 barras y 84 nodos, realizándose un análisis elástico lineal que contempla las características mecánicas de todas las secciones.

Dentro de cada iteración, conocidas las deformaciones y la envolvente de las tensiones, se comprueban los ELS y los ELU conforme a la normativa española del hormigón (EHE-08). Es importante observar que una vez comprobada una sección, no se hace ninguna tentativa

en calcular refuerzos de acero acorde a las reglas tradicionales de diseño.

En el cálculo de los ELU a flexión en vigas se comprueba que la envolvente de flectores que actúa, M_d , esté dentro de los valores últimos del diagrama $N_u - M_u$ de la iteración. Además, el ELU a cortante verifica que los dos últimos valores sean mayores que el cortante concomitante. También se comprueban los valores mínimos de refuerzo a flexión, cortante y torsor. El ELS comprueba la fisuración del hormigón para las condiciones de la durabilidad. Las desviaciones se limitan a 1/1000 de la longitud libre del vano para la combinación de cargas cuasi-permanente. También se comprueba la fatiga del hormigón y del acero.

4. Algoritmo híbrido recocido simulado (SA) con operador de mutación (SAMO)

El método de búsqueda de soluciones aplicado en este trabajo es un híbrido del SA con un operador de mutación. El SA fue propuesto originalmente por Kirkpatrick *et al.* (1983) para el diseño de circuitos electrónicos. "Annealing", en castellano "recocido", es el proceso químico de calentar y enfriar un material de manera controlada. Cuando un metal se calienta por encima de su punto de fundición sus propiedades cuando se enfría dependerán, en gran medida, del proceso de enfriamiento. En el punto de fundición una gran cantidad de energía está presente en el material permitiendo que las moléculas se muevan libremente. Si se reduce la temperatura se reducirá la energía en el sistema y simultáneamente los movimientos del material. Si el metal se enfría lentamente se formarán cristales cuya disposición es la de energía mínima. Por el contrario, se enfría demasiado rápido, las moléculas pueden llegar a estados meta-estables, sin alcanzar configuraciones adecuadas. El algoritmo comienza con una solución generada aleatoriamente. Esta solución se comprueba bajo las restricciones estructurales, y si es factible se toma como una solución inicial con una alta temperatura. La solución de trabajo inicial es cambiada por un movimiento al azar pequeño de los valores de las variables. La nueva solución actual se evalúa en términos de energía consumida. Se aceptan provisionalmente soluciones de mayor energía cuando un número aleatorio entre 0 y 1 es más pequeño que la expresión de Glauber (1963) $1/(1+\exp(-\Delta E/T))$, donde ΔE es el incremento de la energía y T es la temperatura actual. A continuación se comprueba estructuralmente, y si es factible, se adopta como la nueva solución de trabajo. La temperatura inicial se reduce geoméricamente ($T=kT$) por medio de un coeficiente de enfriamiento k . En cada paso de temperatura se ejecuta un número determinado de iteraciones llamado *cadena de Markov*. El algoritmo se detiene cuando la temperatura queda reducida a un porcentaje pequeño de la temperatura inicial y, simultáneamente, no hay mejoras en un número consecutivo de *cadena de Markov*. Este método, es capaz de sobrepasar óptimos locales en temperaturas de rango alto-medio para converger gradualmente cuando la temperatura se reduce a cero. El método del SA requiere la calibración de la temperatura inicial, de la longitud de las cadenas de Markov y del coeficiente de enfriamiento.

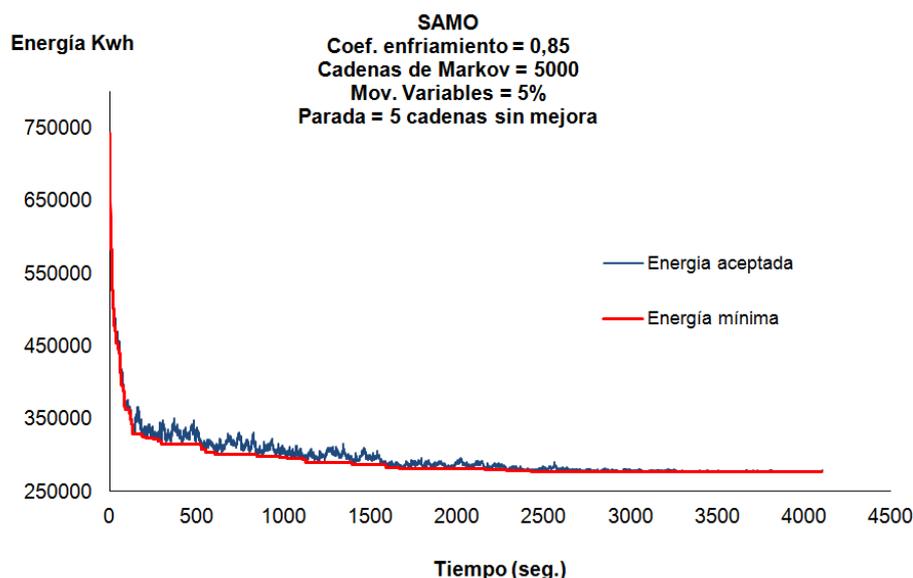
5. Análisis y discusión de los resultados

Los algoritmos y el módulo de comprobación estructural se programaron en Intel® Visual Fortran Compiler Integration for Microsoft Visual Studio 2008. Cada proceso duró una media de 70 minutos sobre un ordenador con un procesador INTEL® Core™ i7 CPU 3820 processor con 3,60 GHz. La calibración de la heurística recomendó cadenas de Markov de 5000 iteraciones, coeficiente reductor de la temperatura de 0,85, temperatura inicial ajustada al 0,3% de la energía/coste de la solución inicial; la mutación más eficiente se corresponde con un movimiento aleatorio de dos variables, correspondiente al 5% del total, y como criterio de parada el cumplimiento de una reducción mínima del 10% de la temperatura inicial y seis cadenas sin mejora. Se procesaron 9 ejecuciones, y se obtuvieron valores mínimos, medios y desviaciones de los resultados obtenidos para el consumo energético, el

coste, las variables geométricas y la armadura activa. En la Tabla 3 se muestran los valores medios, comparándolos con los valores medios obtenidos al optimizar el coste. Se hace notar que el valor medio de las variables no toma necesariamente los valores normalizados permitidos para cada variable.

La desviación de los valores medios respecto al mínimo en el caso de la optimización del coste es del 1,02% y para la energía es del 1,05%, lo que nos ratifica la robustez de la heurística. En la Tabla 4 se ofrecen los valores de las variables geométricas y materiales para la solución con menor consumo energético, en la Tabla 5 se muestran los valores medios obtenidos de las cuantías de acero y de hormigón, y en la Tabla 6 se señala la armadura pasiva en la sección de apoyo de las mejores soluciones.

Figura 4: Evolución de la heurística con el tiempo



En la figura 4 se muestra la evolución de las soluciones aceptadas con sus valores y los valores “record”. Al principio se producen mejoras notables, en los primeros 500 segundos, identificando una primera fase de diversificación durante los primeros 2000 segundos, mientras los valores de la temperatura se mantienen altos, aceptándose soluciones considerablemente peores, y a continuación hasta el final del proceso una segunda fase de intensificación donde la fluctuación es mínima, mejorando en esta fase la solución record un 1,6% en un tiempo computacional de 2100 segundos. El comportamiento de todos los procesos es similar, con un reparto aproximado del 50% entre las fases de diversificación e intensificación.

Tabla 3. Resumen de los valores medios de los costes, consumos y de las principales variables

	Coste (€)	Energía (Kwh)	h_1 (m)	e_4 (m)	b_1 (m)	b_3 (m)	e_1 (m)	e_2 (m)	e_3 (m)	$f_{c,viga}$ (MPa)	$f_{c,losa}$ (MPa)	ρ_1 (n)	ρ_2 (n)	ρ_3 (n)	ρ_4 (2)	S_v (m)	Angl (°)
(*)	63693	303235	1,38	0,19	1,41	0,20	0,18	0,10	0,15	43	36	25	15	0,0	2	5,82	66
(**)	64776	291463	1,43	0,21	1,50	0,24	0,19	0,11	0,21	42	38	26	14	0,0	2	5,82	66

(*) Optimización coste

(**) Optimización energía

Tabla 4. Resumen de las principales variables para la solución de mínima energía

Coste (€)	Energía (Kwh)	h_1 (m)	e_4 (m)	b_1 (m)	b_3 (m)	e_1 (m)	e_2 (m)	e_3 (m)	$f_{c,viga}$ (MPa)	$f_{c,losa}$ (MPa)	ρ_1 (n)	ρ_2 (n)	ρ_3 (n)	ρ_4 (2)	S_v (m)	Angl (°)
65909	276914	1,47	0,25	1,68	0,27	0,20	0,10	0,25	40	40	30	14	0,0	2,0	5,79	71

Tabla 5. Valores medios armadura pasiva, activa y hormigón

	Pasiva viga (kg)	Pasiva losa (kg)	Total pasiva (kg)	Total pasiva (kg/m ²)	Activa (kg)	Hormigón viga (m ³)	Hormigón losa (m ³)	Hormigón viga (m ³ /m ²)	Hormigón losa (m ³ /m ²)
(*)	2854	11455	14309	45,86	2967	30,18	60,53	0,097	0,194
(**)	2834	9551	12385	39,69	3039	35,52	63,99	0,114	0,205

(*) Optimización coste

(**) Optimización energía

Tabla 6. Armadura pasiva longitudinal y transversal en la sección de apoyo para las mejores soluciones

	As6	As7	t_1 (m)	t_2 (m)	t_3 (cm)	t_4 (cm)	t_5 (cm)
(*)	49Ø16	49Ø6	Ø10/200	Ø8/200	Ø8/200	Ø25/300	Ø25/300
(**)	97Ø8	49Ø6	Ø10/200	Ø8/200	Ø8/200	Ø20/300	Ø20/300

(*) Optimización coste

(**) Optimización energía

De los resultados geométricos obtenidos, mostrados en la Tabla 3 se pueden comprobar los siguientes extremos comparando la optimización en energía respecto al coste:

El canto medio de la viga es superior y tiene una esbeltez $L/17,5$, inferior al límite impuesto de $L/17$, pero aun así, bastante cercano. El espesor medio de la losa es algo superior, pero muy reducido, de 0,21 m., tendente a disminuir el peso propio del tablero, pero necesario para resistir la flexión transversal de las sobrecargas variables. Los espesores de las alas y alma de la viga son algo superiores, pero pequeños para reducir su peso, y a la vez, poder albergar las armaduras activas en las alas y resistir a cortante y torsor en las almas. Las longitudes de las alas superiores e inferiores de las vigas también son algo superiores, pero con valores mínimos en las superiores, suficientes para ubicar la armadura activa superior.

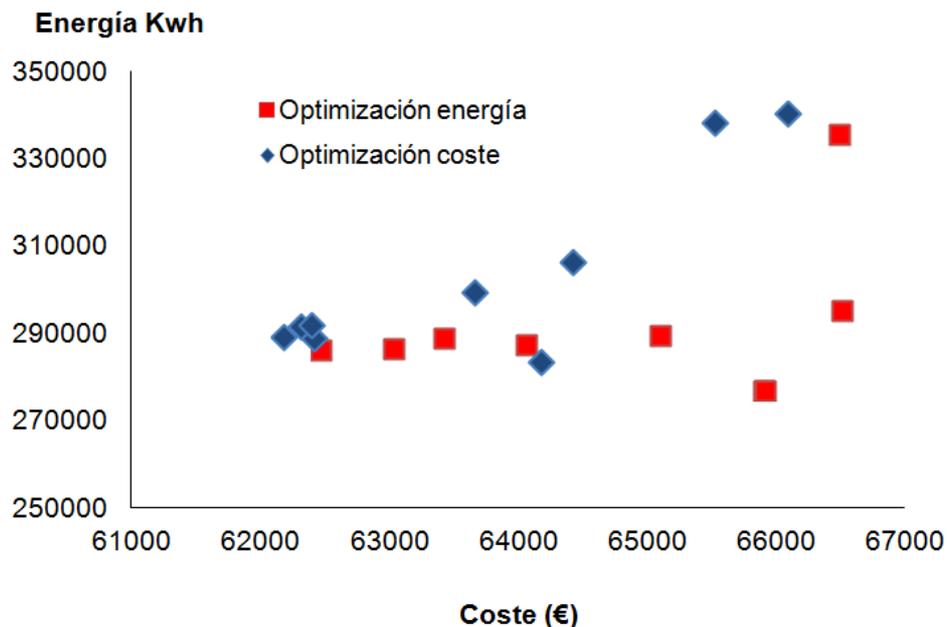
Las calidades del hormigón requerido son similares. En la viga, el valor medio de la resistencia característica f_{ck} es de 42 MPa, y en la losa, f_{ck} es de 38 MPa. El número de torones medio en el ala inferior es de 40, distribuidos en dos niveles, y dos torones en las alas superiores, lo mínimo para que no fisuren a tracción las alas en el banco de la planta de prefabricados cuando se tesan los torones inferiores. La separación media entre vigas S_v es de 5.82 m para las dos optimizaciones. Esta separación es inferior a la mitad de la dimensión del tablero -6 metros-, para poder ajustarse mejor a la distribución de la sobrecarga variable, en la que el carro se encuentra desplazado del extremo. La inclinación del alma es de 66° en ambas optimizaciones.

En la Tabla 5 se comparan las cuantías de acero y de hormigón para las dos optimizaciones, resumiendo que al optimizar en consumo energético la cuantía del hormigón, tanto en viga como en losa, es superior, mientras que con la armadura pasiva sucede lo contrario. En la Tabla 6 se representa la armadura pasiva en la sección de apoyo para las mejores soluciones, donde se aprecia que la mayor cuantía de acero viene localizada en la losa.

En la Figura 5 se representan los valores obtenidos de los consumos de energía y del coste

de las soluciones para las distintas funciones objetivo. Se aprecia que ambos objetivos van muy ligados, de tal modo que si se optimiza económicamente una estructura, por cada euro que se ahorra de valor medio, se dejan de consumir 4,76 Kwh de energía, y por otro lado, cuando se optimiza energéticamente, repercute en un incremento del coste del tablero de 3,47 €/m² (ver Tabla 3).

Figura 5: Valores de Energía y Coste de las distintas soluciones con distintos criterios de optimización



6. Conclusiones

El trabajo presenta un algoritmo SA híbrido con un mutador operacional (SAMO) aplicado con éxito al diseño automático y a la optimización en consumo energético de puentes prefabricados de hormigón. Este algoritmo, ejecutado varias veces, proporciona escasas variaciones respecto a la media de los valores encontrados, alcanzando buenas soluciones, incluso en el caso de una sola ejecución. Del estudio realizado para luces de 25 m, se ha comprobado un valor medio en la relación del canto de la luz, $L/17,2$. El espesor medio de la losa resultante es de apenas 0,21 m, de forma que las soluciones optimizadas tienden a reducir al máximo el peso de la estructura, pues los espesores de alas y alma de la viga también son muy reducidos. La resistencia característica del hormigón en la viga es ligeramente superior al de la losa, con valores medios de 42 MPa y 38 MPa, respectivamente, no habiendo sido necesario llegar hasta la máxima resistencia posible en ninguno de los casos. La separación entre vigas es de 5,82 m y el ángulo de las almas de de 66°. Por último, las heurísticas muestran que los resultados en las reducciones del consumo energético y del coste están íntimamente ligados cuando se optimizan las estructuras, por cada euro que se ahorra de valor medio, se dejan de consumir 4,76 Kwh de energía, y el ahorro energético repercute solamente en un incremento del coste de 3,47 €/m² de tablero.

7. Referencias

- Carbonell A, Gonzalez-Vidosa F, Yepes V. (2011). Design of reinforced concrete road vaults by heuristic optimization. *Adv Eng Softw* 42(4):151-9.
- Cohn MZ, Dinovitzer AS. (1994). Application of structural optimization. *J Struct Eng* 120(2),617-49.
- EHE-08. Ministerio de Fomento. (2008). Instrucción de Hormigón Estructural EHE, Madrid.
- Glauber R. J. (1963). Time-dependent statistics of the Ising model. *J. Math. Phys.* 4, 294.
- Horvath, Construction materials and the environment (2004), *Annual Review of Energy and The Environment* 29 181–204.
- IAP-98. Ministerio de Fomento. (1998). Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carreteras IAP-98, Madrid.
- Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (2012). BEDEC PR/PCT ITEC base de datos, (<http://itec.cat/nouBedec.e/bedec.aspx>).
- Kirkpatrick S, Gelatt CD, Vecchi MP. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science* 220(4598):671-80.
- Manterola J. (2006). Puentes. Apuntes para su diseño, cálculo y construcción, Colección Escuelas, Madrid.
- Martí JV, Gonzalez-Vidosa F. (2010). Design of prestressed concrete precast pedestrian bridges by heuristic optimization. *Adv Eng Softw* 41(7-8):916-22.
- Martí, J.V., Optimización de tableros isostáticos de vigas artesa. (2011). *Lap Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG*. ISSN 9783844339451.
- Martí JV, González-Vidosa F, Yepes, V, Alcalá, J. (2013). Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing. *Eng. Struct.* 48, 342–352.
- Martinez FJ, Gonzalez-Vidosa F, Hospitaler A, Alcalá J. (2011). Design of tall bridge piers by ant colony optimization. *Eng Struct* 33(8):2320-9.
- Paya I, Yepes V, González-Vidosa F y Hospitaler F. (2008). Multiobjective Optimization of Reinforced Concrete Building Frames by Simulated Annealing. *Comput Aid Civil Infrast Eng* 23(8):596-610.
- Perea C, Alcalá J, Yepes V, Gonzalez-Vidosa F y Hospitaler A. (2008). Design of reinforced concrete bridge frames by heuristic optimization. *Adv Eng Softw* 39(8):676-88.
- Yeo, D y Gabbai, R.D. (2011). Sustainable design of reinforced concrete structures through embodied energy optimization. *Energy and buildings*, 43(8): 2028-2033
- Yepes V, Alcalá J, Perea C y Gonzalez-Vidosa, F. (2008). A parametric study of optimum earth retaining walls by simulated annealing. *Eng Struct.* 30(3):821-30.
- Yepes, V, Villalba, P, Alcalá, J y González-Vidosa, F. (2011). Energy consumption optimization design of prestressed concrete slab bridge decks. *4th International Congress on Energy and Environment Engineering and Management*, 26-27 May, Mérida (Spain), pp. 153. ISBN: 978-84-9978-014-6.

