



## **SIMPOSIO INTERNACIONAL DE CONSTRUCCIONES DE LA CONVENCIÓN CCI-UCLV 2021**

### **Título**

**Algoritmo para el diseño óptimo de puentes de hormigón armado en las condiciones actuales de Cuba**

### *Title*

*Algorithm for the optimal design of reinforced concrete bridges in the current conditions of Cuba*

### **Autores/Authors:**

Naile Luna Delgado. ECOING 25, Cuba. E-mail: [nluna@ecoing25.cu](mailto:nluna@ecoing25.cu),

Ivan Negrín Díaz, Facultad de Construcciones, UCLV, Cuba. E-mail: [indiaz@uclv.cu](mailto:indiaz@uclv.cu),

Ernesto L. Chagoyén Méndez, Facultad de Construcciones, UCLV, Cuba. E-mail:

[chagoyen@uclv.edu.cu](mailto:chagoyen@uclv.edu.cu)

### **Resumen:**

En esta investigación se elabora un algoritmo para el análisis y diseño optimizado de puentes hiperestáticos de tres luces tipo viga-tablero de hormigón armado empleando como herramienta para al modelado, análisis, diseño y optimización la OAPI CSI Bridge-MatLab, basadas en la NC 733 Puentes de Carreteras y Alcantarillas y la AASHTO LRFD 2014.

Como método de optimización se ha elegido el basado en la biogeografía, algoritmo metaheurístico fundamentado en modelos matemáticos probabilísticos de migración de especies entre hábitats, que ha demostrado tener resultados satisfactorios en investigaciones precedentes.

Se define como función objetivo el costo mínimo de los elementos que componen la superestructura y subestructura del puente (tablero, vigas, cabezales y pilas), modelando



matemáticamente el problema mediante la elección de las variables y sus posibles restricciones.

La aplicación del algoritmo permitirá resolver el problema de diseño óptimo de puentes de carretera de hormigón armado, obteniendo conclusiones y recomendaciones de diseño, criterios para proyectar estructuras más económicas y pautas a seguir en futuras investigaciones en el campo de la optimización del diseño de puentes.

**Palabras Clave:** Optimización estructural; diseño óptimo de puentes; BBO; API CSi Bridge-MATLAB

**Abstract:**

*In this research, an algorithm for the analysis and optimized design of three-span hyperstatic bridges of reinforced concrete beam-deck type is developed using the OAPI CSI Bridge -MatLab as a tool for modeling, analysis, design and optimization, based on NC 733 and AASHTO LRFD 2014.*

*As optimization method, is selected one based on biogeography, a metaheuristic algorithm based on probabilistic mathematical models of species migration between habitats, which has shown satisfactory results in previous investigations.*

*The minimum cost is defined as an objective function, considering the elements of the superstructure and substructure of the bridge (slab, beams, and bents), mathematically modeling the problem by choosing the variables and their possible restrictions.*

*The application of the algorithm will allow to solve the problem of optimal design of reinforced concrete road bridges, obtaining conclusions and design recommendations, criteria for projecting more economical structures and guidelines to follow in future research in the field of optimizing bridge design.*

**Key words:** *Structural optimization; optimal bridge design; BBO; API CSi Bridge-MATLAB*

## **1. Introducción**

La optimización estructural es un campo de investigación que busca integrar y desarrollar metodologías que permitan encontrar nuevos diseños cumpliendo con criterios tales como: menor costo, menor peso, menor concentración de esfuerzos, vibraciones mecánicas, temperaturas, reducción de factores de seguridad, etc., y que a su vez se fabriquen con la menor cantidad de material posible.



En el último cuarto de siglo el desarrollo de la programación matemática y los ordenadores provocaron un avance profundo en la optimización de estructuras. La aplicación de métodos heurísticos a la ingeniería estructural se remonta a los años setenta y ochenta, siendo la computación evolutiva, y en especial los algoritmos genéticos, los métodos que más se han utilizado permitiendo analizar sistemas estructurales cada vez más complejos, con mayor número de variables y diversidad de funciones objetivos.

Las potencialidades del uso de los métodos heurísticos de optimización aplicados al diseño de puentes de hormigón armado aparecen referenciadas en los trabajos de Cristian Perea, Victor Yepes y González-Vidosa (Perea, Paya, Yepes, & Gonzalez-Vidosa, 2006) (Perea, Alcalá, Yepes, González-Vidosa, & Hospitaler, 2008) entre otros muchos autores, pero en la literatura consultada por lo general aparecen pocas referencias acerca de la aplicación de la optimización al diseño de puentes de vigas de hormigón armado. La mayoría de las investigaciones están centradas en puentes de vigas pre y postensadas, o enfocadas a un solo elemento de la estructura (estribos, pilas o tablero). También existen varias investigaciones encaminadas al diseño sostenible y a la durabilidad de estas estructuras.

En la actualidad cubana la proyección de puentes se resume en su gran mayoría a la implementación del proyecto típico cubano-soviético concebido en la década de los años setenta, bajo normativas ya obsoletas y en un escenario económico totalmente diferente al que se presenta hoy. A pesar de que los diseños son completamente seguros, es difícil llegar a la solución más económica, lo que podría lograrse mediante el empleo de la optimización estructural, técnica que aún no se ha generalizado en el diseño estructural de puentes, por lo que existen pocas referencias en la literatura cubana al respecto.

Este trabajo está precedido por una tesis de grado donde se optimizaron puentes isostáticos tipo viga-losa de 20 metros de luz utilizando algoritmos genéticos. En la solución se abarcó solamente las vigas pretensadas y el tablero, sin considerar el efecto que podrían ejercer el resto de los elementos del puente. (Martín Rosabal, 2018).

Debido a que la implementación de un proceso de optimización es compleja, y requiere un elevado volumen de cálculos, se viene desarrollando desde hace algunos años el uso de las API (Application Programming Interface), que vinculan los programas de análisis



y diseño con los lenguajes de programación y permiten automatizar completamente el proceso. La introducción de esta herramienta en las investigaciones desarrolladas en la Facultad de Construcciones de la Universidad Central de las Villas a partir del 2016 facilitó la obtención de resultados de manera más rápida y eficaz.

Por otra parte existen diversos métodos de optimización aplicados a las estructuras con resultados comprobados. Recientemente ha comenzado a utilizarse el método (Biogeography-Based Optimization-BBO), algoritmo metaheurístico desarrollado por Dan Simon en 2008 inspirado en la ciencia de la biogeografía, que ha sido aplicado a diversos problemas de optimización pero no existen referencias en la literatura consultada que evidencien el uso de este método en el diseño estructural de puentes. (Simon D. , 2008)

No existiendo precedentes en Cuba acerca de la optimización del diseño de puentes de hormigón armado con la inclusión de todos sus componentes, ni tampoco en la aplicación del método de BBO a esta problemática, nos proponemos:

- Formular el problema de optimización sobre la base de la obtención del costo mínimo considerando los elementos de la superestructura y la subestructura.
- Emplear la interfaz OAPI CSI Bridge–MatLab para crear el algoritmo totalmente automatizado de modelación, análisis, diseño y optimización estructural de puentes, implementando el método de optimización BBO.

## 2. Metodología

### 2.1 Planteamiento del problema

La optimización será aplicada a seis modelos de puentes con longitudes de 40 m, 50 m y 60 m distribuidas según las siguientes combinaciones de luces:

Tabla 2.1 Combinaciones de luces a estudiar

Combinación	Luz Extrema (m)	Luz Central (m)	Luz Extrema (m)	Longitud del Puente (m)
1	12	16	12	40
2	10	20	10	40
3	16	18	16	50
4	14	22	14	50
5	18	24	18	60
6	16	28	16	60



Los puentes corresponden a vías de Categoría I, con intensidad de tránsito (PAVDT) entre 4000 y 8000 Veh/día. La calzada está compuesta por dos carriles de circulación de 3.75 m de ancho, con paseos a ambos lados de la vía de 3.00 m de ancho cumpliendo con las especificaciones de la (NC-853:2012).

Se establece un espesor de pavimento flexible de 8 cm, compuesto por una capa de 5 cm de hormigón asfáltico semidenso y otra de 3 cm de hormigón asfáltico denso. No se contemplan aceras para el caso de estudio, pero se dispondrán barandas de hormigón de 0.75 m de altura sobre el nivel de rasante de la vía.

La solución de los puentes será hiperestática con 3 luces, tipo de viga y tablero de hormigón armado. Las vigas serán prefabricadas de sección rectangular, continuas a lo largo del puente. La continuidad se logrará mediante aceros salientes del refuerzo longitudinal, que se empalmarán a la viga siguiente, refundiendo con hormigón in situ la junta conformada.

La definición y cálculo de las cargas actuantes sobre los puentes estudiados, así como las combinaciones y factores de carga considerados se exponen en el acápite 2.2. La modelación se realiza completamente en el CSIBridge20, cuya imagen resultante se muestra en la figura 2.1.

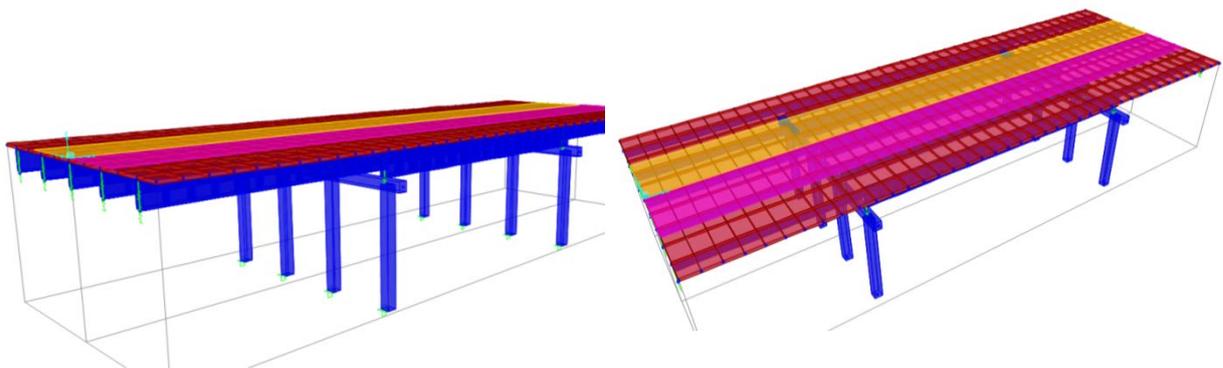


Figura 2.1. Modelo base de los puentes. Fuente: Elaboración Propia

## 2.2 Denominación y cálculo de cargas

### 2.2.1 Cargas permanentes

DC: El peso propio de cada uno de los elementos del conjunto, es calculado automáticamente por el CSIBridge20 a partir de las dimensiones y los pesos volumétricos de los materiales componentes. Esta carga irá tomando valores diferentes



en el propio proceso de optimización de acuerdo a la variación de las dimensiones de los elementos.

DW: Peso propio de las superficies de rodamiento e instalaciones para servicios públicos

*Carga de la capa de asfalto:  $23 \text{ kN/m}^3 * 0.08 \text{ m} = 1.84 \text{ kN/m}^2$  (figura 2.2)*

*Carga que transmiten las barandas o defensas a ambos lados de la vía:  $2.95 \text{ kN/m}$  (figura 2.3)*

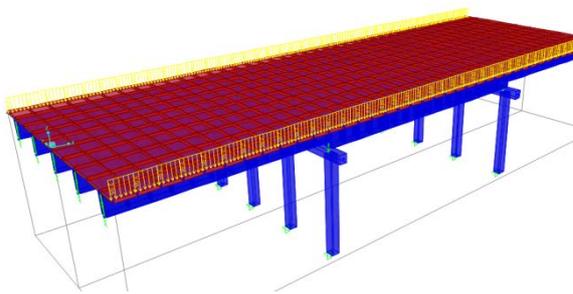


Figura 2.2. Carga de barandas o defensas  
Fuente: Elaboración Propia

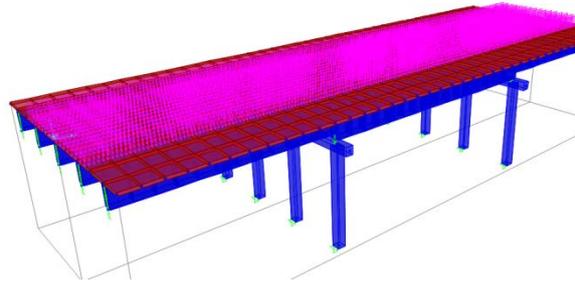


Figura 2.3. Carga de asfalto  
Fuente: Elaboración Propia

## 2.2.2 Cargas transitorias

### 2.2.2.1 Sobrecarga vehicular (LL)

Según (AASHTO-LRFD., 2007) la sobrecarga vehicular de diseño sobre las calzadas de puentes designadas como HL-93, deberá consistir en una combinación de:

- Camión de diseño o tándem de diseño
- Carga del carril de diseño

Donde:

Camión de diseño: Posee un eje de 35 kN y dos de 145 kN. La separación entre los dos ejes es variable entre 4,3 m y 9.0 m para producir las solicitaciones extremas (figura 2.4).

Tándem de diseño: consiste en dos ejes de aproximadamente 110 kN con una separación de 1.2 m longitudinalmente, y de 1.8 m transversalmente.

Carga de carril de diseño: corresponde a una carga distribuida producida por el peso de los vehículos ligeros que circulan por el puente. Tiene un valor de 9.3 kN/m, uniformemente distribuida en la dirección longitudinal, y se considera de 3 m de ancho transversalmente.

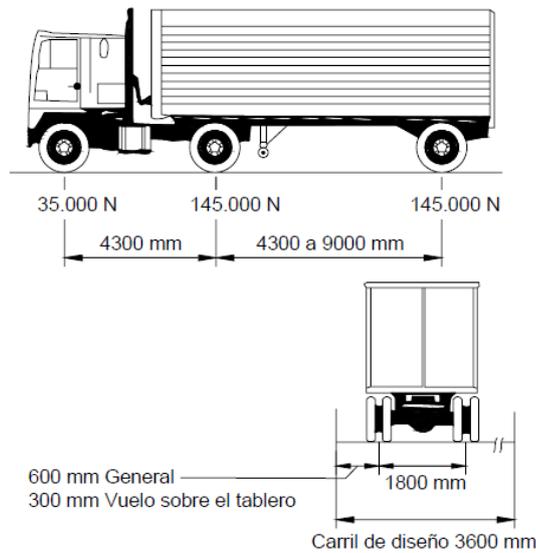


Figura 2.4. Características del camión de diseño. Fuente: (AASHTO-LRFD., 2007)

Para determinar la sollicitación máxima se conciben tres tipos de vehículos con las siguientes características:

- a) Vehículo HL-93K: Camión de diseño + Carga de carril de diseño + 33% de incremento carga dinámica.

Camión de diseño: se consideran un eje de 35 kN y dos de 145 kN, que afectados por el 33% de incremento de carga dinámica toman los valores de 46.55 kN y 192.85 kN. La separación entre los dos ejes de 145 kN se varía entre 4.3 y 9.0 m para producir las sollicitaciones extremas. La separación transversal de las ruedas se toma como 1.8 m.

Carga de carril de diseño: equivalente a 9.3 kN/m ocupando una franja de 3 m transversalmente dentro de un carril de diseño.

- b) Vehículo HL-93M: Camión tándem + Carga de carril de diseño + 33% (incremento carga dinámica)

Camión tándem: la carga concentrada por eje es de 110 kN, que afectada por el 33% de incremento carga dinámica toma el valor de 146.3 kN. La separación entre ejes será 1.2 m, y la separación transversal entre ruedas es de 1.8 m.

Carga de carril de diseño: equivalente a 9.3 kN/m ocupando una franja de 3 m transversalmente dentro de un carril de diseño.

- c) Vehículo HL-93S: (2 Camión de diseño + Carga de carril de diseño) 90%



Se consideran dos camiones de diseño continuos, considerando solamente el 90% del valor de la carga por eje. La distancia entre los vehículos se toma como 15 m, y la distancia entre los ejes de 145 kN se toma como 4.3 m. Se adiciona la carga carril de diseño con el 90% de su valor.

### 2.2.2.2 Carga de frenado (BR)

Acción longitudinal debido al frenado o arranque de los vehículos (AASHTO-LRFD., 2007)

La fuerza de frenado se toma como el mayor de los siguientes valores:

- a) 25% de los pesos por eje del camión de diseño

$$BR_1 = 25\% * (35 \text{ kN} + 145 \text{ kN} + 145 \text{ kN}) \quad (\text{II.1})$$

$$BR_1 = 81.25 \text{ kN}$$

- b) 25% de los pesos por eje del tándem de diseño

$$BR_2 = 25\% * (110 \text{ kN} + 110 \text{ kN}) \quad (\text{II.2})$$

$$BR_2 = 55 \text{ kN}$$

- c) 5% del camión de diseño más la carga del carril

$$BR_3 = 5\% * (35 \text{ kN} + 145 \text{ kN} + 145 \text{ kN} + LongCarril * 9.3 \text{ kN}) \quad (\text{II.3})$$

$$BR_3 = 34.85 \text{ kN} \text{ (para longitud de puente de 40 m)}$$

Donde:

$LongCarril$  = Longitud del puente y varía en cada modelo.

- d) 5% del tándem de diseño más la carga del carril.

$$BR_4 = 5\% * (110 \text{ kN} + 110 \text{ kN} + LongCarril * 9.3 \text{ kN}) \quad (\text{II.4})$$

$$BR_4 = 29.6 \text{ kN} \text{ (para longitud de puente de 40 m)}$$

$$BR = \text{maximo}(BR_1, BR_2, BR_3, BR_4) * \# \text{ carriles} * FPM \quad (\text{II.5})$$

$$BR = 81.25 \text{ kN} * 2 * 1$$

$$BR = 162.5 \text{ kN}$$

Donde:

$FPM$ : Factor de presencia múltiple, que para 2 carriles cargados se toma como 1

$\# \text{ carriles}$ : Número de carriles



Resumiendo, la carga concentrada correspondiente a la fuerza de frenado de los vehículos tiene un valor de 162.5 kN, aplicada a 1.80 m por encima del nivel de rasante (figura 2.5).

### 2.2.2.3 Carga de Viento (WS)

La carga de viento se calcula según la (NC-285:2003). A continuación solo se refleja la formulación de la carga de viento según las especificaciones de la norma cubana referida, pues algunos coeficientes varían según las luces y las dimensiones de los elementos de cada modelo, por lo que la carga toma diferentes valores a lo largo del proceso de optimización (figura 2.6).

#### Carga de viento vertical aplicada sobre la superficie del tablero

$$Fv = 0.6 * \{q_{10} * C_t * C_s * C_h * C_r * C_{ra}\} * b * l_B \quad (\text{kN/m}) \quad (\text{II.6})$$

#### Carga de viento horizontal aplicada sobre la superficie del tablero

$$Fh = 1.0 * \{q_{10} * C_t * C_s * C_h * C_r * C_{ra}\} * d * l_B \quad (\text{kN/m}) \quad (\text{II.7})$$

#### Carga de viento aplicada a la viga barlovento

$$FI = \{q_{10} * C_t * C_s * C_h * C_r * C_{ra} * C_{n,\infty}\} * K_{red} * \sum a_I \quad (\text{kN/m}) \quad (\text{II.8})$$

#### Carga de viento aplicada a la viga sotavento

$$FII = \{q_{10} * C_t * C_s * C_h * C_r * C_{ra} * C_{n,\infty}\} * K_{red} * N * \sum a_I \quad (\text{kN/m}) \quad (\text{II.9})$$

#### Carga de viento aplicada a pilas

$$qpilas = q_{10} * C_t * C_s * C_h * C_r * C_{ra} * C_f * bpilas \quad (\text{kN/m}) \quad (\text{II.10})$$

Donde:

$q_{10}$ : presión básica del viento ( $\text{kN/m}^2$ )

$C_t$ : coeficiente de recurrencia

$C_s$ : coeficiente de topografía o sitio

$C_h$ : coeficiente de altura

$C_r$ : coeficiente de ráfaga

$C_{ra}$ : coeficiente de reducción por grandes áreas expuestas

$C_f$ : coeficiente de forma

$l_B$ : longitud del puente (variable según el modelo: 40, 50 o 60 m)

$d$ : espesor de la losa (variable durante el proceso de optimización)



$b$ : ancho de la estructura entre caras internas de las vigas (variable durante el proceso de optimización)

$bpilas$ : ancho de la sección transversal de las pilas (variable durante el proceso de optimización)

$K_{red}$ : factor de reducción (variable según el modelo) tabla 11, pag.40 (NC-285:2003)

$N$ : coeficiente de reducción (variable según el modelo) caso 3, pag.41 (NC-285:2003)

$\sum a_l$ : coeficiente de llenado de la estructura

Cálculo de la presión básica y coeficientes:

$$q_{10} = 1.3 \text{ kN/m}^2$$

Presión básica Zona I - Que comprende las provincias: Pinar del Río, La Habana, Ciudad de la Habana, Isla de la Juventud, Matanzas, Villa Clara y Cienfuegos

$$C_t = 1.12$$

Valor que se obtiene mediante interpolación entre los tiempos de recurrencia de 100 y 50 años según tabla 1, pag.2 (\*)

$$C_s = 1$$

Sitio normal, según tabla 2, pag.3 (\*)

$$C_h = \left(\frac{Z}{10}\right)^{0.32}$$

Para  $Z_g = 300$  m, Terreno tipo A, según tabla 3, pag.5 (\*)  
La altura del puente  $Z$  es variable en cada modelo

$$C_r = 1.22$$

Para Terreno A y altura  $< 10$  m, según tabla 6, pag.7 (\*)

$$C_{ra} = 0.75/0.74/0.735$$

Variable en función de las longitudes de cada modelo (40m/50m/60 m respectivamente)

$$C_f = 0.8 + 0.5 = 1.3$$

Según acápite 10.3 Edificios abiertos en tres lados, pag.29 (\*)

(\*) Todas las tablas y paginas están referidas a la (NC-285:2003)

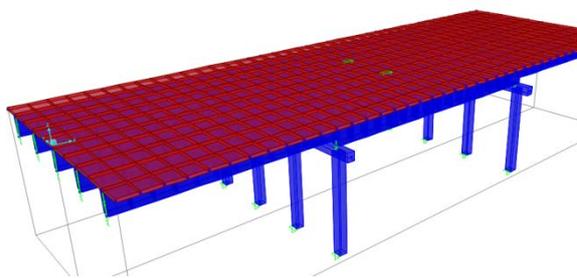


Figura 2.5. Carga de frenado. Fuente: Elaboración Propia

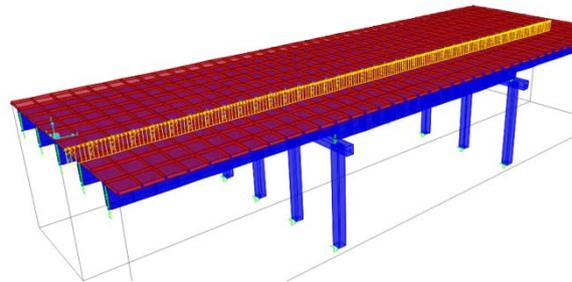


Figura 2.6. Carga de viento horizontal y vertical actuando sobre el tablero. Fuente: Elaboración Propia



### 2.3 Factores de carga y combinaciones

Se tiene en cuenta en el estudio treinta y ocho (38) combinaciones de carga agrupadas en: Resistencia I, Resistencia III, Resistencia IV, Resistencia V, Servicio y Servicio de Cargas Permanentes. Los factores de carga según la norma AASHTO se detallan a continuación:

**Resistencia I:** Uso vehicular normal del puente, sin viento.

1.  $DC*1.25+DW*1.5+LL*1.75+BR*1.75$
2.  $DC*1.25+DW*0.65+LL*1.75+BR*1.75$
3.  $DC*1.25+DW*1.5+LL*1.75+BR*(-1.75)$
4.  $DC*1.25+DW*0.65+LL*1.75+BR*(-1.75)$
5.  $DC*0.9+DW*1.5+LL*1.75+BR*1.75$
6.  $DC*0.9+DW*0.65+LL*1.75+BR*1.75$
7.  $DC*0.9+DW*1.5+LL*1.75+BR*(-1.75)$
8.  $DC*0.9+DW*0.65+LL*1.75+BR*(-1.75)$

**Resistencia III:** Puente expuesto a vientos de velocidades superiores a 90 km/h.

1.  $DC*1.25+DW*1.5+WS*1.4$
2.  $DC*1.25+DW*.65+WS*1.4$
3.  $DC*1.25+DW*1.5+WS*(-1.4)$
4.  $DC*1.25+DW*0.65+WS*(-1.4)$
5.  $DC*0.9+DW*1.5+WS*1.4$
6.  $DC*0.9+DW*0.65+WS*1.4$
7.  $DC*0.9+DW*1.5+WS*(-1.4)$
8.  $DC*0.9+DW*0.65+WS*(-1.4)$

**Resistencia IV:** Relaciones muy elevadas entre las solicitaciones provocadas por las cargas permanentes y las provocadas por las sobrecargas.

1.  $DC*1.5+DW*1.5$
2.  $DC*1.5+DW*0.65$
3.  $DC*0.9+DW*1.5$
4.  $DC*0.9+DW*0.65$



**Resistencia V:** Uso del puente por parte de vehículos normales con una velocidad del viento de 90 km/h.

1.  $DC*1.25+DW*1.5+WS*0.4+BR*1.35+LL*1.35$
2.  $DC*1.25+DW*0.65+WS*0.4+BR*1.35+LL*1.35$
3.  $DC*1.25+DW*1.5+WS*0.4+BR*(-1.35)+LL*1.35$
4.  $DC*1.25+DW*0.65+WS*0.4+BR*(-1.35)+LL*1.35$
5.  $DC*1.25+DW*1.5+WS*(-0.4)+BR*1.35+LL*1.35$
6.  $DC*1.25+DW*0.65+WS*(-0.4)+BR*1.35+LL*1.35$
7.  $DC*1.25+DW*1.5+WS*(-0.4)+BR*(-1.35)+LL*1.35$
8.  $DC*1.25+DW*0.65+WS*(-0.4)+BR*(-1.35)+LL*1.35$
9.  $DC*0.9+DW*1.5+WS*0.4+BR*1.35+LL*1.35$
10.  $DC*0.9+DW*0.65+WS*0.4+BR*1.35+LL*1.35$
11.  $DC*0.9+DW*1.5+WS*0.4+BR*(-1.35)+LL*1.35$
12.  $DC*0.9+DW*0.65+WS*0.4+BR*(-1.35)+LL*1.35$
13.  $DC*0.9+DW*1.5+WS*(-0.4)+BR*1.35+LL*1.35$
14.  $DC*0.9+DW*0.65+WS*(-0.4)+BR*1.35+LL*1.35$
15.  $DC*0.9+DW*1.5+WS*(-0.4)+BR*(-1.35)+LL*1.35$
16.  $DC*0.9+DW*0.65+WS*(-0.4)+BR*(-1.35)+LL*1.35$

**Servicio:** Operación normal del puente tomando todas las cargas a sus valores nominales (sin viento).

$$DC + DW + BR + LL$$

**Servicio de Cargas Permanentes:** Operación normal del puente tomando solamente la carga permanente con su valor nominal.

$$DC + DW$$

## 2.4 Formulación del problema de optimización

### 2.4.1 Elección de los parámetros asignados

Los parámetros asignados de un puente pueden ser los relativos a su geometría, a las acciones que actúan sobre él, a sus coeficientes de seguridad u otras características que se definen a continuación.



- Ancho del puente = Ancho de carril \* Número de carriles + Ancho de paseos \* 2 + Espesor de borde \* 2 =  $(3.75 \text{ m} * 2 + 3.0 \text{ m} * 2 + 0.35 * 2) = 14.2 \text{ m}$  (según especificaciones de la NC-853:2012)
- Luces: 10 m, 12 m, 14 m, 16 m, 18 m, 20 m, 22 m, 24 m y 28 m.
- Longitud de puentes: 40, 50 y 60 m divididos en 3 tramos con las combinaciones de luces reflejadas en la tabla 2.1.
- Altura de las pilas: 6 m (cumpliendo con la NC 853:2012 se asume una altura de pilas por encima del gálibo recomendado)
- Cantidad de pilas: 4
- Longitud de cabezales: 14 m
- Aparatos de apoyo: de neopreno.
- Tipología de la sección transversal de vigas: rectangulares que al combinarse con el tablero se convierten en T.
- Tipología de la sección transversal de pilas: sección cuadrada
- Tipología de la sección transversal de cabezales: sección rectangular
- Diafragmas: no se consideran
- Espesor de capa de asfalto: 5 cm de hormigón asfáltico semidenso y 3 cm de hormigón asfáltico denso
- Carga de la capa de asfalto: definida en el acápite 2.2
- Carga que transmiten las barandas o defensas: definida en el acápite 2.2.
- Carga vehicular: definida en el acápite 2.2.
- Carga de frenado: definida en el acápite 2.2
- Carga de viento que actúa sobre la estructura: definida en el acápite 2.2
- Condiciones de apoyo:  
Se excluye del análisis la cimentación de las pilas y los estribos, modelando el vínculo de estos últimos como apoyos de neopreno elásticos con una rigidez finita. Para el presupuesto se considera un valor estimado del costo de la cimentación basado en obras de igual tipología y no se considera el costo de los estribos.
- Vínculos entre elementos: las alas de las vigas forman parte del tablero por lo que existe una unión hiperestática entre ellos, siendo ambos elementos continuos en



toda la longitud del puente. Las vigas apoyan sobre los cabezales con una unión articulada, al igual que los cabezales sobre las pilas.

- Diámetros de acero disponibles: 9.5 mm, 12.7 mm, 15.9 mm, 19.1 mm, 22.2 mm, 25.4 mm, 32.3 mm y 35.8 mm.
- Resistencia característica a compresión del hormigón ( $f'c$ ): 25 MPa, 30 MPa, 35 MPa y 40 MPa
- Resistencia característica del Acero ( $f_y$ ): 300 MPa
- Diámetro de los cercos: 9.5 mm y 12.7 mm
- Recubrimientos: 3.5 cm (agresividad media) según la tabla 6.6.3.1 Valores mínimos de recubrimiento en elementos estructurales (mm) de la NC-207:2019

#### 2.4.2 Elección de las variables

Los parámetros variables representan las decisiones que se pueden tomar para afectar el valor de la función objetivo. Para lograr una correcta elección de estas variables, se debe conocer principalmente, cuál es el criterio de optimización seleccionado y qué variables influyen en el mismo.

Los parámetros variables se dividen en:

- Parámetros variables externos (independientes), que son aquellas variables que no dependen de otras o sea que se fijan antes de comenzar el problema (en nuestro caso: peraltos, anchos, resistencia del hormigón, resistencia del acero, etc.)
- Parámetros variables internos (dependientes): que son aquellas variables que dependen de las variables externas (en nuestro caso: área de acero longitudinal y transversal).

Las variables serán discretas ya que la optimización estructural demanda soluciones finales que sean factibles constructivamente, además de reducir notablemente el espacio de soluciones. La discretización se realizará en dependencia del tipo de variable.

Para el presente caso se trabaja con 11 variables independientes:

- 1) Número de vigas en la sección transversal del puente (*CantVigas*)
- 2) Espesor de la losa superior del tablero (*EspesorTablero*)
- 3) Peralto de la viga de la luz central del puente (*PeraltoVigaCentral*)
- 4) Ancho de la viga de la luz central del puente (*AnchoVigaCentral*)



- 5) Peralto de la viga de la luz extrema del puente (*PeraltoVigaExtrema*)
- 6) Ancho de la viga de la luz extrema del puente (*AnchoVigaExtrema*)
- 7) Peralto de las pilas (se escoge el peralto solamente por considerar la sección cuadrada) (*PeraltoPilas*)
- 8) Calidad del hormigón de la viga (*CalHgonViga*)
- 9) Calidad del hormigón del tablero (*CalHgonTab*)
- 10) Calidad del hormigón de las pilas (*CalHgonPila*)
- 11) Calidad del hormigón de los cabezales (*CalHgonCab*)

Las variables dependientes serán:

- Peralto y ancho de cabezales (dimensionados en función del peralto de pilas)
- Área de acero longitudinal y transversal de vigas
- Área de acero longitudinal y transversal del tablero
- Área de acero longitudinal y transversal de cabezales
- Área de acero longitudinal y transversal de pilas

#### **2.4.3 Identificación de las restricciones**

El cumplimiento de las restricciones permite asegurar que un puente, como resultado de la solución del problema de optimización, es construible porque tiene sentido físico y cumple las exigencias de seguridad estructural.

Las restricciones pueden ser de dos tipos fundamentales: implícitas o explícitas.

##### **2.4.3.1 Restricciones implícitas**

Están asociadas fundamentalmente al cumplimiento de las condiciones impuestas por el diseño (ecuaciones de estado) mediante los estados límites (resistencia, rigidez) y se introducen en el algoritmo de solución propuesto.

Las condiciones de resistencia se cumplen al efectuar el diseño de los elementos, ya sea en los que se diseñan por el propio CSI Bridge (pilas y cabezales) utilizando el código AASHTO LRFD-2014, como en los que se diseñan mediante una rutina programada en el MATLAB (vigas y tablero) basada en las especificaciones de la norma cubana. (NC-207:2019) (Hernández Santana & Hernández Caneiro, 2010). La flecha de los



elementos sometidos a flexión y la abertura de fisuras se chequean dentro de la propia rutina de diseño, donde se penaliza la función objetivo, en caso de no cumplirse.

Dentro del algoritmo se establecen además otras restricciones de carácter constructivo como son las relacionadas con la colocación del acero longitudinal y transversal en vigas, cabezales y pilas.

### 2.4.3.2 Restricciones explícitas

Estas restricciones son fundamentalmente constructivas y limitan el intervalo de movimiento de las variables en el proceso de optimización, requisito obligatorio de los métodos utilizados en esta investigación.

Los límites mínimos y máximos que pueden tomar las variables, así como los intervalos en que se moverán sus valores durante el proceso de optimización se muestran en las tablas 2.2 a la 2.7 diferenciando cada puente porque los intervalos de movimiento de algunas variables dependen de las luces a cubrir.

Tabla 2.2. Lista de variables y sus intervalos de movimiento para puente de 40 m  
 Combinación de luces: 10-20-10 m

Nombre de la Variable	Denominación Codificada	Valor mínimo	Valor máximo	Intervalo de movimiento	Número de valores que puede adoptar
CantVigas	p(1)	5 u	11 u	1 u	7
EspesorTablero	p(2)	0.16 m	0.26 m	0.02 m	6
PeraltoVigaCentral	p(3)	1.05 m	1.90 m	0.05 m	18
AnchoVigaCentral	p(4)	0.45 m	0.75 m	0.05 m	7
PeraltoVigaExtrema	p(5)	0.4 m	0.95 m	0.05 m	12
AnchoVigaExtrema	p(6)	0.15 m	0.45 m	0.05 m	7
PeraltoPilas	p(7)	0.50 m	1.00 m	0.10 m	6
CalHgonViga	p(8)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4
CalHgonTab)	p(9)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4
CalHgonPila	p(10)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4
CalHgonCab	p(11)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4

Tabla 2.3. Lista de variables y sus intervalos de movimiento para puente de 40 m  
 Combinación de luces: 12-16-12 m



Nombre de la Variable	Denominación Codificada	Valor mínimo	Valor máximo	Intervalo de movimiento	Número de valores que puede adoptar
CantVigas	p(1)	5 u	11 u	1 u	7
EspesorTablero	p(2)	0.16 m	0.26 m	0.02 m	6
PeraltoVigaCentral	p(3)	0.75 m	1.60 m	0.05 m	18
AnchoVigaCentral	p(4)	0.30 m	0.60 m	0.05 m	7
PeraltoVigaExtrema	p(5)	0.55 m	1.10 m	0.05 m	12
AnchoVigaExtrema	p(6)	0.20 m	0.50 m	0.05 m	7
PeraltoPilas	p(7)	0.50 m	1.00 m	0.10 m	6
CalHgonViga	p(8)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4
CalHgonTab)	p(9)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4
CalHgonPila	p(10)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4
CalHgonCab	p(11)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4

Tabla 2.4. Lista de variables y sus intervalos de movimiento para puente de 50 m  
 Combinación de luces: 14-22-14 m

Nombre de la Variable	Denominación Codificada	Valor mínimo	Valor máximo	Intervalo de movimiento	Número de valores que puede adoptar
CantVigas	p(1)	5 u	11 u	1 u	7
EspesorTablero	p(2)	0.16 m	0.26 m	0.02 m	6
PeraltoVigaCentral	p(3)	1.20 m	2.05 m	0.05 m	18
AnchoVigaCentral	p(4)	0.50 m	0.80 m	0.05 m	7
PeraltoVigaExtrema	p(5)	0.65 m	1.20 m	0.05 m	12
AnchoVigaExtrema	p(6)	0.25 m	0.55 m	0.05 m	7
PeraltoPilas	p(7)	0.50 m	1.00 m	0.10 m	6
CalHgonViga	p(8)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4
CalHgonTab)	p(9)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4
CalHgonPila	p(10)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4
CalHgonCab	p(11)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4



Tabla 2.5. Lista de variables y sus intervalos de movimiento para puente de 50 m  
 Combinación de luces: 16-18-16 m

<b>Nombre de la Variable</b>	<b>Denominación Codificada</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Intervalo de movimiento</b>	<b>Número de valores que puede adoptar</b>
CantVigas	p(1)	5 u	11 u	1 u	7
EspesorTablero	p(2)	0.16 m	0.26 m	0.02 m	6
PeraltoVigaCentral	p(3)	0.90 m	1.75 m	0.05 m	18
AnchoVigaCentral	p(4)	0.35 m	0.65 m	0.05 m	7
PeraltoVigaExtrema	p(5)	0.75 m	1.30 m	0.05m	12
AnchoVigaExtrema	p(6)	0.30 m	0.60 m	0.05 m	7
PeraltoPilas	p(7)	0.50 m	1.00 m	0.10 m	6
CalHgonViga	p(8)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4
CalHgonTab)	p(9)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4
CalHgonPila	p(10)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4
CalHgonCab	p(11)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4

Tabla 2.6. Lista de variables y sus intervalos de movimiento para puente de 60 m  
 Combinación de luces: 16-28-16 m

<b>Nombre de la Variable</b>	<b>Denominación Codificada</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Intervalo de movimiento</b>	<b>Número de valores que puede adoptar</b>
CantVigas	p(1)	5 u	11 u	1 u	7
EspesorTablero	p(2)	0.16 m	0.26 m	0.02 m	6
PeraltoVigaCentral	p(3)	1.60 m	2.45 m	0.05 m	18
AnchoVigaCentral	p(4)	0.65 m	0.95 m	0.05 m	7
PeraltoVigaExtrema	p(5)	0.75 m	1.30 m	0.05m	12
AnchoVigaExtrema	p(6)	0.30 m	0.60 m	0.05 m	7
PeraltoPilas	p(7)	0.50 m	1.00 m	0.10 m	6
CalHgonViga	p(8)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4
CalHgonTab)	p(9)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4
CalHgonPila	p(10)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4
CalHgonCab	p(11)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4



Tabla 2.7. Lista de variables y sus intervalos de movimiento para puente de 60 m  
 Combinación de luces: 18-24-18 m

Nombre de la Variable	Denominación Codificada	Valor mínimo	Valor máximo	Intervalo de movimiento	Número de valores que puede adoptar
CantVigas	p(1)	5 u	11 u	1 u	7
EspesorTablero	p(2)	0.16 m	0.26 m	0.02 m	6
PeraltoVigaCentral	p(3)	1.30 m	2.15 m	0.05 m	18
AnchoVigaCentral	p(4)	0.55 m	0.85 m	0.05 m	7
PeraltoVigaExtrema	p(5)	0.90 m	1.45 m	0.05m	12
AnchoVigaExtrema	p(6)	0.35 m	0.65 m	0.05 m	7
PeraltoPilas	p(7)	0.50 m	1.00 m	0.10 m	6
CalHgonViga	p(8)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4
CalHgonTab)	p(9)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4
CalHgonPila	p(10)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4
CalHgonCab	p(11)	25 MPa	40 MPa	5 MPa	4

#### 2.4.4 Definición de la función objetivo

Como el criterio de optimización seleccionado para esta investigación es el de mínimo costo total, la función objetivo está definida por el cálculo del costo directo total de la estructura, teniendo en cuenta la totalidad de las actividades que se realizarán durante la ejecución del puente codificadas mediante el catálogo de precios por renglón variante (PRECONS.II, 2005).

La función objetivo queda definida entonces como:

$$CD_{total} = (CD_{subestructura} + CD_{superestructura}) \quad (II.11)$$

Donde:

$$CD_{subestructura} = CD_{movtierra} + CD_{cimentación} + CD_{pilas} + CD_{cabezales} \quad (II.12)$$

$$CD_{superestructura} = CD_{vigas} + CD_{tablero} + CD_{paseos} + CD_{asfalto} + CD_{defensas} \quad (II.13)$$

*CD<sub>movtierra</sub>*: Sumatoria de los costos directos de la ejecución del movimiento de tierra (\$).

*CD<sub>cimentación</sub>*: Sumatoria de los costos directos de la ejecución de la cimentación (\$).



*CDvigas*: Sumatoria de los costos directos de la elaboración y el montaje de las vigas (\$).

*CDpilas*: Sumatoria de los costos directos de la ejecución de las pilas (\$).

*CDcabezas*: Sumatoria de los costos directos de la elaboración y el montaje de los cabezales (\$).

*CDtablero*: Sumatoria de los costos directos de la construcción del tablero (\$).

*CDpaseos*: Sumatoria de los costos directos de la construcción de los paseos (\$).

*CDasfalto*: Sumatoria de los costos directos de la pavimentación de la calzada del puente (\$).

*CDdefensas*: Sumatoria de los costos directos de la elaboración y el montaje de defensas (\$).

En todos los casos la sumatoria de los costos directos incluye los suministros, la fabricación y el montaje de cada elemento.

## **2.5 Método de optimización empleado**

El método de optimización seleccionado para esta investigación es el BBO (*Biogeography-Based Optimization*) teniendo en cuenta que existe referencia en la literatura internacional y en investigaciones realizadas en la Facultad de Construcciones de la Universidad Central de Las Villas (Negrin, Chagoyen, & Negrin, 2020) (Negrin D, Rooseb, Chagoyén, & Lomba, 2020) acerca de su efectividad para la solución a problemas de optimización complejos.

La biogeografía es la rama de la ciencia que estudia la distribución de los seres vivos sobre la tierra así como las causas que determinan dicha distribución. Los modelos matemáticos de biogeografía describen cómo las especies migran de un hábitat o isla a otro, cómo surgen nuevas especies y otras se extinguen. Las áreas geográficas con condiciones adecuadas para la residencia de especies biológicas tienen un alto índice de idoneidad (*High habitat Suitability Index -HSI*). Este índice numérico representa la capacidad de un hábitat de mantener un cierto nivel de población de diferentes especies. Se obtiene de la combinación de las diferentes variables que afectan la calidad de vida de las especies. (Olmedo Ávila, 2019)



Las variables que caracterizan la habitabilidad se denominan variables de índice de idoneidad (*Suitability Index Variable-SIV*). Los SIV pueden considerarse las variables independientes del hábitat y el HSI puede considerarse la variable dependiente.

### **Proceso de migración**

Los hábitats que presentan un alto HSI suelen tener una mayor biodiversidad y un bajo ratio de inmigración debido a lo saturado que se encuentra su ecosistema, lo que hace que un gran número de especies emigren hacia otros hábitats cercanos, por lo que además presenta un elevado ratio de emigración. Independientemente de los índices de emigración e inmigración, este tipo de hábitat suele presentar un número de especies más o menos constante.

En los hábitats con un bajo HSI ocurre todo lo contrario, presentan una carencia en el número de especies que los habitan y el ratio de inmigración es elevado pues un gran número de especies pueden instalarse en ellos, lo que provoca un aumento del HSI. Si a pesar de esto el HSI continúa en niveles bajos, las especies del hábitat se irán extinguiendo, y se permitirá aumentar aún más el ratio de inmigración dando lugar a un mayor dinamismo en la distribución de las especies en el hábitat. (Simon, 2008).

Una buena solución será representada por un hábitat con un HSI elevado y una mala solución por un hábitat con un bajo HSI. Debido a la relativa estabilidad de las soluciones consideradas como buenas (alto HSI) estas son más robustas y tienden a permanecer invariables en el tiempo así como a compartir sus características con los hábitats o soluciones cercanas con un HSI menor. De esta manera nos vamos acercando a las soluciones óptimas y descartando las que no satisfagan las condiciones impuestas. (Olmedo Ávila, 2019)

En la gráfica de la figura 2.7 se observa como el número de especies,  $S$ , de un hábitat individual afecta a las constantes de inmigración  $\lambda$ , y de emigración  $\mu$ . Ambas se han representado como relaciones lineales para mayor simplicidad en el estudio.  $I$  representa el máximo ratio de inmigración posible y  $E$  el máximo ratio de emigración posible en el hábitat de estudio.

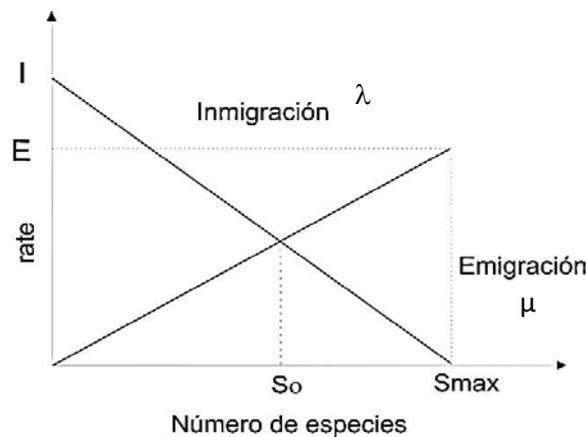


Figura 2.7. Distribución de especies de un hábitat. Fuente: (Olmedo Ávila , 2019)

Conforme aumenta el número de especies de un hábitat este se va saturando, por lo que quedan menos recursos para nuevas especies que inmigren hacia él. Esto hace que el ratio de inmigración disminuya ya que menos especies son capaces de sobrevivir en un hábitat tan saturado. El ratio de inmigración se hará cero cuando se alcance el máximo número de especies que el hábitat es capaz de soportar,  $S_{max}$ . Ocurre lo contrario con el ratio de emigración que será máximo cuando el número de especies es máximo, ya que las especies buscarán otros hábitats donde haya menos competencia por la supervivencia, y cero cuando no haya especies. Cuando las gráficas se cruzan, se alcanza el punto de equilibrio  $S_o$ .

Matemáticamente la inmigración se realiza de la siguiente manera:

$$NewSpec = ActSpec + \alpha * (ImmSpec - ActSpec) \quad (II.14)$$

Donde:

*ActSpec*: Especies que se analizan

*ImmSpec*: Especie seleccionada para realizar inmigración

$\alpha$ : El coeficiente de aceleración, relacionado con la magnitud del cambio a realizar en la especie analizada

### Proceso de Mutación

Mediante el proceso de mutación se logra que las soluciones con un bajo HSI tengan la oportunidad de convertirse en buenas soluciones. Este proceso también puede provocar que una solución empeore, por lo que las mejores soluciones se deben preservar



mediante el elitismo, de esta forma no se pierde la información en caso de que la mutación no resulte factible.

Matemáticamente la mutación se realiza de la siguiente manera:

$$NewSpec = NewSpec + \sigma * N(0,1) \quad (II.15)$$

Donde:

$\sigma$ : Tamaño del paso de mutación (0,05 por defecto)

$N(0,1)$ : Número aleatorio con media 0 y desviación estándar 1

Además, después de cada iteración,  $\sigma$  disminuye, modificado por la amortiguación del tamaño del paso de mutación (0,99 por defecto).

Una vez que se analiza toda la población, se forma la nueva. Para ello, se eligen varias de las mejores soluciones de la población anterior (antes de ser transformadas) y se suman a las mejores de la nueva población. Esto es similar al elitismo utilizado en GA. El número de soluciones tomadas de la población anterior es igual a:

$$Indiv = KeepRate * PopSize \quad (II.16)$$

Donde:

*KeepRate*: Coeficiente que representa el porcentaje de la población anterior que ingresará a la nueva

*PopSize*: Tamaño de la población

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Algoritmo de solución al problema de optimización mediante la API CSIBridge-MATLAB. Funciones API utilizadas

El algoritmo general se programó en MATLAB, cuya forma escrita o programación codificada se denomina "script", y se guarda en un archivo o fichero "\*.m".

El motor principal del proceso es el módulo de optimización *BBO.m*. Este se encarga de crear una población inicial aleatoria, evaluar la función objetivo para cada uno de los hábitats que la conforman, clasificar los HSI y ordenarlos para obtener la mejor solución. A partir de la primera población se inicia un proceso iterativo en el cual, mediante los procesos de migración y mutación se crean nuevas poblaciones a partir de las mejores soluciones de las anteriores, evaluando la función objetivo de cada hábitat



para obtener el mínimo de cada iteración hasta completar el ciclo completo de iteraciones propuesto.

En cada evaluación de la función objetivo se pone en marcha otro algoritmo, que se ha nombrado *MAIN.m*, cuya función es realizar la modelación y análisis del puente en CSIBridge20, con la combinación de variables que establece *BBO.m* para la iteración en curso, realizar el diseño estructural de cada elemento y calcular el costo directo.

En la figura 3.1 se muestra la metodología general del algoritmo en diagrama de flujo.

### 3.1.1 Algoritmo "BBO.m"

El algoritmo BBO define en primer lugar que la función objetivo será minimizada. Luego establece el número de variables (*nvars*) y los límites inferiores y superiores de cada una (*vectores LB y UB*). Se definen además los parámetros: máximo número de iteraciones (*bbo.max\_iter*), tamaño de población (*bbo.pop\_size*), probabilidad de mutación (*bbo.mutation\_prob*), porcentaje de la población anterior que ingresará a la nueva (*bbo.keep\_rate*), coeficiente de aceleración (*bbo.alpha*), tamaño y paso de mutación (*bbo.mutation\_step\_size*) (*mutation\_step\_size\_damp*).

### 3.1.2 Algoritmo "MAIN.m". Funciones API utilizadas

El algoritmo consta de los siguientes pasos:

a) Decodificación del vector "p"

El vector "p" proviene del *BBO.m* y contiene los valores de cada variable referentes a la geometría del puente, dimensiones y propiedades de los materiales de cada elemento.

b) Indicar la ruta del CSI Bridge20

Para indicar al MATLAB el acceso a aplicaciones externas como lo es el CSIBridge20 se debe referenciar la ruta del ejecutable de la siguiente forma:

c) Crear objeto Ayuda

d) Crear Objeto Sap

En este paso se crea la variable de intercambio tipo cOAPI

e) Iniciar CSIBridge20

La aplicación se inicia mediante la función OAPI *ApplicationStart*, perteneciente al grupo de funciones generales.

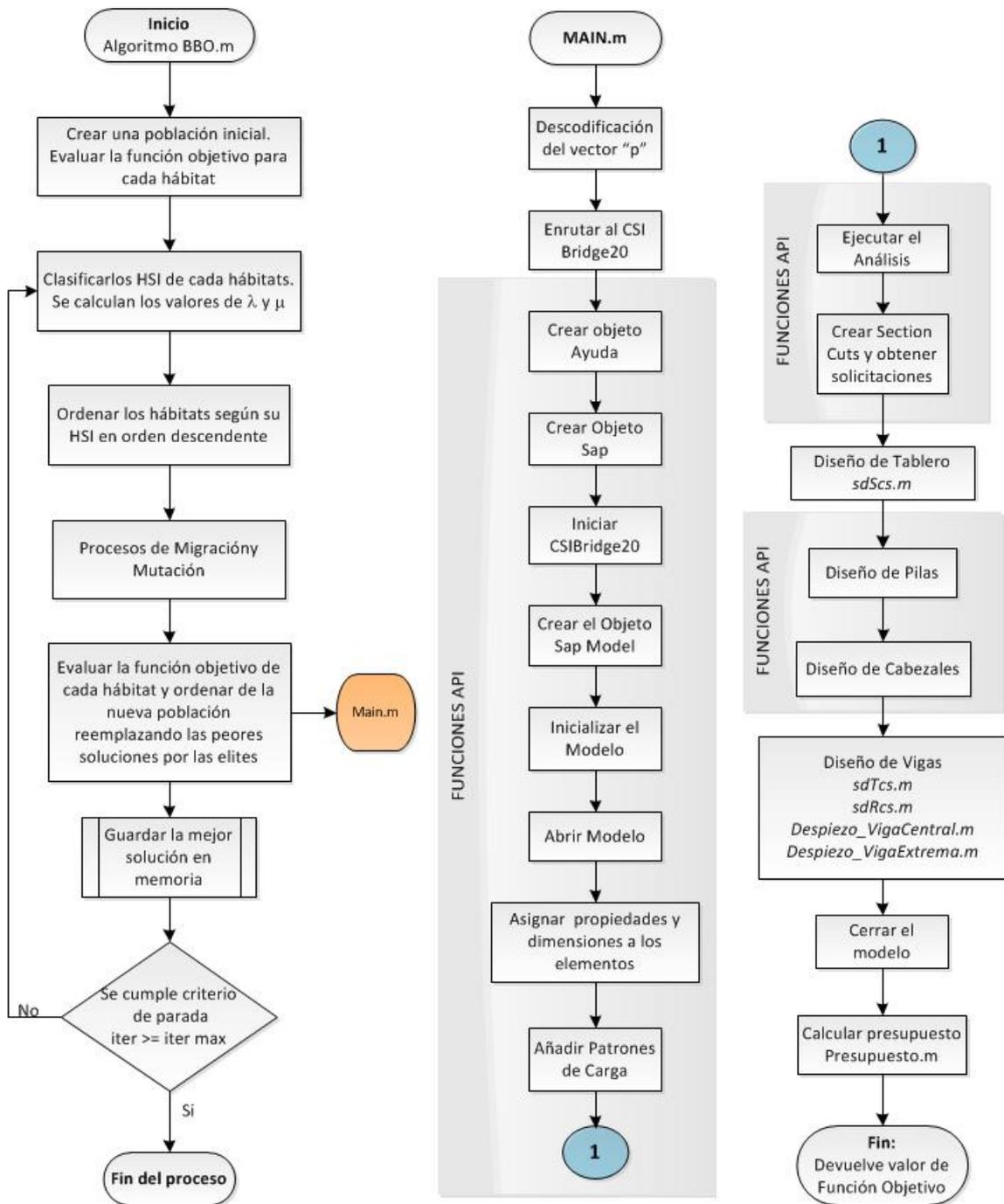


Figura 3.1. Algoritmo general de solución. Fuente: Elaboración propia

f) Crear el Objeto Sap Model

g) Inicializar el modelo

Se inicializa el modelo y se establecen las unidades de medida en que se trabajará mediante las funciones generales de la OAPI *InitializeNewModel* y *SetPresentUnit*:

h) Crear Modelo



El modelo base ha sido previamente creado para simplificar el algoritmo, por lo que se prosigue con la apertura del mismo utilizando la función OAPI *OpenFile*.

i) Asignar propiedades y dimensiones a los elementos

Se asigna al tablero, vigas, pilas y cabezales las propiedades y dimensiones. Las vigas se dividen en dos tipos: "VIGAS LUZ MAYOR" que corresponde a las de la luz central y "VIGAS LUZ MENOR" que corresponde a las de la luz extrema. Para cada tipo se establece ancho y peralto. Igualmente se define peralto y ancho para pilas y cabezales, y en el caso del tablero se define el espesor. Dentro de las propiedades se encuentra además la calidad del hormigón de cada elemento. Todo esto se realiza mediante las funciones *Definitions/Properties/Frame/SetPrecastI\_1*, *Definitions/Properties/Frame/SetRectangle* y *Definitions/Properties/Area/SetShell\_1*.

En el análisis se ha tenido en cuenta una reducción del momento de inercia de las secciones transversales de vigas y columnas por la influencia de las cargas axiales, la presencia de regiones fisuradas a lo largo de la longitud del elemento, y los efectos de la duración de la carga (NC-207:2019) (Delgado Montalvan, 2014). Para las vigas se asigna un factor de reducción del 35% y para las pilas del 70%, lo que se establece mediante la función OAPI *Object Model/Frame Object/ SetModifier*.

j) Añadir patrones de carga

En el modelo previamente elaborado quedan definidos los valores de carga superficial de asfalto, carga lineal de barandas, carga lineal vertical y horizontal de viento sobre el tablero, y carga puntual de frenado. En este apartado se asignan las cargas lineales de viento aplicadas sobre vigas a barlovento, vigas a sotavento y pilas mediante la función OAPI *Object Model/Frame Object/ SetLoadDistributed*.

k) Ejecutar el análisis

l) Crear *section cuts* para obtener solicitaciones

En este paso se utilizan tres funciones OAPI:

- *Definitions/Section Cuts/SetByQuad*: para realizar la sección de corte proporcionando las coordenadas de los cuatro vértices del cuadrilátero de corte.



- *Definitions/Section Cuts/SetResultLocation*: para definir las coordenadas X,Y,Z del punto donde se requiere las solicitaciones, que en este caso se ha tomado en el centroide de la sección.
- *Definitions/Section Cuts/SetResultsSide*: para establecer de qué lado del elemento se desea obtener los resultados (positivo o negativo)

Se declaran 9 section cuts:

- *Section Cut 1*: en centro de la luz del puente, para obtener el momento positivo crítico de la condición de resistencia y servicio de la viga central.
- *Section Cut 2*: en el punto de momento positivo crítico de la viga extrema del puente, que se encuentra del 30% al 40% de la luz extrema, en dependencia de la combinación de luces analizada.
- *Section Cut 3*: en el eje de pilas 1, para obtener el momento crítico negativo.
- *Section Cut 4*: en el eje de pilas 2, para obtener el momento crítico negativo.
- *Section Cut 5*: en el apoyo izquierdo (origen del puente) para obtener el cortante crítico.
- *Section Cut 6*: en el eje de pilas 1 para obtener el cortante crítico.
- *Section Cut 7*: en el eje de pilas 2 para obtener el cortante crítico.
- *Section Cut 8*: en el apoyo derecho (final del puente) para obtener el cortante crítico.
- *Section Cut 9*: en el centro de la luz extrema del puente, para determinar el momento de servicio que provoca la flecha máxima en esa viga.

m) Obtener solicitaciones en los *Section Cut*

Para extraer las solicitaciones obtenidas en el paso anterior se utiliza la función OAPI *Analysis Results/ Results/ SectionCutAnalysis*, seleccionando para qué combinación de carga se requieren los resultados mediante la función *AnalysisResultsSetup/ SetComboSelectedForOutput*.

n) Obtener solicitaciones en el tablero

Las solicitaciones de diseño del tablero se extraen mediante la función *Analysis Results/Results/AreaForceShell*. De esta forma se obtienen los momentos máximos y mínimos en ambas direcciones del tablero.

o) Diseño del tablero



El diseño a flexión del tablero se realiza mediante un scripts creado en MATLAB que nos permite obtener el área de acero, diámetros y espaciamientos entre barras.

p) Diseño de pilas

El diseño de las pilas se realiza para la combinación crítica mediante la función OAPI *Design/Concrete/StartDesign* usando el código de diseño ACI 318-14. Utilizando la función *Design/Concrete/GetSummaryResultsColumn* se obtiene el área de acero longitudinal. Luego mediante una secuencia programada en MATLAB se calcula la cantidad de barras de acero que necesita la sección y la cantidad de cercos según las especificaciones que establece la norma cubana.

q) Diseño de cabezales

El diseño de los cabezales se realiza para la combinación crítica mediante la función OAPI *Design/Concrete/DesignConcrete.GetSummaryResultsBeam* usando el código de diseño ACI 318-14. Esta opción permite obtener el área de acero a flexión y cortante, a partir de la cual se aplica una rutina programada en MATLAB para la selección del acero de refuerzo.

r) Diseño de vigas

El diseño de vigas se efectúa mediante un script programado en MATLAB que realiza el diseño a flexión, chequeo de flecha y de abertura de fisuras.

Se independiza el diseño del área de acero de las vigas exteriores y las interiores, teniendo en cuenta que las primeras están menos cargadas, aunque se mantienen las dimensiones de sección transversal para no afectar la estética del puente. Además se independizan los diseños de vigas de la luz central y de la luz extrema, pero en este caso sí se diferencian las secciones transversales, siendo las centrales más aperaltadas ya que están sometidas a mayor esfuerzo. De esta forma se mejora el aprovechamiento de la capacidad resistente de cada viga.

s) Cerrar el modelo

Concluido el análisis y diseño se cierra la aplicación CSIBridge20 mediante la función general de la OAPI *ApplicationExit*:

t) Calcular presupuesto



Finalmente se calcula el costo directo de construcción del puente utilizando un script programado también en MATLAB que trabaja sobre una base de datos con los precios por renglón variante del PRECONS II que contiene los costos directos de materiales, mano de obra y equipos de las actividades a ejecutar. Este script devuelve al algoritmo principal *BBO.m* el valor que adoptó la función objetivo para ese hábitat.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se logra la formulación completa del problema de optimización sobre la base de la obtención del costo mínimo de la estructura considerando por primera vez todos sus elementos (superestructura y subestructura), teniendo especial cuidado en la elección de los parámetros, las variables y las restricciones, por la importancia que revisten para el logro de resultados fiables.

Fue creado un algoritmo totalmente automatizado para la modelación, análisis, diseño y optimización de los puentes empleando la interfaz OAPI CSI Bridge–MatLab, en el cual se implementó el método de optimización BBO por la efectividad que ha demostrado en la solución de problemas de optimización complejos.

A partir de este trabajo se puede proceder a la aplicación de la formulación obtenida cuyos resultados permitirán llegar a recomendaciones, criterios de diseño racionales y pautas a seguir en futuras investigaciones en el campo de la optimización del diseño de puentes.

En otra etapa de la investigación se pudiera implementar la optimización multicriterio, teniendo en cuenta por ejemplo el peso de los elementos que incide en los costos de transportación y montaje, analizar modelos con presencia de diafragmas e incluir la cimentación para determinar cómo incide en los resultados finales.

#### 5. Referencias bibliográficas

1. AASHTO-LRFD. (2007). Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método LRFD. 4ta Edición.
2. Aydogdu, I. (2017). Cost optimization of reinforced concrete cantilever retaining walls under seismic loading using a biogeography-based optimization algorithm with Levy flights. *Engineering Optimization*, 49(3), 381-400.



3. Delgado Montalvan, Y. (Febrero de 2014). Influencia de factores ignorados en la modelación, sobre el análisis de Estructuras de Hormigón Armado. Tesis de Maestría. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
4. Hernández Santana, J., & Hernández Caneiro, J. (2010). *Hormigón Estructural. Diseño por Estados Límites. Parte I.*
5. Jalili, S., Hosseinzadeh, Y., & Kaveh, A. (2014). Chaotic biogeography algorithm for size and shape optimization of truss structures with frequency constraints. *Periodica polytechnica Civil Engineering*, 58(4), 397-422.
6. Lozano, D., Velazquez, F., & Zepeda, A. (2010). Optimización estructural de forma en el diseño de cavidades en elementos planos mediante algoritmos evolutivos. *Mecánica Computacional*, XXIX, 1143-1159.
7. Martín Rosabal, E. (2018). Optimización Estructural en Superestructuras de puentes con vigas simplemente apoyadas. TD. . Santa Clara, Villa Clara, Cuba: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil.
8. NC-207:2019. (s.f.). *Requisitos Generales para el diseño y construcción de estructuras de hormigón.* La Habana: Oficina Nacional de Normalización (NC).
9. NC-285:2003. (s.f.). Carga de Viento. Método de Cálculo. Oficina Nacional de Normalización (NC). 1era Edición.
10. NC-853:2012. (s.f.). Carreteras Rurales-Categorización técnica y característica geométricas del trazado directo. Oficina Nacional de Normalización (NC). 1era Edición.
11. Negrin D, I., Rooseb, D., Chagoyén, E., & Lomba, G. (2020). Optimization of reinforced concrete structures taking into account parameter tuning. (*En trámite de publicación*).
12. Negrin, I., Chagoyen, E., & Negrin, A. (2020). Parameter tuning in the process of optimization of reinforced concrete structures. Applications. (*En trámite de publicación*).
13. Olmedo Ávila, A. (2019). Algoritmo Biogeography-Based-Optimization para el control de potencia de un convertidor en fuente de tensión. Escuela Politécnica Superior de Algeciras.



14. Perea, C., Alcalá, J., Yepes, V., González-Vidosa, F., & Hospitaler, A. (2008). Design of Reinforced Concrete Bridge Frames by Heuristic Optimization. *Advances in Engineering Software*, 39 (8), 676-688.
15. Perea, C., Paya, I., Yepes, V., & Gonzalez-Vidosa, F. (2006). Heuristic Optimization of Reinforced Concrete Road Bridge Frames. *Proceedings of the Eighth International Conference on Computational Structures Technology*, Civil-Comp Press, Stirlingshire.
16. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, P. (2002). ACI 318-02. Requisitos para hormigón estructural.
17. PRECONS.II. (2005). *Precios para la construcción. PRECONS II*. Editorial Obras.
18. Simon, D. (2008). Biogeography-Based Optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 12(6), 702-713.
19. Simon, D. (2013). *Evolutionary Optimization Algorithms*. Wiley & Sons, Inc.
20. Tunca, O., & Çarbaş, S. (2016). Biogeography-Based Optimization Algorithm for Designing of Planar Steel Frames. International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'16). Konya, Turkey.