

**APLICACIÓN DE HEURÍSTICAS Y METAHEURÍSTICAS
EN EL DISEÑO DE PUENTES EN CONCRETO**

VÍCTOR ALFONSO MANRIQUE ANDRADE

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS
BUCARAMANGA**

2020

**APLICACIÓN DE HEURÍSTICAS Y METAHEURÍSTICAS
EN EL DISEÑO DE PUENTES EN CONCRETO**

VÍCTOR ALFONSO MANRIQUE ANDRADE

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE
ESPECIALISTA EN ESTRUCTURAS**

DIRECTOR

**OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO
INGENIERO CIVIL-PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS
BUCARAMANGA**

2020

DEDICATORIA

A Dios que nos da la oportunidad de equivocarnos, aprender de nuestros errores y evolucionar a lo largo de esta vida.

A mis padres (Luis Manrique y Yaneth Andrade), a mi hermana (Yiby Manrique) y a mi sobrina (Camila Matamoros), por su constante amor y apoyo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. OBJETIVOS	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3 ALCANCE	16
1.4 METODOLOGÍA	17
2. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS/TÉCNICAS HEURÍSTICAS Y METAHEURÍSTICAS EN EL DISEÑO DE PUENTES EN CONCRETO	19
2.1. DOCUMENTOS PÚBLICADOS	20
2.2. REVISTAS CON MAYOR NÚMERO DE PUBLICACIONES	26
2.3. ENTIDADES CON MAYOR NÚMERO DE PUBLICACIONES	30
2.4. AUTORES CON MAYOR NÚMERO DE PUBLICACIONES	31
2.5. PAISES CON MAYOR NÚMERO DE PUBLICACIONES	33
3. MÉTODOS/TÉCNICAS HEURÍSTICAS Y METAHEURÍSTICAS	34
3.1 OPTIMIZACIÓN	34
3.2. COMPLEJIDAD EN LOS PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN	36
3.3. ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN	39

3.4. ALGORITMOS HEURISTICOS Y METAHEURISTICOS	40
3.4.1. Algoritmos heurísticos.....	40
3.4.2. Algoritmos metaheurísticos.....	44
3.4.3. Métodos de búsqueda secuencial por entornos.....	47
3.4.4. Algoritmos evolutivos	59
3.4.5. Redes neuronales.....	72
4. APLICACIÓN DE MÉTODOS/TÉCNICAS HEURÍSTICAS Y METAHEURÍSTICAS EN EL DISEÑO DE PUENTES EN CONCRETO	75
4.1. PUENTES.....	75
4.2. FILOSOFÍA DEL DISEÑO DE ESTRUCTURAS.....	80
4.3. OPTIMIZACIÓN EN EL DISEÑO DE PUENTES	82
4.3.1. Tipologías de puentes optimizadas.....	83
4.3.2. Elementos estructurales optimizados	84
4.3.3. Funciones objetivo	85
4.3.4. Variables de diseño	97
4.3.5. Parámetros de diseño	101
4.3.6. Restricciones de diseño.....	104
4.3.7. Técnicas de optimización.....	105
4.3.8. Principales conclusiones en las investigaciones sobre optimización de diseño de puentes	108
5. CONCLUSIONES	111
6. RECOMENDACIONES.....	114

BIBLIOGRAFÍA.....116

ANEXOS.....132

LISTA DE TABLAS

Tabla No. 1. Listado de documentos publicados, relacionados con el uso de técnicas de optimización heurística y/o metaheurística, en el diseño de puentes en concreto.20

Tabla No. 2. Revistas que presentan artículos relacionados, con el uso de técnicas de optimización heurísticas y metaheurísticas, en el diseño de puentes en concreto.27

Tabla No. 3. Pseudocódigo Hill Climbing49

Tabla No. 4. Pseudocódigo Recocido simulado50

Tabla No. 5. Pseudocódigo Aceptación por Umbrales.....52

Tabla No. 6. Pseudocódigo Búsqueda Tabú.54

Tabla No. 7. Pseudocódigo GRASP56

Tabla No. 8. Pseudocódigo Búsqueda Local Iterada57

Tabla No. 9. Pseudocódigo Búsqueda en Entornos Variables58

Tabla No. 10. Pseudocódigo Colonias de Hormigas.....60

Tabla No. 11. Pseudocódigo Algoritmo Genético62

Tabla No. 12. Pseudocódigo Algoritmos Meméticos.....65

Tabla No. 13. Pseudocódigo Búsqueda armónica67

Tabla No. 14. Pseudocódigo Enjambre de partículas68

Tabla No. 15. Pseudocódigo para el algoritmo luciérnagas.....70

Tabla No. 16. Pseudocódigo re. encadenamiento de trayectorias.....71

Tabla No. 17. Tipologías de puentes optimizados	83
Tabla No. 18.Elementos estructurales optimizados.....	84
Tabla No. 19. Tipología de concreto optimizados	84
Tabla No. 20.Costos unitarios y valores unitarios de emisión CO2.	86
Tabla No. 21.Patios de fundición disponibles para evaluación	88
Tabla No. 22. Costos de recursos por hora.	88
Tabla No. 23. Energía consumida por ejecución de actividad.	90
Tabla No. 24.Valores medios para el cálculo del impacto social.	95
Tabla No. 25.Funciones objetivo.....	96
Tabla No. 26.Variables para optimización de un puente tipo Viga I.....	100
Tabla No. 27.Parámetros para optimización de diseño de un box culvert.	102
Tabla No. 28.Parámetros para optimización de diseño de un puente sección cajón.	103
Tabla No. 29.Parámetros económicos y de consumo de energía, para la optimización del diseño de un tablero de concreto preesforzado.	103
Tabla No. 30.Técnicas de optimización metaheurísticas empleadas.....	105
Tabla No. 31. Evolución del costo y la temperatura Vs. Tiempo de cómputo, método recocido simulado.	107
Tabla No. 32. Evolución del costo y el umbral Vs. Tiempo de cómputo, método aceptación por umbrales.....	107
Tabla No. 33.Evolución de las emisiones CO2 Vs. Número de iteraciones, método colonia de hormigas (Alcalá, Martí, Yepes, & García-Segura, 2014).....	108

LISTA DE FIGURAS

Figura No. 1. Histograma de publicaciones, relacionados con el uso de técnicas de optimización heurística y/o metaheurística, en el diseño de puentes en concreto.	25
Figura No. 2. Diagrama de publicaciones de revistas, relacionadas con el uso de técnicas de optimización heurística y/o metaheurística, en el diseño de puentes en concreto.	30
Figura No. 3. Documentos publicados por entidad/filiación, relacionados con el uso de técnicas de optimización heurística y/o metaheurística, en el diseño de puentes en concreto	31
Figura No. 4. Documentos publicados por autor, relacionados con el uso de técnicas de optimización heurística y/o metaheurística, en el diseño de puentes en concreto	32
Figura No. 5. Documentos publicados por país, relacionados con el uso de técnicas de optimización heurística y/o metaheurística, en el diseño de puentes en concreto	33
Figura No. 7. Diagrama de Euler de las familias de problemas P, NP, NP-complejo y NP-hard.	38
Figura No. 8. Búsqueda por gradiente.	48
Figura No. 9. Búsqueda por aceptación de umbrales.	51

Figura No. 10. Red neuronal artificial con n neuronas de entrada, m en su capa oculta y una de salida72

Figura No. 11. Componentes generales de un puente.75

Figura No. 12.Tablero de puentes.76

Figura No. 13.Dispositivos de apoyo..76

Figura No. 14.Elementos subestructura.....77

Figura No. 15.Clasificación de puentes, según estructura longitudinal.....79

Figura No. 16.Clasificación de puentes según estructura transversal.80

Figura No. 17.Método tradicional de diseño de estructuras.....81

Figura No. 18.Método de diseño con técnicas de optimización.82

Figura No. 19.Variables geométricas,tablero de puente pretensado aligerado97

Figura No. 20.Variables geométricas, puente sección en cajón.98

Figura No. 21.Variables acero pasivo, tablero de puente pretensado aligerado....98

Figura No. 22.Variables acero pasivo, puente sección en cajón.99

Figura No. 23.variables de acero activo, puentes de sección cajón.99

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Tabla bibliografía referida.....132

RESUMEN

TÍTULO: APLICACIÓN DE HEURÍSTICAS Y METAHEURÍSTICAS EN EL DISEÑO DE PUENTES EN CONCRETO*

AUTOR: VÍCTOR ALFONSO MANRIQUE ANDRADE**

PALABRAS CLAVE: OPTIMIZACIÓN, HEURÍSTICA, METAHEURISTICAS, PUENTES, CONCRETO.

DESCRIPCIÓN:

En la actualidad la evolución de la inteligencia artificial, ha ayudado a encontrar soluciones a problemas de optimización complejos. El diseño de cualquier estructura en ingeniería civil, y en especial en puentes, es un problema multivariable, en donde se requiere encontrar la solución más adecuada, con respecto a los pilares básicos del desarrollo sostenible (factores económicos, medioambientales, sociales y de seguridad). En la presente monografía se hace una revisión del estado del arte de la aplicación de los métodos/técnicas heurísticas y meheurísticas, en el diseño optimizado de puentes en concreto; encontrando lo siguiente: Entre 1190 y 2019, se dio un crecimiento exponencial en la investigación en este campo, liderada por universidades de España, Estados Unidos y China; la investigación en Latinoamérica y específicamente en Colombia es muy escasa en este campo; las fases o ciclos de vida más estudiados son el diseño (71%) y, el uso y mantenimiento (71%); las tipologías de puentes más estudiadas son la sección en cajón (40%), la sección en viga I (23%) y la sección en losa maciza (10%); los principales elementos estructurales estudiados son la viga en I (31%), la losa maciza (29%) y la sección cajón (10%); las funciones objetivo más utilizadas son el costo de construcción (59%) y el costo de mantenimiento (19%); Las principales variables a optimizar en el diseño de puentes son las geométricas, el refuerzo pasivo, el refuerzo activo (pretensado y postensado), los tipos de concreto y los tipos de aditivos; las técnicas metaheurísticas más utilizadas en el diseño de puentes son los algoritmos genéticos (26%) y el recocido simulado (25%); con los procesos de optimización se ha logrado reducir los costos de construcción en alrededor de un 15% al 30%, con respecto al diseño convencional.

*Monografía

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo, PhD.

ABSTRACT

TITLE: APPLICATION OF HEURISTICS AND METAHEURISTICS IN THE DESIGN OF BRIDGES IN CONCRETE*

AUTHOR: VÍCTOR ALFONSO MANRIQUE ANDRADE**

KEYWORDS: OPTIMIZATION, HEURISTICS, METAHEURISTICS, STRUCTURAL, BRIDGE, CONCRETE.

DESCRIPTION:

Today the evolution of artificial intelligence has helped find solutions to complex optimization problems. The design of any structure in civil engineering, and especially in bridges, is a multivariable problem, where it is necessary to find the most appropriate solution, with respect to the basic pillars of sustainable development (economic, environmental, social and security factors). This monograph reviews the state of the art of the application of heuristic and metaheuristic methods / techniques in the optimized design of concrete bridges; finding the following: Between 1990 and 2019, there was an exponential growth in research in this field, led by universities in Spain, the United States and China; Research in Latin America and specifically in Colombia is very scarce in this field; The most studied phases or life cycles are design (71%) and, use and maintenance (71%); the most studied types of bridges are the box section (40%), the I-beam section (23%) and the solid slab section (10%); The main structural elements studied are the I-beam (31%), the solid slab (29%) and the box section (10%); The most used objective functions are the construction cost (59%) and the maintenance cost (19%); the main variables to optimize in the design of bridges are the geometrics, the passive reinforcement, the active reinforcement (prestressed and post-tensioned), the types of concrete and the types of additives; The most widely used metaheuristic techniques in bridge design are genetic algorithms (26%) and simulated annealing (25%); The optimization processes have reduced construction costs by around 15% to 30%, compared to conventional design.

*Monograph

** Physicomechanical Faculty of Engineering, School of Civil Engineering. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo, PhD.

INTRODUCCIÓN

Desde su surgimiento a mediados de 1950, la inteligencia artificial ha buscado soluciones para la toma óptima de decisiones en el campo de la investigación operativa, la cual incluye problemas complejos de administración, organización y control, que se producen en los sistemas naturales o en los sistemas creados por el ser humano (sistemas organizacionales, sistemas físicos, sistemas económicos, sistemas ecológicos, sistema de educación, sistemas de servicio social, sistemas políticos, sistemas de ingeniería y/o tecnología, entre otros) (Esmorís, 2013).

El diseño de las estructuras en general, es un problema de selección de múltiples variables de diseño, sujetas a restricciones estructurales (estados límites de esfuerzos y deflexiones de acuerdo a los manuales de ingeniería y normatividad vigente), para lo cual la inteligencia artificial es una disciplina muy adecuada.

A pesar del potencial de la inteligencia artificial, actualmente el diseño de las estructuras de concreto reforzado, está condicionado a la experiencia del ingeniero diseñador; la mayoría de procedimientos se basa en la adopción de dimensiones de los elementos, y el cálculo de refuerzos de forma iterativa (a prueba y error), hasta que se satisfaga los estados límites prescritos por los códigos estructurales vigentes, en la región o país particular. El anterior procedimiento lleva a diseños seguros, pero en la mayoría de casos a estructuras sobredimensionadas, con grandes impactos ambientales, sociales, y costos de mantenimiento y durabilidad inciertos (diseños alejados de los pilares del desarrollo sostenible).

En el presente trabajo se hace una revisión del estado del arte de los métodos/técnicas de optimización heurística y metaheurística, y su aplicación al diseño de puentes en concreto.

En el capítulo 1, se describen los objetivos y alcances de este trabajo. En el capítulo 2, se presenta un análisis bibliométrico sobre el tema. A continuación, en el capítulo 3, se presentan las ideas claves de las heurísticas empleadas para optimización. En el capítulo 4, se abordan las aplicaciones de las metodologías descritas en el capítulo 3, en el diseño óptimo de puentes de concreto. En el capítulo 5, se consignan las conclusiones y recomendaciones, surgidas en este trabajo, incluyendo una tabla de bibliografía, con información relevante sobre los trabajos de aplicación de heurísticas relacionados con puentes (apéndice).

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar una revisión del estado del arte de la aplicación de los diferentes métodos de optimización heurísticos y metaheurísticos, en el diseño de puentes en concreto.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una revisión bibliográfica (libros, papers, journals, revistas, ponencias, conferencias, tesis, entre otras) en bases de datos especializadas, de los diferentes métodos o técnicas/algoritmos de optimización heurística y metaheurística, existentes en la actualidad y empleados en el diseño de puentes en concreto.
- Identificar las funciones objetivo, los parámetros y las restricciones más empleadas, en la optimización heurística y metaheurística, en el diseño de puentes en concreto.
- Identificar y analizar las conclusiones a que se han llegado, en los diferentes estudios de optimización heurística y metaheurística, en el diseño de puentes en concreto.

1.3 ALCANCE

El presente trabajo buscar revisar el uso de los métodos o técnicas/algoritmos de optimización heurística y metaheurística, en el diseño de puentes en concreto, en

los últimos 30 años (1990-2020). Se plantea revisar los documentos que cumplan los siguientes requisitos:

- Que tengan como referencia cualquier combinación o anidación de las siguientes palabras clave: puentes (Bridge), concreto (concrete), reforzado (reinforced), pretensado (prestressed), postensado (post-tensioned), optimización (optimization), heurísticas (heuristics), metaheurísticas (metaheuristics).
- Que contemplen procesos de optimización mediante técnicas heurísticas y metaheurísticas, en el diseño o en el ciclo de vida de puentes en concreto (reforzado, pretensado, postensado, prefabricado).

1.4 METODOLOGÍA

- Búsqueda y/o recolección de información: Se realiza la búsqueda de documentos (libros, papers, journals, revistas, ponencias, conferencias, tesis, entre otras) en las siguientes bases de datos académicas especializadas: Science Direct¹, Scopus², Science Research³, World Wide Science⁴, Doaj⁵, Scielo⁶, Redalyc⁷, Dialnet⁸, Google académico⁹, Teseo¹⁰ y Research Gate¹¹.

¹ <https://www.sciencedirect.com/>

² <https://www.scopus.com/home.uri>

³ <https://www.scienceresearch.com/scienceresearch/desktop/en/search.html>

⁴ <https://worldwidescience.org/>

⁵ <https://doaj.org/>

⁶ <https://scielo.org/es/>

⁷ <https://www.redalyc.org/>

⁸ <https://dialnet.unirioja.es/>

⁹ <https://scholar.google.es/schhp?hl=es>

¹⁰ <https://www.educacion.gob.es/teseo/irGestionarConsulta.do>

¹¹ <https://www.researchgate.net/>

- Lectura y organización de información: Se realiza la lectura de los documentos encontrados, priorizando los provenientes de revistas indexadas con alto factor de impacto (SJR), según Scimago¹² y creando una tabla de bibliografía referida.
- Escritura de documento: Una vez leída, analizada, procesada y organizada la información, se procede a la escritura en forma secuencial, de cada uno de los capítulos que conforman la monografía.

Se tiene planteada, la siguiente estructura del documento:

-Introducción.

-Resumen de la investigación.

-Capítulo 1: Objetivos, alcance y metodología de la investigación.

-Capítulo 2: Análisis bibliométrico de la aplicación de métodos/técnicas heurísticas y metaheurísticas en el diseño de puentes en concreto.

-Capítulo 3: Métodos/técnicas heurísticas y metaheurísticas.

-Capítulo 4: Aplicación de métodos/técnicas heurísticas y metaheurísticas en el diseño de puentes en concreto.

-Capítulo 5: Conclusiones.

-Capítulo 6: Recomendaciones.

-Bibliografía.

-Apéndice: Tabla bibliográfica referida.

¹² <https://www.scimagojr.com/>

2. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS/TÉCNICAS HEURÍSTICAS Y METAHEURÍSTICAS EN EL DISEÑO DE PUENTES EN CONCRETO

Para realizar el análisis bibliométrico de los métodos o técnicas de optimización heurística y metaheurísticas, empleados en el diseño de puentes, se recurre a las bases de datos especializadas: Science Direct¹³, Scopus¹⁴, Science Research¹⁵, World Wide Science¹⁶, Doaj¹⁷, Scielo¹⁸, Redalyc¹⁹, Dialnet²⁰, Google académico²¹, Teseo²² y Research Gate²³.

Al realizar la búsqueda en las bases de datos anteriormente mencionadas, entre los años 1990 y 2019, con los siguientes parámetros/palabras clave: bridges AND concrete AND heuristic or metaheuristic²⁴, se obtienen los siguientes resultados:

¹³ Science Direct, es una base de datos científica que proporciona el acceso a más de 16 millones de artículos, 2,500 revistas, 39,000 libros y 330,000 páginas temáticas, organizadas en las siguientes secciones: Ciencias físicas e ingeniería, ciencias de la vida, medicina, ciencias sociales y humanidades (<https://www.sciencedirect.com/>).

¹⁴ Scopus, es una base de datos científica que cubre aproximadamente 18,000 títulos de más de 5,000 editores internacionales, incluyendo más de 16,500 revistas revisadas por pares, organizadas en las siguientes áreas: Ciencias, tecnología, medicina, ciencias sociales, artes y humanidades (<https://www.scopus.com/home.uri>).

¹⁵ Science Research, es una base de datos científica organizada en las siguientes categorías: Ciencias de la agricultura, astronomía y espacio, biología y naturaleza, química, computación y tecnología, tecnologías de defensa, ciencias de la tierra, ciencias ambientales, energía, salud y medicina, ciencias de los materiales, matemáticas, física, patentes y noticias científicas (<https://www.scienceresearch.com/scienceresearch/desktop/en/search.html>).

¹⁶ World Wide Science, es un portal que agrupa bases de datos y portales de ciencia a nivel mundial, en diferentes idiomas (inglés, francés, ruso, chino, japonés, alemán, entre otros) (<https://worldwidescience.org/>).

¹⁷ Directory of Open Access Journals (DOAJ), es un directorio que lista revistas científicas de acceso libre, revisadas por pares académicos y con altos estándares de calidad (<https://doaj.org/>).

¹⁸ Scientific Electronic Library Online (Scielo), es una biblioteca electrónica que permite la publicación libre de ediciones completas de revistas científicas en todas las áreas del conocimiento (<https://scielo.org/es/>).

2.1. DOCUMENTOS PÚBLICADOS

Se encontraron 44 documentos (41 artículos científicos, 2 tesis doctorales y 1 libro) relacionados con el uso de los métodos de optimización heurísticos y/o metaheurísticos, en el diseño o en el análisis del ciclo de vida de puentes en concreto, los cuales se presentan en la tabla No.1:

Tabla No. 1. Listado de documentos publicados, relacionados con el uso de técnicas de optimización heurística y/o metaheurística, en el diseño de puentes en concreto.

Id	Título	Autores	Año	Tipo de puente	Método optimización
1	Plane frame optimum design environment based on genetic algorith	Jenkins, W.	1992	Atirantado	Algoritmos genéticos
2	Multiobjective optimization of prestressed concrete structures	Lounis, Z., & Cohn, M.	1993	Losa maciza	Búsqueda por gradiente- Algoritmo Lagrangiano

¹⁹ La Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal (Redalyc), es un portal de difusión de acceso abierto de la actividad científica editorial a nivel mundial. Cuenta con una base de datos de 1304 revistas científicas, 48,512 fascículos y más de 600,000 artículos disponibles a texto completo (<https://www.redalyc.org/>).

²⁰ Dianlet, es un portal de difusión de la producción científica hispana que incluye libros, monografías, tesis de maestría y tesis doctorales. Cuenta con 10,175 revistas, 5,966.417 documentos y 140,924 tesis, en diferentes áreas del conocimiento. (<https://dialnet.unirioja.es/>).

²¹ Google Scholar, es un buscador de Google enfocado y especializado en la búsqueda de contenido y bibliografía científico-académica. En sus bases de datos se puede encontrar libros, artículos científicos, comunicaciones y congresos, informes científico-técnicos, tesis, tesinas y archivos depositados en repositorios, en todas las áreas del conocimiento (<https://scholar.google.es/schhp?hl=es>).

²² Teseo, es un repositorio de tesis doctorales defendidas en las universidades Españolas desde el año 1976 (<https://www.educacion.gob.es/teseo/irGestionarConsulta.do>).

²³ ResearchGate, es una red social en internet y una herramienta de colaboración dirigida a personas que hacen ciencia en cualquier disciplina. La plataforma ofrece acceso a búsqueda semántica de artículos de revistas científicas, en una base de datos con más de 35 millones de registros (<https://www.researchgate.net/>).

²⁴ También se realizaron búsquedas con la anidación de los siguientes parámetros/palabras clave: bridges AND concrete AND reinforced AND heuristic OR metaheuristic, bridges AND concrete AND prestressed AND heuristic OR Metaheuristic, bridges AND post-tensioned AND heuristic OR metaheuristic.

Id	Título	Autores	Año	Tipo de puente	Método optimización
3	Computer-aided design of prestressed concrete cellular bridge decks	Lounis, Z., & Cohn, M.	1995	Losa aligerada	Búsqueda por gradiente- Algoritmo Lagrangiano
4	Maintenance strategy optimization of bridge decks using genetic algorithm	Liu, C., & Hammad, A.	1997	Losa maciza	Algoritmos genéticos
5	Multiobjective Optimization of Bridge Deck Rehabilitation Using Genetic Algorithm	Liu, C., & Hammad, A.	1997	Losa maciza	Algoritmos genéticos
6	Bridge management system and maintenance optimization for existing bridges	Miyamoto, A., Miyamoto, A., & Nakamura, H.	2000	Todos	Algoritmos genéticos
7	Cost Optimization of Prestressed Concrete Bridges	Sirca, G., & Adeli, H.	2005	Viga I	Redes neuronales
8	Optimum design of the box frame tunnel of the underground line Palma - UIB.	de Dios, C., Alcalá, J., Yepes, V., & González-Vidosa, F.	2006	Box culvert-tunnel	Recocido simulado- Aceptación por umbrales
9	Optimizing bridge network maintenance management under uncertainty with conflicting criteria: Life-cycle maintenance, failure, and user costs	Liu, M., & Frangopol, D.	2006	Losa maciza	Algoritmos genéticos
10	Bridge network maintenance optimization using stochastic dynamic programming	Frangopol, D., & Liu, M.	2007	Todos	Algoritmos genéticos- Simulaciones de Montecarlo
11	GA-based algorithm for selecting optimal repair and rehabilitation methods for reinforced concrete (RC) bridge decks	Lee, C., & Kim, S	2007	Losa maciza	Algoritmos genéticos
12	Ant colony optimization of reinforced concrete bridge piers of rectangular hollow section	Martínez, F., Yepes, V., Hospitaler, A., & González-Vidosa	2007	Sección cajón	Colonia de hormigas
13	Optimization of Reinforced Concrete Structures by Simulated Annealing	González-Vidosa, F., Alcalá, J., Carrera, M., Payá-	2008	Viga I	Recocido simulado

Id	Título	Autores	Año	Tipo de puente	Método optimización
14	Design of reinforced concrete bridge frames by heuristic optimization	Zaforteza, I., & Yepes, V. Perea, C., Alcalá, J., Yepes, V., González-Vidosa, F., & Hospitaler, A.	2008	Box culvert-tunnel	Recocido simulado-Aceptación por umbrales
15	Optimización heurística económica de tableros de puentes losa prestensados	Alcalá, J.	2009	Losa aligerada	Recocido simulado
16	Effect of cumulative seismic damage and corrosion on the life-cycle cost of reinforced concrete bridges	Kumar, R., Gardoni, P., & Sanchez-Silva, M.	2009	Todos	Algoritmo genéticos-Simulaciones de montecarlo
17	Framework for multiobjective optimization of launching girder bridges	Marzouk, M., Said, H., & El-said, M.	2009	Sección cajón	Colonia de hormigas
18	Optimum topology and shape design of prestressed concrete bridge girders using a genetic algorithm	Aydin, Z., & Ayvaz, Y.	2010	Viga I	Algoritmos genéticos
19	Overall cost optimization of prestressed concrete bridge using genetic algorithm	Aydin, Z., & Ayvaz, Y.	2010	Viga I	Algoritmos genéticos
20	Cable optimization of a long span cable stayed bridge in la Coruña (Spain)	Baldomir, A., Hernández, S., Nieto, F., & Jurado, A.	2010	Atirantado	Algoritmos genéticos
21	Diseño óptimo de tableros isostáticos de vigas artesas prefabricadas pretensadas	Martí Albiñana, J. V.	2010	Sección cajón	Recocido simulado-Aceptación por umbrales
22	Design of prestressed concrete precast pedestrian bridges by heuristic optimization	Martí, J., & González-Vidosa, F.	2010	Sección cajón	Recocido simulado-Aceptación por umbrales
23	Heuristic Optimization of RC Bridge Piers with Rectangular Hollow Sections	Martínez, F., González-Vidosa, F., Hospitaler, A., & Yepes, V.	2010	Sección cajón	Colonia de hormigas-Algoritmos genéticos
24	Multi-Multiobjective optimization design of bridge piers with hybrid heuristic algorithms	Martínez-Martín, F., González-Vidosa, F.,	2010	Sección cajón	Recocido simulado-Algoritmos genéticos

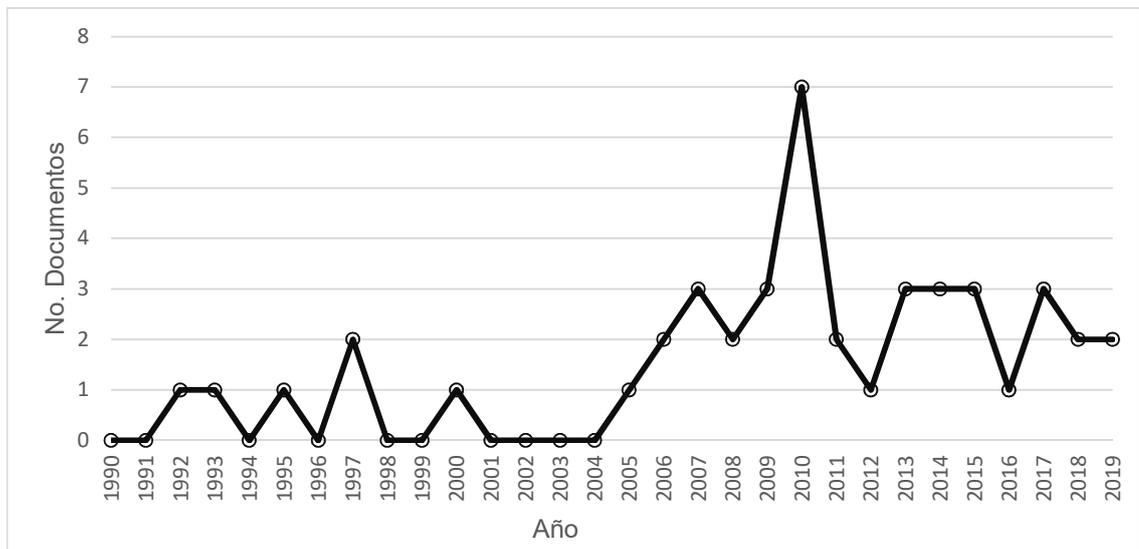
Id	Título	Autores	Año	Tipo de puente	Método optimización
25	Ambient vibration testing and updating of the finite element model of a simply supported beam bridge	González-Vidosa, F., & Yepes, V. Araujo, I., Maldonado, E., & Cho, G.	2011	Viga I	Algoritmos genéticos
26	Genetic Algorithms-based Optimization of Cable Stayed Bridges	Lute, V.	2011	Atirantado	Algoritmos genéticos
27	Cost Optimum Design of Posttensioned I-Girder Bridge Using Global Optimization Algorithm	Ahsan, R., Rana, S., & Ghani, N.	2012	Viga I	EVOP
28	Life-cycle cost optimization of prestressed simple-span concrete bridges with simple and spliced girders	Madhkhan, M., Kianpour, A., & Harchegani, M.	2013	Viga I	Reencadenamiento de trayectorias-Dirección factible
29	Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing	Martí, J., Yepes, V., González-Vidosa, F., & Alcalá, J.	2013	Sección cajón	Recocido simulado-Algoritmos genéticos
30	A parametric study of piers for motorway bridge viaducts	Martínez, F., Gozález-Vidosa, F., Hospitaler, A., & Yepes, V.	2013	Sección cajón	Colonia de hormigas
31	Optimization of concrete I-beams using a new hybrid glowworm swarm algorithm	Alcalá, J., Martí, J., Yepes, V., & García-Segura	2014	Viga I	Recocido simulado-luciérnagas
32	Optimization of Life-Cycle Maintenance of Deteriorating Bridges with Respect to Expected Annual System Failure Rate and Expected Cumulative Cost	Barone, G., Frangopol, D., & Soliman, M.	2014	Viga I	Algoritmos genéticos
33	Diseño automático de tableros óptimos de puentes de carretera de vigas artesa prefabricadas mediante algoritmos meméticos híbridos	Martí, J., Yepes, V., González-Vidosa, F., & Luz, A.	2014	Sección cajón	Memético

Id	Título	Autores	Año	Tipo de puente	Método optimización
34	Diseño de estribos abiertos en puentes de carretera obtenidos mediante optimización híbrida de escalada estocástica	Luz, A., Yepes, V., & González-Vidosa, F.	2015	Viga I	Recocido simulado-Aceptación por umbrales
35	Memetic Algorithm Approach to Designing Precast-Prestressed Concrete Road Bridges with Steel Fiber Reinforcement	Martí, J., Yepes, V., & González-Vidosa, F.	2015	Sección cajón	Memético
36	Cost and CO2 emission optimization of precast-prestressed concrete U-beam road bridges by a hybrid glowworm swarm algorithm	Yepes, V., Martí, J., & García-Segura, T.	2015	Sección cajón	Recocido simulado-luciérnagas
37	Structural design of precast-prestressed concrete U-beam road bridges based on embodied energy	Martí, J., García-segura, T., & Yepes, V.	2016	Sección cajón	Recocido simulado-Algoritmos genéticos
38	Lifetime reliability-based optimization of post-tensioned box-girder	Frangopol, D., Yang, D., García-Segura, T., & Yepes, V.	2017	Sección cajón	Búsqueda armónica
39	Layout and size optimization of suspension bridges based on coupled	Hongyou, C., Xudong, Q., Zhijun, C., & Hongping, Z.	2017	Colgante	Búsqueda enjambre PSO
40	Design optimization of precast-prestressed concrete road bridges whith steel fiber-reinforcement by a hybrid evolutionary algorithm	Yepes, V., Martí, J., & García-Segura, T.	2017	Sección cajón	Algoritmos genéticos
41	Embodied Energy Optimization of Prestressed Concrete Slab Bridge Decks	Alcalá, J., González-Vidosa, F., Yepes, V., & Martí, J.	2018	Losa aligerada	Recocido simulado
42	An optimization-LCA of a prestressed Concrete	Penadés-Plá, V., Gracia-Segura, T., Martí, J., & Yepes, V.	2018	Sección cajón	Memético
43	Structural optimization of concrete arch bridges using Genetic	Mostafa, A., Mohamed, E., & Mostafa, S.	2019	Arco	Algoritmos genéticos

Id	Título	Autores	Año	Tipo de puente	Método optimización
44	Accelerated optimization method for low-embodied energy concrete boxgirder	Penadés Plá, V., García, T., & Yepes, V.	2019	Sección cajón	Recocido simulado-Kriging

Fuente: “Elaboración propia”.

Figura No. 1. Histograma de publicaciones, relacionados con el uso de técnicas de optimización heurística y/o metaheurística, en el diseño de puentes en concreto.



Fuente: “Elaboración propia”.

La figura No.1 muestra la evolución en el interés, por los temas de optimización en puentes en concreto; en dicha gráfica se distinguen 2 periodos, según (Marmaneu, 2016):

- **Evolución-El desarrollo (1990-2009):** Con el auge de las computadoras y la inteligencia artificial, y el fácil acceso a estas herramientas; la investigación en este campo tiene una dinámica exponencial en crecimiento de estudios y publicación de resultados en las diferentes revistas a nivel mundial. Desde 1997,

se inicia la inclusión de estudios, sobre optimización de mantenimiento de puentes, con el fin de alargar su vida útil.

- **Evolución-El auge (2010-2019):** A partir del 2010, se produce un auge en la producción de artículos, aparecen nuevos grupos de investigación, que trabajan en temas relacionados con la optimización de puentes en concreto, y hay desarrollos notables en la compilación de algoritmos híbridos²⁵ metaheurísticos, que reducen apreciablemente los tiempos de cómputo y la generación de resultados.

2.2. REVISTAS CON MAYOR NÚMERO DE PUBLICACIONES

La tabla No.2 y la figura No. 2, muestran las 17 revistas, en donde se encontró artículos relacionados, con el uso de técnicas de optimización heurísticas y metaheurísticas, en el diseño de puentes en concreto. Se destaca lo siguiente:

- Todas las revistas se encuentran indexadas y clasificadas por encima del cuartil 2 (53% en Q1 y 47% en Q2) , según el índice SJR²⁶ de SCimago²⁷ (2018) . Lo anterior asegura que las publicaciones encontradas son de alto nivel científico y de alto impacto.
- El 88% de las revistas son publicadas en inglés y el 12% en español.

²⁵ Algoritmos híbridos: combinación de varias técnicas heurísticas o metaheurísticas, para mejorar el tiempo de búsqueda de soluciones factibles de un problema de optimización.

²⁶ SCimago jornal Rank, es una medida de la influencia o impacto de las revistas académicas en el campo científico.

²⁷ <https://www.scimagojr.com/>

- el 23% de las revistas son de origen estadounidense, seguido por un 12% de origen suizo, un 12% de origen español, un 12% de origen inglés y un 12% de países bajos.
- Solo se encuentra una revista de origen latinoamericano posicionada en el tema (Latin American Journal of Solids and Structures-Brasil).
- La revista que más publicaciones tiene en el tema es el Journal of Structural Engineering (Estados unidos).

Tabla No. 2.Revistas que presentan artículos, relacionados con el uso de técnicas de optimización heurísticas y metaheurísticas, en el diseño de puentes en concreto.

Id	Revista/Editorial	Sigla	País	Idioma	Área/Temática	Q *	SJR **	No.D ***
1	Journal of Structural Engineering ²⁸	JSE	Estados Unidos	Inglés	Construcción, ingeniería estructural, ingeniería mecánica y mecánica de materiales	Q1	1.90	9
2	Engineering Structures ²⁹	ES	Suiza	Inglés	Construcción e ingeniería estructural	Q2	0.36	3
3	Advances in Engineering Software ³⁰	AES	Inglaterra	Inglés	Ingeniería	Q1	1.0	2
4	Automation in Construction ³¹	AC	Países bajos	Inglés	Construcción, ingeniería estructural, control e ingeniería de sistemas	Q1	1.41	2

²⁸ <https://ascelibrary.org/journal/jsendh>

²⁹ <https://www.journals.elsevier.com/engineering-structures>

³⁰ <https://www.journals.elsevier.com/advances-in-engineering-software>

³¹ <https://www.journals.elsevier.com/automation-in-construction>

Id	Revista/Editorial	Sigla	País	Idioma	Área/Temática	Q *	SJR **	No.D ***
5	Ain Shams Engineering Journal ³²	ASEJ	Egipto	Inglés	Ingeniería	Q1	0.47	1
6	Sustainability ³³	SY	Suiza	Inglés	Planeación, monitoreo, políticas y leyes en energía Ingeniería estructural, ingeniería mecánica,	Q2	0.55	1
7	Computers and Structures ³⁴	CE	Inglaterra	Inglés	ingeniería de materiales, modelación y simulación matemática	Q1	1.54	1
8	Earthquake Engineering and Structural Dynamics ³⁵	EES D	Estados unidos	Inglés	Ciencias planetarias, ingeniería geotécnica e ingeniería civil	Q1	2.78	1
9	Informes de la construcción ³⁶	IC	España	Español	Arquitectura, construcción e ingeniería estructural	Q2	0.24	1
10	Iranian Journal of Science and Technology ³⁷	IJST	Irán	Inglés	Ingeniería	Q2	0.22	1
11	Journal of Cleaner Production ³⁸	JCP	Países bajos	Inglés	Ingeniería, energía, sostenibilidad e ingeniería ambiental	Q1	1.62	1
12	Journal of Construction Engineering and Management ³⁹	JCE M	Estados Unidos	Inglés	Construcción e ingeniería estructural	Q1	1.04	1

³² <https://www.journals.elsevier.com/ain-shams-engineering-journal>

³³ <https://www.mdpi.com/journal/sustainability>

³⁴ <https://www.sciencedirect.com/journal/computers-and-structures>

³⁵ <https://onlinelibrary.wiley.com/loi/10969845>

³⁶ <https://editorial.csic.es/publicaciones/revista/20/1/10/informes-de-la-construccion.html>

³⁷ <https://www.springer.com/journal/40998>

³⁸ <https://www.journals.elsevier.com/journal-of-cleaner-production>

³⁹ <https://ascelibrary.org/journal/jcemd4>

Id	Revista/Editorial	Sigla	País	Idioma	Área/Temática	Q *	SJR **	No.D ***
13	Journal of Transport ⁴⁰	JL	Estados Unidos	Inglés	Ingeniería y transporte	Q2	0.81	1
14	Zhejiang Journal of University ⁴¹	JZU	China	Inglés	Ingeniería	Q2	0.21	1
15	Latin American Journal of Solids and Structures ⁴²	LAJSS	Brasil	Inglés	Ingeniería civil, ingeniería mecánica, ingeniería de materiales e ingeniería aeroespacial	Q2	0.47	1
16	Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño en Ingeniería ⁴³	MNC DI	España	Español	Ingeniería y matemáticas aplicadas	Q2	0.21	1
17	Structural and Multidisciplinary Optimization ⁴⁴	SMO	Alemania	Inglés	Ingeniería, ciencias de la computación y matemáticas	Q1	1.84	1

Q: Quartil Scimago Journal Rank 2018.

SJR: Scimago Journal Rank, 2018

No.D: Número de documentos publicados periodo 1990-2019

Fuente: "Elaboración propia".

⁴⁰ <https://www.witpress.com/journals/tdi>

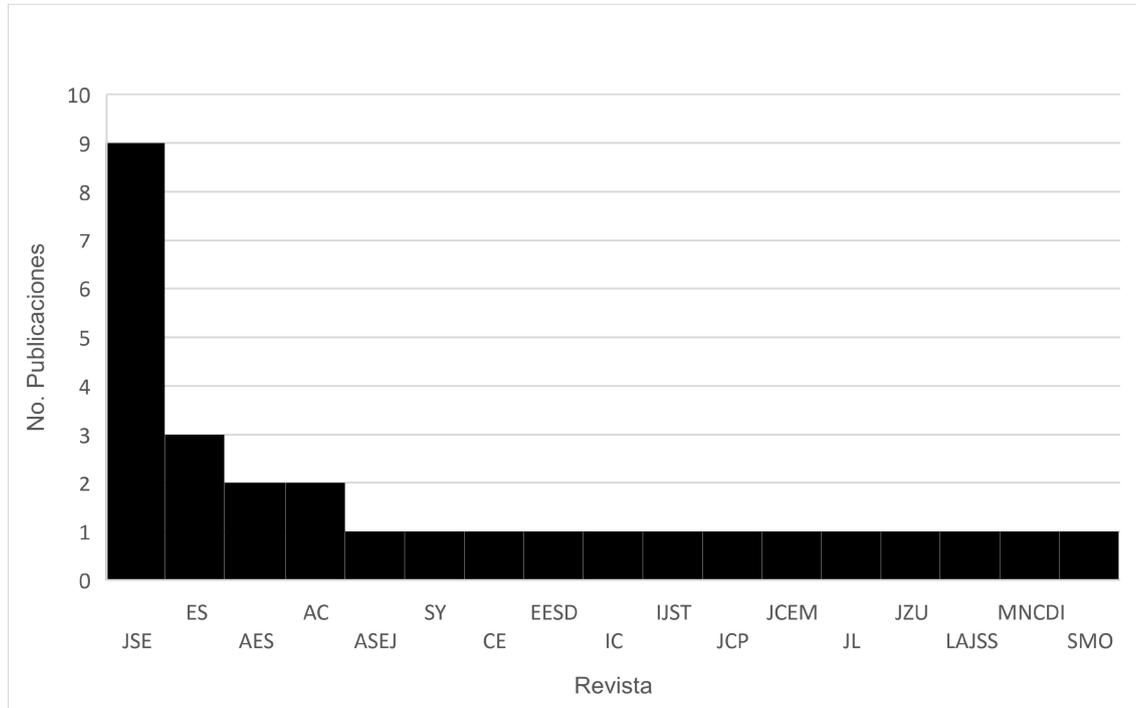
⁴¹ <https://www.springer.com/journal/11582>

⁴² <https://www.lajss.org/index.php/LAJSS>

⁴³ <https://www.sciencedirect.com/journal/revista-internacional-de-metodos-numericos-para-calculo-y-diseno-en-ingenieria>

⁴⁴ <https://www.springer.com/journal/158>

Figura No. 2. Diagrama de publicaciones de revistas, relacionadas con el uso de técnicas de optimización heurística y/o metaheurística, en el diseño de puentes en concreto.



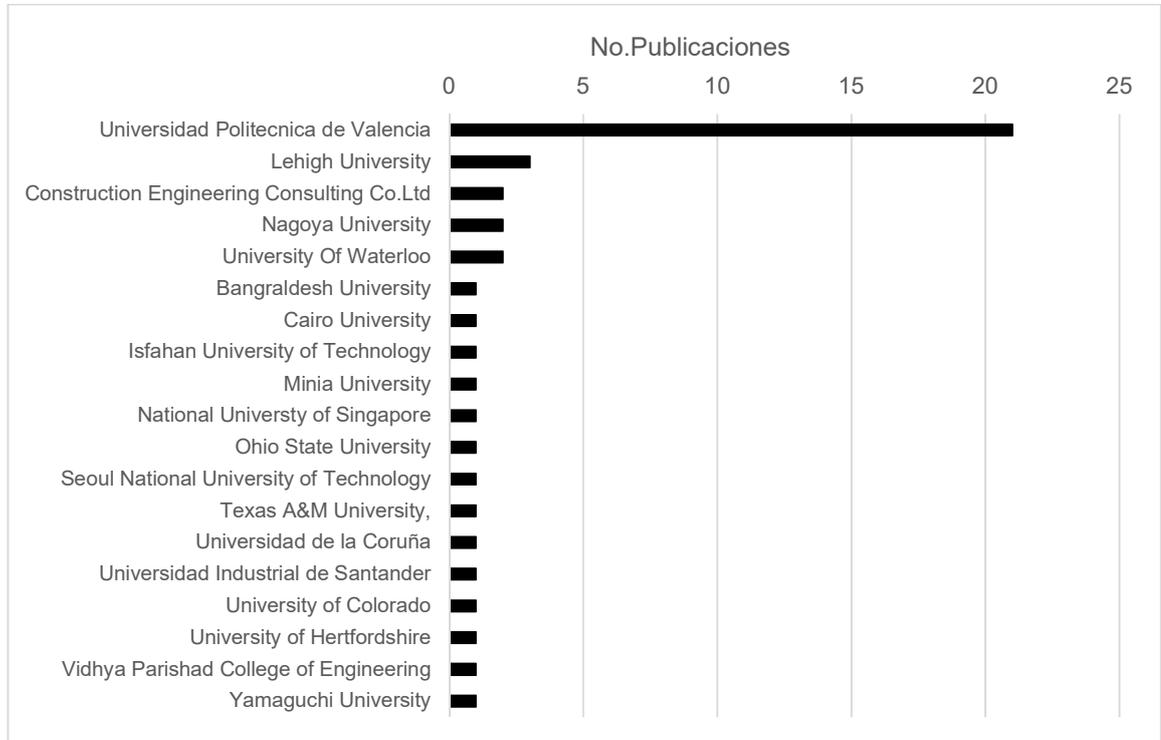
Nota: Ver en tabla No.2 los nombres y siglas de las revistas.

Fuente: "Elaboración propia".

2.3. ENTIDADES CON MAYOR NÚMERO DE PUBLICACIONES

En la figura No.3, se deduce que las universidades que lideran las publicaciones sobre optimización en puentes, son: las Españolas, Estadounidenses y Chinas. En este caso, se encontró una baja participación de universidades latinoamericanas en el tema.

Figura No. 3. Documentos publicados por entidad/filiación, relacionados con el uso de técnicas de optimización heurística y/o metaheurística, en el diseño de puentes en concreto.



Fuente: “Elaboración propia”.

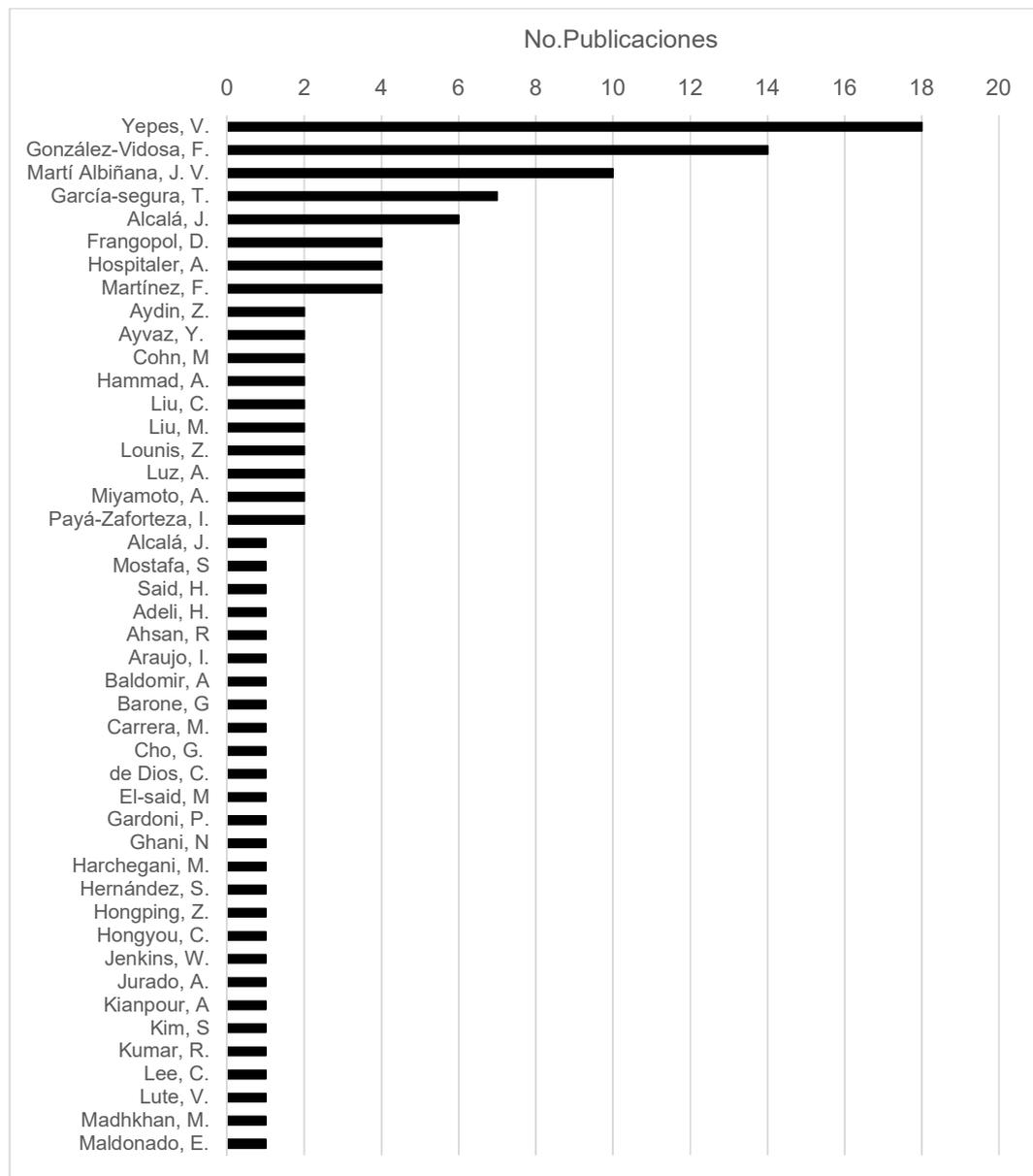
2.4. AUTORES CON MAYOR NÚMERO DE PUBLICACIONES

En la figura No.4, se puede apreciar que los líderes en las publicaciones sobre optimización heurística y/o metaheurística, en el diseño de puentes, son: Víctor Yepes Piqueras y Fernando González Vidosa , ambos de la Universidad Politécnica de Valencia (España), seguidos por Dam Micea Frangopol, de la Universidad de Lehigh (Estados unidos)⁴⁵. Vale la pena señalar que Jose Martí, Tatiana García Segura, Julián Alcalá y Antonio Hospitaler, hacen parte también de la universidad

⁴⁵ Antes profesor en University of Colorado

Politécnica de Valencia (España). En este caso, entre los primeros 10 autores, no se encuentra ningún autor latinoamericano, con publicaciones de alto impacto en el tema.

Figura No. 4. Documentos publicados por autor, relacionados con el uso de técnicas de optimización heurística y/o metaheurística, en el diseño de puentes en concreto.

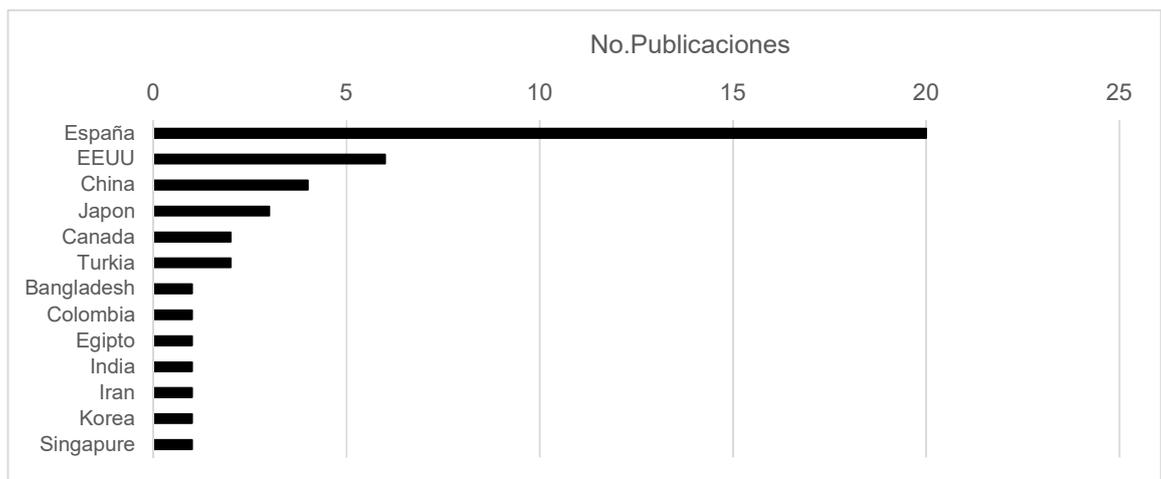


Fuente: "Elaboración propia".

2.5. PAISES CON MAYOR NÚMERO DE PUBLICACIONES

La figura No.5, muestra que los países que lideran las publicaciones en el área de optimización heurística y/o metaheurística de puentes en concreto, son: España, Estados Unidos, China y Japón. Por parte de Colombia, solo se encontró dos documentos relacionados con el tema: Effect or cumulative seismic damage and corrosión on the life-cycle cost of reinforced concrete bridges⁴⁶ (Kumar, Gardoni, & Sanchez-Silva, 2009) y Ambient vibration testing updating of the finite element model of a simply supported beam bridge⁴⁷ (Araujo, Maldonado, & Cho, 2011).

Figura No. 5. Documentos publicados por país, relacionados con el uso de técnicas de optimización heurística y/o metaheurística, en el diseño de puentes en concreto



Fuente: “Elaboración propia”.

⁴⁶ El artículo describe una metodología para la optimización del costo del ciclo de vida (costos de mantenimiento) de un puente en concreto reforzado, mediante simulaciones de Montecarlo y teniendo en cuenta como variables principales los daños acumulados por sismo y la corrosión en el acero. Lo anterior bajo la restricción principal de una confiabilidad mínima del 75% en el desempeño de la estructura.

⁴⁷ El artículo describe la calibración experimental de las características dinámicas de un puente en concreto postensado (frecuencia natural, modos de vibración y amortiguamiento), empleando la vibración ambiental (excitación por cargas de viento, tráfico y sismos), los algoritmos genéticos (minimización del error entre la respuesta del modelo analítico y el modelo experimental) y el método de elementos finitos (actualización del modelo estructural de diseño).

3. MÉTODOS/TÉCNICAS HEURÍSTICAS Y METAHEURÍSTICAS

Los métodos/técnicas de optimización⁴⁸ nacen de la investigación operativa con apoyo de la inteligencia artificial, con el objetivo de buscar la “solución óptima” a los problemas complejos de administración y, de organización y control; que se producen en los sistemas naturales o en los sistemas creados por el ser humano⁴⁹, para el apoyo en la toma de decisiones (Esmoris, 2013).

3.1 OPTIMIZACIÓN

Se define como un problema de optimización, aquel que tiene diversas soluciones factibles de resolución, representado matemáticamente de la siguiente forma (Gallego Rendón, Toro Ocampo, & Escobar Zuluaga, 2015):

$$\left\{ \begin{array}{l} \textit{Optimizar una función objetivo} \\ \textit{Sujeta a (s. a):} \\ \textit{un conjunto de restricciones} \end{array} \right.$$

Ecuación No. 1

Cuando es posible expresar el problema con relaciones matemáticas simples, se puede representar de la siguiente forma:

⁴⁸ La optimización es el “arte” de elegir la mejor alternativa dentro de un conjunto de opciones válidas. Científicamente, se puede definir como objetivo de la optimización a la búsqueda de los valores de un conjunto de variables que maximizan o minimizan funciones objetivo bajo algunas, imitaciones o restricciones (Gallego Rendón, Toro Ocampo, & Escobar Zuluaga, 2015).

⁴⁹ Sistemas organizacionales, sistemas físicos, sistemas económicos, sistemas ecológicos, sistema de educación, sistemas de servicio social, sistemas políticos, sistemas de ingeniería y/o tecnología, entre otros.

$$\begin{cases} \min / \max f(x) \\ \text{s. a:} \\ g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, m \\ h_i(x) = 0 \quad i = 1, \dots, m \\ x \geq 0 \end{cases}$$

Ecuación No. 2

Donde:

$f(x)$: Función objetivo a minimizar o maximizar.

$g_i(x) \leq 0$: Restricciones que limitan el espacio solución del problema (S).

$h_i(x) = 0$: Restricción de igualdad que limita el espacio solución del problema (S).

De una manera más compacta, se puede escribir:

$$\begin{cases} \min / \max f(x) \\ \text{s. a:} \\ x \in S \end{cases}$$

Ecuación No. 3

Con respecto a los expresado en las ecuaciones 1,2 y 3, se tiene las siguientes definiciones básicas:

Función objetivo: Es la medida cuantitativa del rendimiento del sistema a optimizar (Maximizar o minimizar).

Variables: Representan las decisiones/estados/valores y/o magnitudes que se pueden tomar para evaluar la función objetivo. Se clasifican como independiente o dependientes y están restringidas por el espacio de búsqueda (s).

Parámetros: Valores que son invariantes en el proceso de optimización (no son sujetas a optimización).

Restricciones: Representan el conjunto de relaciones que las variables están obligadas a cumplir. Forman el espacio de búsqueda o el espacio solución del problema (S).

Espacio de búsqueda/espacio de solución del problema (s): Es la región formada por la intersección/combinación de las diferentes restricciones del problema. Forman el espacio factible de soluciones.

3.2. COMPLEJIDAD EN LOS PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN

Según Gallego Rendón, Toro Ocampo, & Escobar Zuluaga (2015), Cuando se quiere resolver un problema de optimización, se tienen diversas dificultades relacionada a su complejidad, de la siguiente manera:

- Complejidad descriptiva: Relacionada con el volumen de información que se debe suministrar, para tener una descripción suficiente del sistema a modelar.
- Complejidad generativa: Relacionada con la cantidad de instrucciones que se deben generar, para construir el sistema a modelar.
- Complejidad computacional: Relacionada con la cantidad de tiempo y con el esfuerzo computacional implicado en la solución del problema.
- Complejidad constitutiva: Relacionada con los componentes o la cantidad de elementos que conforman el sistema.
- Complejidad de heterogeneidad: Relacionada con la variedad o los diferentes tipos de elementos constitutivos.

- Complejidad organizacional: Relacionada con la variedad de formas de ordenamiento, de los componentes del sistema para interrelacionarlos entre ellos.
- Complejidad Jerárquica: Grado de elaboración de las relaciones, entre los subsistemas que conforma el sistema de interés.
- Complejidad operativa: Variedad de modos de operación o tipos de funcionamiento de los componentes del sistema y del propio sistema.
- Complejidad Nómica: Grado de elaboración e intrincación de las leyes que gobiernan los fenómenos asociados al funcionamiento del sistema.
- Complejidad matemática y computacional: Los problemas combinatoriales, los cuales tienen 2^n soluciones⁵⁰ (soluciones factibles a evaluar); según Consoli & Darby-Dowman (2006), pueden ser divididos en dos grandes grupos, de acuerdo al esfuerzo computacional requerido :

Problema tipo P: para los cuales existen algoritmos con esfuerzo computacional polinomial, para encontrar la solución óptima.

Problema tipo NP: para los cuales no se conocen algoritmos con esfuerzo computacional de tipo polinomial, para encontrar su solución óptima.

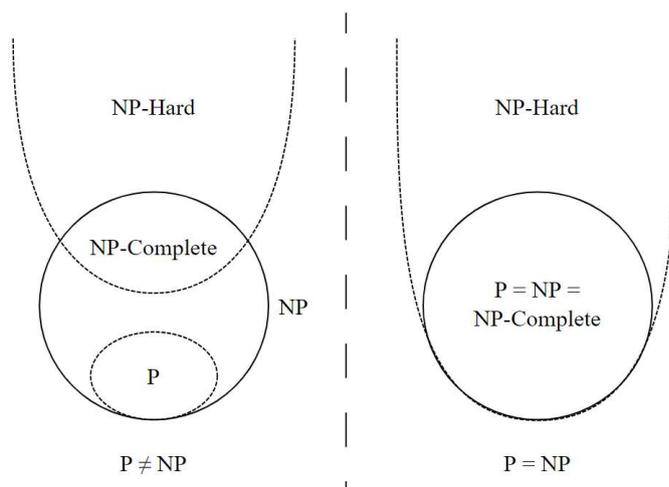
Problema tipo NP-hard: Problemas en NP, para los cuales a través de métodos de reducción, se pueden hallar algoritmos con esfuerzo computacional polinomial, para encontrar la solución óptima.

⁵⁰ Llamada también explosión combinatoria.

Los problemas NP-completos (sub conjunto de los problemas NP, tal que todo problema NP, se puede reducir a un problema NP-completo), tienen las siguientes características:

- Son problemas computacionalmente complejos de resolver y no se han encontrado algoritmos polinomiales para ello.
- No se ha probado en la teoría de la matemática aplicada, que exista algoritmos polinomiales, para esos problemas.
- Si se pudiese encontrar un algoritmo rápido (polinomial) para un problema NP-completo, entonces deben existir algoritmos rápidos para toda esa clase de problemas.
- Si se prueba que no existe un algoritmo rápido para desarrollar uno de los problemas NP-completos, entonces no existe algoritmos rápidos para ningún problema NP.

Figura No. 6. Diagrama de Euler de las familias de problemas P, NP, NP-completo y NP-hard.



Fuente: Tomada de Cowan (2020).

Los anteriores modos de complejidad, simples están presentes en menor o mayor medida a lo largo del planteamiento y solución del problema o sistema propuesto. La adecuación de un problema matemático al problema real, es un proceso que requiere una investigación robusta, calibración y validación de resultados con modelos físicos reales.

3.3. ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN

Un algoritmo es un conjunto de instrucciones o pasos utilizados para realizar una tarea o resolver un problema. Formalmente, un algoritmo es una secuencia finita de operaciones, cuya actuación ofrece una solución a un problema (Esmorís, 2013).

Se pueden establecer varias clasificaciones de los algoritmos empleados para optimización, de la siguiente forma:

3.1.1. Clasificación de acuerdo a su forma de simular y/o predecir:

Según Álvarez-Valdés & Tamarit (1989), se tiene la siguiente clasificación:

- **Algoritmo determinista:** Un algoritmo es determinista, si al realizar diversas ejecuciones con los mismos valores o magnitudes en las variables, siempre se produce el mismo resultado final.
- **Algoritmo estocástico:** Un algoritmo es estocástico, si al realizar ejecuciones con los mismos valores o magnitudes en las variables, no necesariamente coincide el resultado final (aleatoriedad).

3.1.2. Clasificación de acuerdo a su precisión en el resultado final:

- **Algoritmos exactos:** Algoritmos que siempre encuentran la solución óptima global. Estos algoritmos son aplicables solo a problemas con un número

restringido de variables y restricciones, debido a su alto costo computacional y de tiempo.

- **Algoritmos aproximados:** Algoritmos que encuentran soluciones que están dentro de cierto rango con respecto a la solución óptima global (soluciones sub óptimas). En ocasiones estas soluciones son llamadas óptimas locales. En esta categoría se clasifican entre otros, los métodos heurísticos y metaheurísticos (Barr, Golden, James, Resende, & Stewart, 1995).

3.4. ALGORITMOS HEURISTICOS Y METAHEURISTICOS

3.4.1. Algoritmos heurísticos

Se define como técnicas heurísticas⁵¹ a procedimientos de búsqueda de solución inteligente, basados en la experiencia (Conocimiento experto del problema) de modelos matemáticos reducidos, que permiten encontrar soluciones de buena calidad (cuasi-óptimas) a problemas del tipo NP-completos, con esfuerzos computacionales relativamente bajos (Melián, Moreno, & Moreno, 2003). El término heurística se utiliza en contraposición de exacto, el cual se aplica a algoritmos a los cuales se le exige que encuentre la solución óptima global factible. Las técnicas heurísticas rara vez encuentran la solución óptima factible del problema, solo es posible en problemas de baja complejidad y reducido tamaño (Müller-Mebach, 1981). La premisa fundamental de estos métodos es que las soluciones de alta calidad no se encuentran uniformemente distribuida en el espacio solución, si no

⁵¹ El término heurística proviene del griego Heurikein (hallar, descubrir o encontrar) (Wikipedia, 2020)

que existe una diferenciación entre regiones de alta calidad y baja calidad (las soluciones de buena calidad se encuentran en sub espacios específicos). Las técnicas heurísticas recorren el espacio solución, guiadas por indicadores de sensibilidad, que reconocen los cambios de calidad de las soluciones en el escenario n-dimensional de problema.

De acuerdo a Martí, Pardalos, & Resende (2018), las heurísticas avanzan en cada paso del proceso hacia una solución vecina de mejor calidad y cuando no la encuentran, finalizan el proceso de búsqueda; el anterior procedimiento es llamado búsqueda monótona (creciente o descendente) o algoritmo escalador (hill-climbing). Esta característica conduce el método a zonas absorbentes (óptimos locales), de los cuales no tiene mecanismo de escape, ya que su objetivo es encontrar buenas soluciones, más no la óptima global factible.

Para Gallego Rendón, Toro Ocampo, & Escobar Zuluaga (2015), las heurísticas son útiles en los siguientes problemas de optimización, decisión y/o investigación de operaciones:

- No se conoce modelo matemático en la forma función objetivo y restricciones, para el problema en estudio.
- Existe un modelo matemático para el problema, pero no existe un método o algoritmo exacto para resolverlo.
- Existe un método o algoritmo exacto para resolver el problema, pero su complejidad y tamaño no permite encontrar la solución óptima, en tiempos de computo razonables.

- El problema está débilmente definido, o los datos que se tienen están incompletos o inexactos. Para estos casos es preferible tener una solución sub-óptima de buena calidad, que una solución óptima que no representa al problema que se quiere resolver.
- Los datos utilizados presentan alta incertidumbre (Ej: Problemas de planeación) y se quiere resolver un gran número de escenarios.
- La solución óptima no es importante, desde el punto de vista práctico, porque existe muchos óptimos locales con calidad muy cercana a la solución óptima global.
- Existen limitaciones de tiempo y espacio (Ej: problemas con solución en tiempo real).
- Se requiere un conjunto de soluciones alternativas de buena calidad, en vez de una solución óptima global (Ej: Selección de alternativas con juicio de expertos).
- Se requiere un punto inicial de buena calidad para un método exacto o una técnica metaheurística, con el fin de que el proceso sea más eficiente en tiempo de cómputo y calidad de la solución.
- Se requiere potencializar una técnica metaheurística, adicionando una etapa de mejoría local dentro de un ciclo iterativo, adicional a los mecanismos propios del algoritmo (mejora en la calidad de la solución y reducción de los tiempos de computo).

De acuerdo a Martí, Pardalos, & Resende (2018), los algoritmos heurísticos, pueden clasificarse de la siguiente manera:

- **Algoritmos heurísticos constructivos:** También llamados de paso a paso, consisten en ir agregando, uno a uno e iterativamente, componentes individuales de la solución hasta encontrar la solución factible. El más popular de este método es el llamado algoritmo goloso (greedy).
- **Algoritmos de descomposición y de división:** Los algoritmos de descomposición consisten en la separación del problema en varios sub-problemas (problemas menores), con el fin de simplificar el proceso de solución, sin embargo, este debe hacerse de manera integrada. Los algoritmos de división consisten en separar el problema en varios sub-problemas independientes y la solución del problema se encuentra uniendo las soluciones parciales.
- **Algoritmos de reducción:** Este tipo de algoritmos intentan reducir el tamaño del problema identificando características especiales de las variables (correlación entre variables).
- **algoritmos de manipulación del modelo:** Estos algoritmos usan modelos relajados del modelo ideal y pueden usar la solución del modelo relajado, para ayudar a encontrar la solución del modelo ideal. Generalmente se linealizan restricciones no lineales, se permite temporalmente que las variables enteras puedan asumir valores continuos, se eliminan restricciones poco atractivas, se adicionan restricciones nuevas y atractivas o se eliminan temporalmente restricciones complejas no lineales.

- **Algoritmos de búsqueda usando vecindad:** Estos algoritmos inician el proceso de solución a partir de una solución inicial, generalmente factible y empleando un mecanismo de transición, pasan a una solución vecina de mejor calidad que la solución actual y termina cuando no encuentra una solución vecina de mejor calidad.
- **Heurísticas primales:** Son empleadas cuando se conoce el modelo matemático y este incluye variables enteras. Se relaja la condición de que sean variables enteras, se resuelve el problema con variables continuas y se busca su solución entera cercana, aproximando sus resultados fraccionarios a sus enteros más próximos.
- **Hiperheurísticas:** Las hiperheurísticas son herramientas de alto nivel, que controlan adaptativamente heurísticas de bajo nivel (heurísticas sencillas), para obtener resultados equiparables con heurísticas o metaheurísticas con alto grado de conocimiento del problema.

3.4.2. Algoritmos metaheurísticos

La metaheurística^{52,53} es una estrategia general de diseño que permite usar heurísticas de alto rendimiento, para la solución de problemas complejos, obteniendo mejores resultados que las heurísticas simples o que las hipermetaheurísticas⁵⁴ (Melián, Moreno, & Moreno, 2003).

⁵² El termino combina el prefijo griego “meta” (más allá, nivel superior) y “heurística” (hallar, descubrir, encontrar) (Wikipedia, 2020).

⁵³ Usualmente en la ciencia y la tecnología se maneja indiscriminadamente el termino heurística y metaheurística (Amir-Hosseini, Xin-She, Siamak, & Amir-Hosseini, 2013).

⁵⁴ Depende del conocimiento del problema a desarrollar.

Las metaheurísticas emplean el concepto de vecindad, y a diferencia de las heurísticas, poseen mecanismo que les permiten escapar de las zonas absorbentes (óptimos locales). Estos algoritmos buscan mejores soluciones hasta que cumplan un criterio de parada. Durante el proceso de evaluación de soluciones (transición), el algoritmo almacena la mejor solución encontrada (solución incumbente), la cual es la respuesta una vez se termine el proceso de búsqueda.

Para Gallego Rendón, Toro Ocampo, & Escobar Zuluaga (2015), las siguientes son las características de un algoritmo metaheurísticos:

- Algoritmos paso a paso.
- Algoritmos eficientes en problemas multimodales entre los que existen regiones de alta calidad y baja calidad.
- Adecuado para resolver problemas NP-completos o NP-hard, para los cuales no sea posible utilizar técnicas exactas y que se desee encontrar soluciones sub-óptimas de alta calidad.
- Puede o no pasar a la mejor solución vecina y no finalizan el proceso de búsqueda cuando no hay un mejor vecino. Cuando el algoritmo encuentra únicamente soluciones de peor calidad, con respecto a la solución actual, el algoritmo tiene mecanismos que le permiten continuar el proceso de búsqueda, desplazándose temporalmente hacia soluciones de peor calidad, para escapar de óptimos locales, en el intento de hallar la solución óptima global del problema.
- Poseen tres formas básicas para escapar de los óptimos locales de baja calidad: Reiniciar la búsqueda desde otro punto del espacio de soluciones, modificar la

estructura del entorno del sub-espacio donde se encuentre (entorno variable) o permitir movimientos o transformaciones de la solución de la búsqueda que no sean de mejora.

- Exploran y analizan un conjunto reducido de soluciones del espacio de búsqueda, para que en lo posible, sea encontrada la solución óptima global del problema.
- Pueden ser generales o específicos. Las metaheurísticas específicas son diseñadas para cada problema, empleando toda la información disponible y el conocimiento experto (tienen mejor rendimiento que los algoritmos generales). Las metaheurísticas generales, tienen otro tipo de ventajas, como la sencillez, la adaptabilidad y la robustez de los procedimientos.
- Deben definir la codificación para una solución, la cual depende de la técnica empleada (Ej: para algoritmos genéticos, se sugiere usar codificación binaria).
- Deben especificar la vecindad y el procedimiento para realizar las transiciones, adecuada al método de solución utilizado.
- Dan por finalizado el proceso de búsqueda cuando la solución actual no mejora después de un cierto número de iteraciones.

Martí Albiñana (2010), divide las metaheurísticas en los siguientes subgrupos:

- **Métodos de búsqueda secuencial por entornos:** Estudia el espacio de soluciones mediante la explotación del entorno asociado a una solución de partida. Rastrea una solución mejor a la inicial, mediante movimientos discretos. Este proceso realizado en repetidas ocasiones puede llegar a encontrar soluciones de calidad para el problema planteado.

- **Métodos basados en poblaciones (algoritmos evolutivos):** Partiendo de una población (grupo de soluciones), intenta mejorar buscando mejores poblaciones, en las que puede que destaque un miembro de la misma, el cual es el candidato a encontrar la solución de calidad al problema planteado.
- **Redes neuronales:** Simula las propiedades observadas en sistemas neuronales biológicos.

3.4.3. Métodos de búsqueda secuencial por entornos

A partir de un punto inicial el algoritmo realiza pequeños movimientos⁵⁵ buscando mejores soluciones a la actual (si los movimientos son pequeños la solución final se parecerá a la de partida, si las modificaciones son grandes la nueva solución no se parecerá a la anterior, perdiéndose toda la información) . El conjunto de soluciones definidas o candidatas es el llamado entorno coligado al punto de partida o solución inicial.

- **Búsqueda por gradiente:** Recorriendo el entorno asociado a una solución dada, busca una solución que mejore a la anterior, este proceso se lleva sucesivamente en trayectorias ascendentes (cuando el objetivo es maximizar) o en trayectorias descendentes (cuando el objetivo en minimizar). La calidad de la solución depende del tiempo que se dé para la búsqueda.

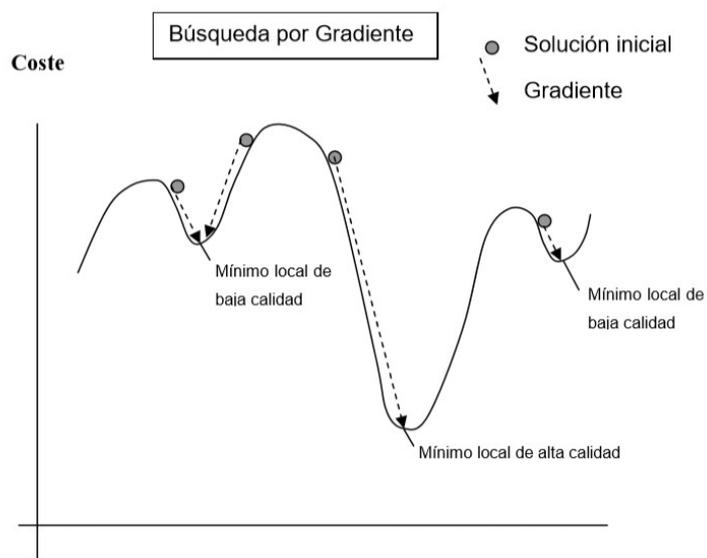
Se pueden emplear dos métodos para aplicar el movimiento:

⁵⁵ Se define el concepto de movimiento de una solución, como la operación de modificar las variables dentro de pequeños intervalos.

-**First Best (FB)**: Se aplica a la primera de las soluciones, sin analizar el resto del entorno

-**Global Best (GB)**: Se selecciona la mejor de todas las soluciones del entorno y se aplica el movimiento.

Figura No. 7. Búsqueda por gradiente.



Fuente: Tomada de Martí Albiñana (2010).

Para resolver la convergencia prematura a soluciones de baja calidad, se han planteado diversas formas que mejoran las técnicas del gradiente, aceptando la degradación estratégica para salvar óptimos locales.

El siguiente es un pseudocódigo general, para la búsqueda por gradiente hill climbing en un espacio discreto (Mohammad, Ahamad, & Makhlof, 2018):

Tabla No. 3.Pseudocódigo Hill Climbing

Paso	Sentencia	Comentarios
1	Begin	Iniciar código
2	Define f(x)	Definir la función objetivo
3	i= solución inicial.	Proponer la solución inicial.
	While f(s)<= f(i) s E Neighbours (i) do	Evaluar la función en s y en i (s debe pertenecer al vecindario de la solución inicial i) y se comparan- se abre el bucle hacer-mientras .
4		
5	Generates an (s) E Neighbours (i);	Generar soluciones (s) cercanas a (i).
	If fitness (s) > fitness (i) then	Evaluar en la función la nueva solución generada y comparar con la solución inicial.
6		
	Replace (s) whih the (i)	Si se cumple la condición de la línea No.6, reemplazar la solución inicial (i), por la nueva solución (s).
7		
8	End if	Cerrar el bucle hacer mientras.
9	End	Cerrar código

Fuente: Adaptado de Mohammad, Ahamad, & Makhlouf (2018).

- Cristalización/recocido simulado:** Introducida por Kirkpatrick, Gelatt, & Vecchi (1983), el recocido es el proceso químico de calentar y enfriar un material (acero y cerámica) de manera controlada, para modificar sus propiedades físicas. El calor causa que los átomos aumenten su energía y que puedan así, desplazarse de sus posiciones iniciales (mínimo local de energía); el enfriamiento lento genera mayores probabilidades de re-cristalizar en configuraciones con menor energía

(mínimo global). Este método es una adaptación del algoritmo Metropolis-Hastings, un método de Montecarlo utilizado para generar muestras de estado de un sistema termodinámico.

El siguiente es un pseudocódigo general, para la cristalización o recocido simulado (Escobar & Linfati, 2012):

Tabla No. 4.Pseudocódigo Recocido simulado

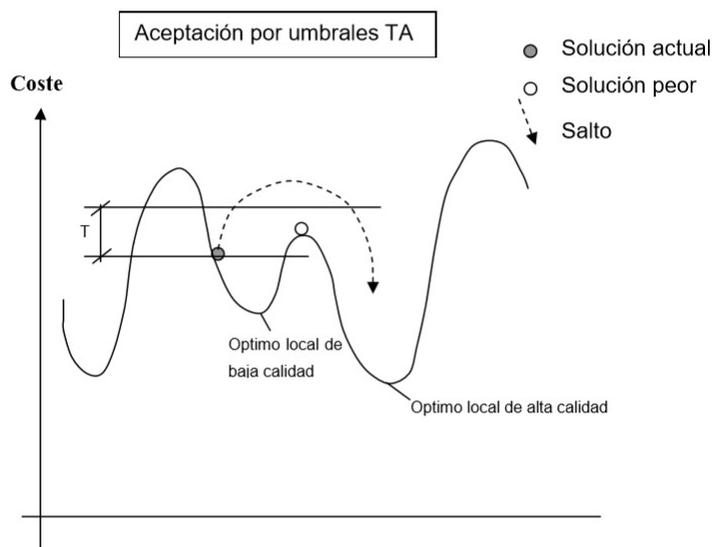
Paso	Sentencia	Comentarios
1	Begin	Iniciar código
2	Define f(x)	Definir la función objetivo
3	i= solución inicial, Rmax=número de iteraciones T= temperatura inicial	Proponer la solución inicial, elegir número de iteraciones y temperatura inicial
	For r=1 to Rmax do	Iniciar ciclo For desde 1 hasta Rmax (número de iteraciones elegido)
4		
5	While stopping creteria no met do	Abrir el bucle hacer-mientras
6	Compute (s) E Neighbours (i)	Generar soluciones (s) cercanas a (i)
7	Compute delta=f(s)-f(i) & generate (u) Uniform randon variable	Evaluar la función en (i) y (s), calcular (delta) y generar una variable aleatoria (u).
8	If (delta<0) or (e ^{-delta/T}) > u Then i=s	Si se cumple que delta es menor que 0 o la función de Boltzman es mayor que (u); entonces reemplazar la solución inicial (i), por la nueva solución (s).
9	End while	cerrar el bucle hacer-mientras

Paso	Sentencia	Comentarios
10	Reducir T	Reducir la temperatura
11	End if	Cerrar el bucle hacer-si
12	End	Cerrar código

Fuente: Adaptado de Escobar & Linfati (2012).

- Aceptación por umbrales:** El método fue propuesto por Dueck & Scheuer (1990), es similar al método del recocido simulado, siendo la principal diferencia el criterio con el que se aceptan las soluciones modificadas. Este método acepta las nuevas soluciones si mejoran la solución inmediatamente anterior o si su empeoramiento es menor que el umbral prefijado, de lo contrario mantiene la solución actual (de esta manera en cada iteración se aceptan movimientos que mejorar la solución actual con más probabilidad que los movimientos de empeoramiento). Un parámetro de control va disminuyendo el umbral de aceptación a medida que avanza el proceso.

Figura No. 8. Búsqueda por aceptación de umbrales.



Fuente: Tomado de Martí Albiñana (2010).

Es importante aclarar que tanto para el método de recocido simulado como para de aceptación de umbrales, se ha demostrado su convergencia al óptimo global en un tiempo infinito de cálculo (Althöfer & Koschnick , 1996); aunque desde el punto de vista práctico, esta demostración no debe sobrevalorarse, porque cumplen para tiempos de cálculo no aplicables en la realidad.

Un pseudocódigo general, para el método de aceptación por umbrales es el siguiente (Dueck & Scheuer, 1990):

Tabla No. 5.Pseudocódigo Aceptación por Umbrales.

Paso	Sentencia	Comentarios
1	Begin	Iniciar código
2	Define $f(x)$	Definir la función objetivo
3	Initialize (nrounds) and (nsteps)	Eligir el numero de repeticiones o ciclos.
4	Compute threshold sequence (Tr)	Calcular el umbral de aceptación.
5	Randomly generate current solution (i)E X	Generar aleatoriamente una solución perteneciente a espacio factible de soluciones (X)
6	For $r=1$: (nrounds) do	Iniciar el ciclo para-hacer , desde 1 hasta (nrounds)
7	For $r=1$: (nsteps) do	Iniciar el ciclo para-hacer , desde 1 hasta (nsteps)

Paso	Sentencia	Comentarios
8	Generate (s) E Neighbours (i) & compute $\text{delta} = f(s) - f(i)$	Generar una nueva solución (s) dentro del vecindario de la solución inicial (i), evaluar la función en (i) y en (s) y calcular delta.
9	If $\text{delta} < \text{Tr}$ Then $i = s$	Si se cumple que delta es menor al umbral (Tr), entonces reemplazar la solución inicial (i), por la nueva solución (s).
10	End for	Cerrar bucle para-hacer
11	End for	Cerrar bucle para-hacer
12	End	Cerrar código

Fuente: Adaptado de Dueck & Scheuer(1990).

- Búsqueda Tabú:** Desarrollada por Glover (1986), el método se basa en una memoria que guía la búsqueda hacia zonas del espacio de soluciones aún no exploradas, evitando que se evalúen soluciones ya testeadas previamente. Tiene dos tipos de memoria, una a corto plazo, que guarda en una lista tabú las soluciones evaluadas recientemente (genera un entorno reducido en los que se eliminan las soluciones tabú ⁵⁶) y una a largo plazo, que identifica y mantiene los atributos que inducen una estructura beneficiosa para las soluciones. La memoria a largo plazo tiene dos estrategias asociadas: Intensificar, regresando a regiones ya exploradas para estudiar a profundidad, y diversificar, visitando áreas no exploradas anteriormente.

Un pseudocódigo general, para el método de búsqueda Tabú, es el siguiente (Riojas, 2005):

⁵⁶ Soluciones o atributos de soluciones que no deben ser elegidas.

Tabla No. 6.Pseudocódigo Búsqueda Tabú.

Paso	Sentencia	Comentarios
1	Begin	Iniciar código
2	Define $N^*(x)$	Definir la función objetivo
3	i = solución inicial, R_{max} =número de iteraciones	Proponer la solución inicial y elegir número de iteraciones
4	For $r=1$ to R_{max} do	Iniciar el ciclo para-hacer , desde 1 hasta R_{max} (número de iteraciones elegido)
5	While stopping creteria no met do	se abre el bucle hacer-mientras
6	Identify $N(i,k)$	Vecindario de i
7	Identify $T(i,k)$	lista tabú
8	Identify $A(s,k)$	Lista de aspirantes
9	Calculate $N^*(s,k)=N(i)-T(i,k)$ u $A(i,k)$	Evaluar la función en el vecindario de (i) , evaluar la lista tabú en (i) , evaluar las lista de aspirantes (s) , hallar una nueva solución en el vecindario reducido $N^*(s)$.
10	Choose the best solution in $N^*(s,k)$	Elegir la mejor solución
11	End while	Cerrar bucle hacer mientras
12	$i=s$ & update tabu list	Guardar la mejor solución y actualizar la lista tabú
13	End for	Se cierra ciclo para-hacer
14	End	Cerrar código

Fuente: Adaptado de Riojas (2005).

- **Algoritmo del diluvio universal:** Adaptado por Dueck G.(1993), en este método se aceptan soluciones peores siempre que estas no superen un valor máximo o

mínimo (según se esté maximizando o minimizando) establecido previamente. Este método difiere del de aceptación por umbrales, en que se centra en la magnitud neta de la función objetivo, y no en la diferencia de magnitud entre dos soluciones consecutivas.

Se describe su analogía con un fenómeno natural de la siguiente manera: Cuando un paisaje montañoso se va inundando, si la cota del agua asciende lo suficientemente lenta, permitirá divisar y refugiarse en el punto más alto (Óptimo Global); si la cota del agua asciende muy rápido, se tendrá en el punto más cercano (óptimo local), sin tener la posibilidad de bajar al valle para alcanzar un punto más alto que el de su entorno (en ningún caso podrá bajar por debajo de la cota ya alcanzada por el nivel del agua).

- **Aceptación por cercanía al líder:** Adaptado por Dueck G.(1993), este método se basa en la técnica de aceptación por umbrales. A partir de la mejor solución obtenida durante el proceso, se acepta cualquier otra en que su magnitud no difiera más de un umbral determinado previamente. Conforme el proceso avanza el umbral disminuye y la solución mejora. Difere de la técnica de umbral de aceptación, en que el umbral se valora como la diferencia entre la nueva solución y la mejor obtenida durante el proceso.
- **GRASP (Búsqueda codiciosa, aleatorio y adaptativa):** Desarrollado por Hart & Shogan (1987), combinan la idea de búsqueda aleatoria y búsqueda por gradiente. Se basa en la generación de soluciones mediante técnica probabilísticas, a las que se le aplica después algún algoritmo de mejora local. El

método genera una muestra representativa de las mejores soluciones con una alta probabilidad de que alguna de ellas sea de gran utilidad.

Un pseudocódigo general, para el método GRASP, es el siguiente:

Tabla No. 7. Pseudocódigo GRASP.

Paso	Sentencia	Comentarios
1	Begin	Iniciar código
2	Define f(x)	Definir la función objetivo
3	Cbest=0, Rmax=número de iteraciones	Asignar 0 a la solución inicial y elegir el número máximo de iteraciones.
4	For r=1 to Rmax do	Inicio de ciclo para-hacer desde 1 hasta Rmax (número de iteraciones elegido)
5	x=Constructsolution (randomseed)	Construir solución semilla
6	x=Localsearch (x)	Realizar búsqueda local
7	if f(x)>cbest Xbest=X	Evaluar (x) en la función y comparar con cbest si se cumple la
8	Xbest=X; Cbest=C(Xbest)	sentencia 7, guardar la nueva solución.
9	End if	Cerrar bucle si-hacer
10	End for	Cerrar bucle para-hacer
14	End	Cerrar código

Fuente: Adaptado de Hart & Shogan (1987).

- **Búsqueda local iterada:** Desarrollado por Lourenco, Martin, & Stützle (2010), el método se basa en emplear como espacio de soluciones los óptimos locales. Para cada solución de partida es posible alcanzar un óptimo local empleando cualquier técnica (EJ: la técnica del gradiente). Una vez alcanzado el óptimo local, se aplica una perturbación que modifica la solución a otra diferente que

corresponda a otro óptimo local próximo. Operando del modo descrito anteriormente, se puede rastrear un número significativo de óptimos locales y elegir el de mayor calidad.

Un pseudocódigo general, para el método de búsqueda local iterada, es el siguiente (Lebrada-Nueva, Enríquez-Urbano, & García-Ojito, 2014):

Tabla No. 8.Pseudocódigo Búsqueda Local Iterada.

Paso	Sentencia	Comentarios
1	Begin	Iniciar código
2	Define f(x)	Definir la función objetivo
3	Create starting solution s; n= nmax	Crear conjunto de soluciones factibles, determinar número de iteraciones.
4	s=Local-search(s)	Hacer búsqueda local en el conjunto de soluciones factibles
5	n=0	Asignar 0 a n
6	Repeat	Abrir el bucle repetir-hasta
7	s'=mutate (s)	Mutar la solución rastreada.
8	s'=Local-search(s')	Realizar búsqueda local de la solución candidata.
9	If f(s')<f(s) then s= s'	Evaluar la función en la solución candidata (s') y en la solución inicial (s). Si se cumple la condición, reemplazar la solución inicial.
10	n=n+1	Contabilizar una nueva iteración
11	Until=n+1	

Paso	Sentencia	Comentarios
12	Until $n=n_{max}$	Cerrar el bucle repetir cuando se cumple la condición
13	End	Cerrar el código

Fuente: Adaptado de Lebrada-Nueva, Enríquez-Urbano, & García-Ojito (2014)

- Búsqueda en entornos variables:** Este método fue propuesto por Mladenovich & Hansen (1997), se basa en la idea de escape de un óptimo local, si se aplica otro operador diferente al ya aplicado, para explorar el entorno de una solución. Alternando sucesivamente dos o más operadores se consiguen alcanzar óptimos de calidad.

Un pseudocódigo general, para el método de búsqueda en entornos variables, es el siguiente (Moreno & Mladenovic, 2014):

Tabla No. 9. Pseudocódigo Búsqueda en Entornos Variables.

Paso	Sentencia	Comentarios
1	Begin	Iniciar código
2	Define $f(x)$	Definir la función objetivo
3	Define neighborhood structures N_k ($k=1, \dots, K_{max}$)	Definir la estructura del vecindario a explorar.
4	Generate initial solution $s \in S$	Generar una solución inicial contenida al espacio factible de soluciones.
5	While stopping condition is not met do	Abrir el bucle mientras-hacer .
6	$K=1$	Asignar valor 1 a la variable K
7	While $K \leq K_{max}$ do	Abrir ciclo mientras-hacer .

Paso	Sentencia	Comentarios
8	$s' = \text{Shake}(s), s' \in N_k(s)$	Hacer movimiento de la solución inicial (s) dentro de la estructura de vecindad definida N_k . Generar una solución modificada (s').
9	$s'' = \text{localsearch}(s')$	Hacer búsqueda local de (s') en el espacio factible de soluciones. Generar una solución modificada (s'')
10	If $f(s'') < f(s)$	Evaluar las soluciones modificadas (s') y (s'') en la función a optimizar. Comparar los resultados.
11	$s = s''$	Si la sentencia No.10, es afirmativa, asignar la solución (s''), como nueva solución s
12	$k = k + 1$	Añadir una iteración al contador (k)
13	End-while	Cerrar el primer ciclo hacer-mientras .
14	End-while	Cerrar el segundo ciclo hacer-mientras .
15	End	Finalizar el código

Fuente: Adaptado de Lebrada-Nueva, Enríquez-Urbano, & García-Ojito (2014).

3.4.4. Algoritmos evolutivos

Los algoritmos evolutivos están basados en poblaciones y requieren un ajuste en la forma de valorar las mejores soluciones de cada de cada una de estas (tamaño, criterio de cruce, de selección etc). Si se sobrevaloran las mejores soluciones, se puede caer en una convergencia prematura a una determinada solución, y si no se valoran lo suficiente, puede llevar a un desconcierto del algoritmo de búsqueda.

- **Colonias de hormigas:** Es un método propuesto por Dorigo, Maniezzo, & Colorni (1996), trata de simular el comportamiento de algunas colonias de insectos, que optimizan el camino en la búsqueda de comida.

Las hormigas optimizan el trabajo de la colonia mediante intercambio de señales químicas (feromonas). En primer lugar, exploran el entorno de su hormiguero de forma aleatoria. Tan pronto como un individuo encuentra una fuente de comida, evalúa su cantidad y calidad, y transporta un poco al hormiguero. Durante el regreso la hormiga deja por el camino un rastro oloroso. Después de un tiempo, el rastro oloroso depositado en el camino hacia el alimento, crece con el número de hormigas que pase por él, y si no, desaparece en caso contrario. El resultado final es la consecución de rutas casi óptimas entre dos puntos. Las hormigas son cooperativas, y trabajan hacia un objetivo común.

Un pseudocódigo general, para el método de colonias de hormigas , es el siguiente (Fernández-Vargas & Bonilla-Petriciolet, 2014):

Tabla No. 10.Pseudocódigo Colonias de Hormigas

Paso	Sentencia	Comentarios
1	Begin	Iniciar código
2	Define f(x)	Definir la función objetivo
3	Crear m hormigas	Definir número de hormigas para el proceso.
4	For each ant do	Iniciar el bucle para-hacer , para cada hormiga
5	Repeat	Iniciar el bucle repetir
6	Extendpartialsolutionprobabilistically()	Crear espacio solución
7	Until solution is complete	

Paso	Sentencia	Comentarios
8	For each ant do E selectantsforlocalsearch() do	Iniciar el bucle hacer-para , cada hormiga
9	Appliylocalsearch(ant)	Hacer búsqueda local para cada hormiga-construir solución usando feromonas
10	Depositpheromones()	Cada hormiga deposita feromonas-solución
11	Evaporatepheromones()	Evaporar las feromonas-soluciones anteriores
12	Until termination criteria met	Cerrar ciclo cuando el criterio se cumpla.
13	End	Se finaliza el código

Fuente: Adaptado de Fernández-Vargas & Bonilla-Petriciolet (2014).

- Algoritmos genéticos:** Este método fue desarrollado por Holland (1975), y está inspirado en el proceso de evolución natural de los seres vivos. Mediante el cruzamiento genético y la mutación, los individuos de una población evolucionan creando individuos mejor adaptados. Cada individuo en una población se ve afectado por el resto (compitiendo por recursos, emparejándose para procrear, huyendo de los depredadores, etc..) y también por el entorno (disponibilidad de comida, clima, etc..). Los individuos mejor adaptados son los que tienen mayores posibilidades de vivir más tiempo y reproducirse, generando una dinastía con su información genética.

Los algoritmos genéticos se inician con una población de partida teniendo soluciones de diferentes calidades (fitness). De esta población se seleccionan parejas de soluciones en función de sus calidades. Las soluciones generadas a partir de otras, heredarán las cualidades de ambas.

En algunos casos se aplica sobre la nueva solución un operador de mutación, que modifica ligeramente de manera aleatoria la nueva solución. De las soluciones de la población anterior y las soluciones creadas mediante combinación y mutación, se seleccionan las que formarán parte de la siguiente población. En la mayoría de los casos la nueva población se selecciona de manera elitista, asegurando la supervivencia de las mejores soluciones de la población actual.

Un pseudocódigo general, para el método de algoritmos genéticos , es el siguiente (Holland, 1975):

Tabla No. 11.Pseudocódigo Algoritmo Genético.

Paso	Sentencia	Comentarios
1	Begin	Iniciar código
2	Define $f(x)$	Definir la función objetivo
3	NP:Polulation size, P_c =Crossover probability, p_m :Mutación probability	Definir tamaño de población,probabilidad de combinación y probabilidad de mutación.
4	Initial population	Iniciar creación de población
5	For $i=1$ to N_p do	Iniciar bucle para-hacer
6	p_i =generate solution	Gerenerar solución inicial (p_i)
7	$p_i''=f(p_i)$	Evaluar en la fución objetivo la solución inicial (p_i) y generar solución (p_i'')
8	End	Cierra ciclo para-hacer , para población inicial
9	Evolution	Iniciar generación de soluciones por evolución

Paso	Sentencia	Comentarios
10	Po=0	
11	Generación de descendencia	Iniciar generación de descendencia
12	Repeat	Iniciar bucle repetir
13	Parents=selection (P)	Seleccionar los padres de la solución.
14	offspring=crossover(parents)	Realizar combinación de padres, para generar la descendencia.
15	offspring=mutation(offspring)	Realizar la mutación de la descendencia
16	offspring=f(offspring)	Evaluar la descendencia mutada en la función objetivo.
17	Po=P _o U offspring"	Actualizar contador
18	Until Po=NP	Terminar bucle repetir
19	P=P _o	
20	Until Stop condition es met	Termina bucle repetir
21	Return best solution (pi",offsprong")	Guardar la mejor solución entre la población inicial y el proceso de evolución
22	End	Finalizar el código

Fuente: Adaptado de Holland (1975).

- Búsqueda dispersa:** Este método fue desarrollado por (Glover & Martí, 2002), Es similar a los algoritmos genéticos, pero a diferencia de ellos sustituye el cruzamiento de soluciones por la combinación lineal, no estando fundamentado en la aleatorización sobre un conjunto relativamente grande, sino en elecciones sistemáticas y estratégicas sobre un conjunto reducido. Para realizar una adecuada exploración del espacio de soluciones, se mantienen las soluciones entre padres, pero no sólo las mejores soluciones, sino también, aquellas que

son más diferentes, de esta manera se evita explorar regiones donde ya se han alcanzado óptimos locales.

- **Algoritmos meméticos:** Al igual que en los algoritmos genéticos, los algoritmos meméticos⁵⁷ se inspiran en el proceso evolutivo, pero en este caso de la evolución cultural. Moscato (1989), explica la estrategia evolutiva de los algoritmos meméticos, con la metáfora de la evolución de las artes marciales. La evolución de los artes marciales se ha desarrollado en un tiempo relativamente corto comparado con la evolución biológica. Su mejora no ha sido un proceso aleatorio sino guiado, y sólo los grandes maestros han tenido suficiente conocimiento para mejorar un estilo existente.

En los algoritmos meméticos se crea una población de manera aleatoria o siguiendo un procedimiento de inicialización. Cada individuo es mejorado mediante un proceso de búsqueda secuencial por entornos para obtener un óptimo local o una solución de determinada calidad. En la siguiente fase los individuos de la población interaccionan. Esta interacción se puede desarrollar de dos maneras distintas: una manera competitiva, en la que los individuos son eliminados de la población después de la competición con otro (para mantener el tamaño de la población el individuo perdedor se sustituye por un clon del individuo ganador), o de manera cooperativa, donde los componentes de diferentes individuos son intercambiados con la esperanza de que la combinación de dos componentes, pueda evolucionar a soluciones mejores que las de los dos padres;

⁵⁷ El termino meme hace referencia a una unidad de evolución cultural humana, análoga a los genes.

en ese caso, uno de los padres se reemplazaría por esta solución. El intercambio de componentes de diferentes individuos puede producir soluciones no factibles, con la necesidad de crear un procedimiento de reparación o una penalización respecto de los individuos factibles.

Un pseudocódigo general, para el método de algoritmos meméticos, es el siguiente (Moscato, 1989):

Tabla No. 12.Pseudocódigo Algoritmos Meméticos.

Paso	Sentencia	Comentarios
1	Begin	Iniciar código
2	Define f(x)	Definir la función objetivo
3	Pop=new solution (popsize)	Definir el tamaño de la población.
4	For i E Pop do	Iniciar bucle para-hacer
5	i.initialise()	Generar solución inicial
6	i.local-search()	Realizar búsqueda local
7	End for	Cerrar el ciclo para-hacer
8	Fase de recombinación	
9	Repeat	Iniciar bucle repetir
10	for j=1 to #recombinations do	
11	Parents=pop.select(numparents)	Seleccionar el conjunto primario (padres)
12	Parents E Pop	El conjunto primario esta incluido en la población definida inicialmente
13	C=parents.recombine()	Combinar el conjunro primario (padres) para crear el conjunto secundario (hijos)
14	c=local-search()	Realizar búsqueda local

Paso	Sentencia	Comentarios
15	pop.update©	Inserta nueva solución en la población
16	End for	Terminar para-hacer
17	Fase de mutación	
18	for j=1 to #mutación do	Iniciar para-hacer
19	i=pop.select(1)	Seleccionar una solución de la población inicial
20	im=i.mutate()	Mutar la solución (i)
21	im.local-search()	Realizar búsqueda local
22	pop.update(im)	Inserta nueva solución en la población
23	end for	Terminar ciclo para-hacer
	If pop.converged() then	Actualizar la población después de la convergencia
24		
25	End if	Terminar ciclo si-hacer
26	Until termination condition is true	Terminar ciclo repetir
27	End	Finalizar código

Fuente: Adaptado de Moscato (1989).

- **Búsqueda armónica:** Esta técnica fue desarrollada por Geem, Kim, & Loganathan (2001), está basada en el proceso de composición musical, en donde se busca una perfecta armonía. Esta armonía en el campo de la música, es un proceso análogo a encontrar la mejor solución en un proceso de optimización. En el método cada solución candidata es considerada una armonía (representada por un vector n-dimensional). La población de soluciones candidatas es generada aleatoriamente y almacenada en la memoria del método. Las nuevas soluciones son generadas a partir de las soluciones almacenadas en la memoria a través de un proceso de re-iniciación (ajuste de tono). Finalmente, la memoria de

soluciones es actualizada mediante la comparación de la solución candidata y el peor de los vectores guardados previamente (mejor armonía).

Un pseudocódigo general, para el método de búsqueda armónica, es el siguiente (Geem, Kim, & Loganathan, 2001):

Tabla No. 13.Pseudocódigo Búsqueda armónica.

Paso	Sentencia	Comentarios
1	Begin	Iniciar código
2	Define f(x)	Definir la función objetivo
1	H=Generate initial harmonics	Generar población inicial
2	Define pitch adjusting rate (rpa), pitch limits and bandwidth	Definir velocidad de ajuste de tono, límite de tono y ancho de banda
3	Define harmony memory accepting rate (raccept)	Definir tasa de aceptación de memoria de la armonía
4	while (t<Max number of iterations)	Iniciar ciclo mientras-hacer
5	Generate new harmonics by accepting best harmonics	Generar nuevos armónicos, aceptando las mejores armonías
6	Adjust pitch to get new harmonics (solutions)	Ajustar el tono para obtener nuevos armónicos (soluciones)
7	If (rand>raccept), choose an existing harmonic randomly	Se cumple la condición, elegir un armónico existente al azar
8	Else if (rand>rpa), adjust the pitch randomly within limits	Sí se cumple la condición, ajustar el tono aleatoriamente dentro de los límites
9	Else generate new harmonics via randomization	Generar nuevos armónicos a través de aleatorización.
10	End if	Cerrar ciclo si-hacer

Paso	Sentencia	Comentarios
11	Accept the new harmonics (solutions) if better	Aceptar los nuevos armónicos (soluciones), si son mejores
12	end while	Cerrar ciclo mientras-hacer
13	Find the current best solutions	Encontrar la mejores soluciones actuales
14	End	Cerrar el código

Fuente: Adaptado de Geem, Kim, & Loganathan (2001).

- Enjambre de partículas:** Esta técnica fue desarrollada por Kennedy & Eberhart (1995) y hace referencia al comportamiento de partículas en la naturaleza. Este método permite optimizar un problema a partir de una población de soluciones candidatas o partículas, moviéndose éstas por todo el espacio de búsqueda-solución, de acuerdo a reglas matemáticas que tiene en cuenta posición y velocidad. El movimiento de cada partícula es regido por su mejor posición local en el momento, así como de las mejores posiciones globales encontradas por otras partículas que recorren el espacio de búsqueda-solución. El fundamento base-teórico es hacer que la nube/enjambre de partículas, converja rápidamente hacia las mejores soluciones.

Un pseudocódigo general, para el método de búsqueda armónica, es el siguiente (Kennedy & Eberhart, 1995):

Tabla No. 14.Pseudocódigo Enjambre de partículas.

Paso	Sentencia	Comentarios
1	Begin	Iniciar código
2	Define f(x)	Definir la función objetivo
3	Randomly initialize population of particles	Crear aleatoriamente la población de partículas

Paso	Sentencia	Comentarios
4	While (not stopping condition) do	Iniciar bucle mientras-hacer
5	for i =1 to N do	Iniciar bucle para-hacer
6	for j = 1 to d do	Iniciar bucle para-hacer
7	Update vij	Actualizar velocidad
8	Check for velocity boundaries violation and correct if neede	Verificar limites de velocidad y hacer correcciones si son necesarias
9	Actualizar Xij	Actualizar posción de la partícula
10	Check for search space boundaries violation and correct if needed	Verificar la violación de los limites de espacio y hacer correcciones si es necesario
11	End for	Cerrar ciclo para-hacer
12	End for	Cerrar ciclo para-hacer
13	for i = 1 to N do	Iniciar bucle para-hacer
14	Update pi	Actualizar la mejor posición de la partícula
15	end for	Cerrar ciclo para-hacer
16	end while	Cerrar bucle mientras-hacer
17	Report best solution.	Recuperar la mejor solución
18	End	Cerrar el código

Fuente: Adaptado de Kennedy & Eberhart (1995).

- Algoritmo luciérnagas:** Esta técnica fue desarrollada por Yang (2010), es un algoritmo inspirado en el comportamiento del centelleo de las luciérnagas. Estos insectos generan destellos de luz para actuar como sistema de señal, para atraer a otras luciérnagas, con las siguientes premisas:

 - Todas las luciérnagas son unisexuales, de tal modo que cualquier luciérnaga individual puede ser atraída por todas las demás.

- La atracción es proporcional a su brillo. Para cualquier par de luciérnagas, la menos brillante es atraída por la más brillante (la menos brillante se mueve hacia la más brillante); sin embargo, la intensidad (el brillo aparente) decrece cuando aumenta la distancia entre ambas.

-Si no hay luciérnagas más brillantes que una dada, ésta se mueve aleatoriamente.

Un pseudocódigo general, para el algoritmo luciérnagas, es el siguiente (Yang, 2010):

Tabla No. 15.Pseudocódigo para el algoritmo luciérnagas.

Paso	Sentencia	Comentarios
1	Begin	Empezar el código
2	Objective function $f(y)$, $y=(y_1, \dots, y_d)$	Definir función objetivo
3	Generate initial population of fireflies $y_i(i=1,2, \dots, m)$	Generar población inicial de luciérnagas
4	Light intensity l_i , at y_i is determined by $f(y_i)$	Definir cálculo de intensidad de luz
5	Light absorption coefficient K	Definir coeficiente de absorción de luz
6	While $t < \text{MaxGeneration}(G)$	Iniciar bucle hacer-mientras
7	For $j=1:m$ all m fireflies	Iniciar bucle para-hacer
8	For $j=1:m$ all m fireflies	Iniciar bucle para-hacer
9	If $(l_i < l_j)$, move firefly i towards j ;	Si se cumple la sentencia , mover luciernaga de i hacia j
10	End if	Cerrar ciclo hacer-si
11	Attractiveness varies with distance r_{ij} via $\exp[-K \cdot r_{ij}]$	Definir ley de atracción
12	Evaluate new solutions and update light intensity	Evaluar nuevas soluciones y actualizar la intensidad de luz
13	End for j	Cerrar bucle para-hacer
14	End for i	Cerrar bucle para-hacer

Paso	Sentencia	Comentarios
15	Rank the fireflies and find current best	Clasificar las luciernagas y encontrar la mejor posicionada
16	End While	Cerrar bucle hacer-mientras
17	End	Finalizar código

Fuente: Adaptado de Yang (2010).

- **Re-encadenamiento de trayectorias:** Esta técnica fue desarrollada por Glover (1998). En ella, se sustituye la combinación lineal por trayectorias que conectan dos soluciones padres. Se fundamenta en que entre dos soluciones buenas existen soluciones que puedan ser mejores. Consiste en realizar el proceso de transformación de una solución en otra, con la esperanza de encontrar alguna intermedia que sea mejor.

Un pseudocódigo general, para el re-encadenamiento de trayectorias, es el siguiente (Glover, 1998):

Tabla No. 16. Pseudocódigo re-encadenamiento de trayectorias.

Paso	Sentencia	Comentarios
1	Begin	Empezar el código
2	Define f(x)	Definir la función objetivo
3	if evaluation(x)<evaluation (y) then	Evaluar la posición
4	xpr=x	
5	Else	
6	xpr=y	
7	End if	Cerrar ciclo hacer-si
8	For i=1 to l do	Iniciar bucle para-hacer
9	Replace xi by yi	Reemplazar x por y
10	xnew=sort the rest operation in x	Ordenar la operación de descanso en x
11	If evaluation(xnew)<evaluation(xpr) then	Evaluar nueva posición y posición inicial

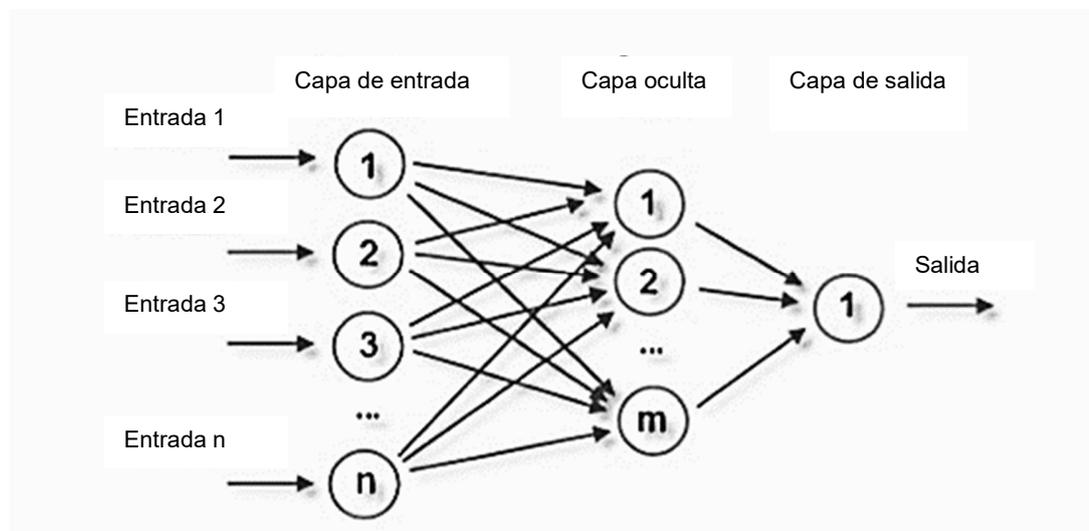
Paso	Sentencia	Comentarios
12	xpr=xnew	Si la sentencia No.11, es afirmativa, asignar la solución (xnew), como nueva solución (xpr)
13	End if	Cerrar ciclo hacer-si
14	End for	Cerrar bucle para-hacer
15	Return xpr	retornar xpr
16	End	Finalizar código

Fuente: Adaptado de Glover (1998).

3.4.5. Redes neuronales

Introducidas por primera por McCulloch & Pitts (1943), las redes de neuronas artificiales son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los animales. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas, en una red que colabora para producir un estímulo de salida.

Figura No. 9. Red neuronal artificial con n neuronas de entrada, m en su capa oculta y una de salida.



Fuente: Adaptado de Glover (1998).

A partir de un conjunto de datos de entrada importante, el objetivo será conseguir que la red aprenda mediante un adiestramiento de las propiedades deseadas. Las características de las redes neuronales las hacen apropiadas para aplicaciones en las que no se dispone, a priori, de un modelo identificable que pueda ser programado, pero se dispone de un conjunto de ejemplos de entrada. También han sido utilizadas en la aplicación a diversos problemas de optimización. Desde el punto de vista de las aplicaciones prácticas, la ventaja de las redes neuronales reside en el proceso paralelo, adaptativo y no lineal de las mismas, siendo capaces de crear un modelo a partir de un número de datos suficiente, razón por la cual se han empleado con éxito en un gran número de especialidades.

Un pseudocódigo general, para las redes neuronales, es el siguiente (Sirca & Adeli, 2005):

Paso	Sentencia	Comentarios
1	Begin	Iniciar código
2	Define f(x)	Definir la función objetivo
3	define m	Definir número de datos
4	Define sm y tm	Establecer los vectores de entrenamiento y el vector objetivo
5	Define a	Definir velocidad de aprendizaje
6	Define u	Definir umbral para la función de activación
7	$w_i=0; b_i=0$ whith $i= 1, \dots, m$	Asignar a los pesos (w_i) y la polarización (b_i), igual a 0
8	while (not stopping condition) do	Iniciar ciclo mientras-hacer
9	i=0	Iniciar contador en 0

Paso	Sentencia	Comentarios
10	$x_i = s_i$	Iniciar proceso para cada par de entrenamiento
11	$y_{in} = b + \text{suma}(x * w)$	Calcular respuesta de la unidad de salida
12	If $y_{in} > u$, so $y = 1$	Calcular respuesta en función de activación
13	If $y_{in} < u$, so $y = -1$	
14	In another case $y = 0$	
15	if $y \neq t$, so	
16	$w = w + a * t + x$	Verificar si se presento cambio en los pesos Calcular los nuevos pesos
17	$b = b + a * t + x$	Calcular la nueva polarización
18	In another case $i = i + 1$	Incrementar el contador
19	End	Terminar código

Fuente: Adaptado de Sirca & Adeli (2005).

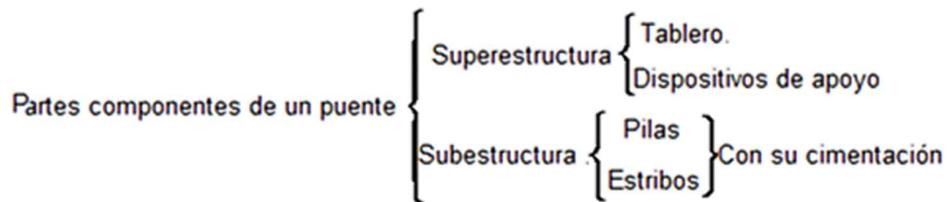
4. APLICACIÓN DE MÉTODOS/TÉCNICAS HEURÍSTICAS Y METAHEURÍSTICAS EN EL DISEÑO DE PUENTES EN CONCRETO

4.1. PUENTES

Se define como puente⁵⁸ a una estructura natural o artificial que permite salvar un accidente geográfico (río, cañón, valle, cuerpo de agua, entre otros) o cualquier obstáculo físico (carretera, camino, vía férrea, entre otros), generando continuidad entre dos lugares cercanos.

Las partes componentes de un puente son las siguientes (Godínez, 2010):

Figura No. 10. Componentes generales de un puente.



Fuente: Tomada de Godínez (2010).

- **Superestructura:**

-**Tablero:** Es el componente estructural del puente a través de la cual se produce la circulación (vehículos, trenes, personas, entre otros). Estos pueden ser de losas o de viga y losa (con o sin vigas transversales⁵⁹).

⁵⁸ Algunos autores presentan las siguientes definiciones:

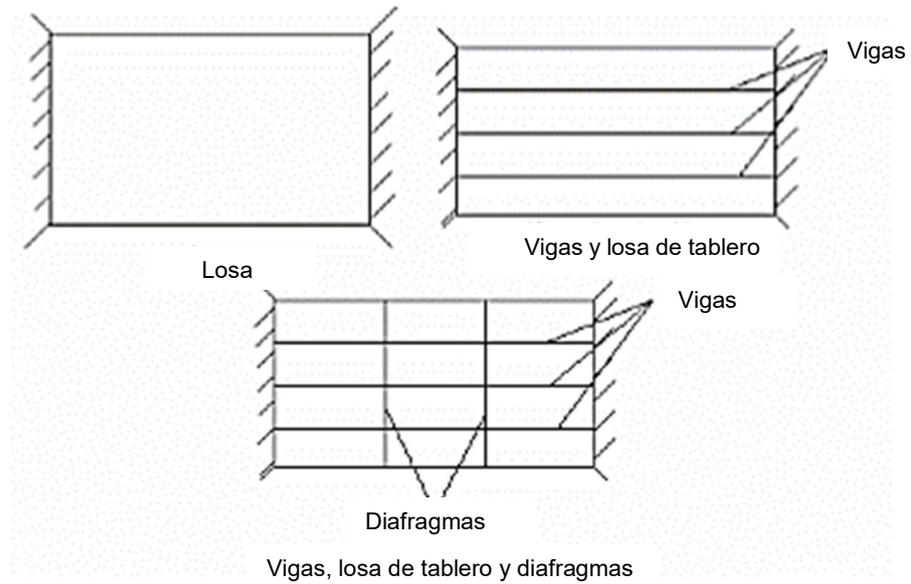
Puente: Estructura que salva un río.

Viaducto: Salva una depresión natural del terreno, el mar, lago, laguna, ladera de una montaña y en general cualquier obstáculo que tenga poca movilidad o ninguna.

Paso: Salva otra vía.

⁵⁹ También se les llaman diafragmas o riostras.

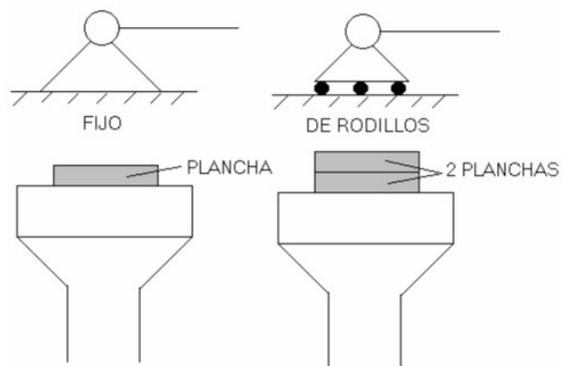
Figura No. 11. Tablero de puentes.



Fuente: Tomada de Godínez (2010).

-Dispositivo de apoyo: Elementos sobre los cuales descansa el tablero. Pueden ser de rodillo o deslizantes.

Figura No. 12. Dispositivos de apoyo..



Fuente: Tomada de Godínez (2010).

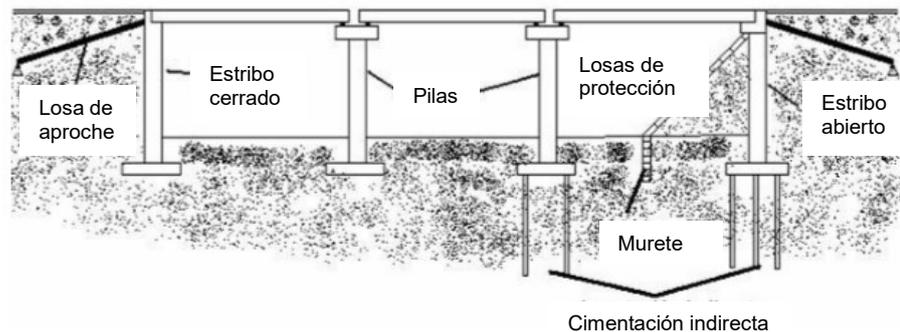
- **Subestructura:**

-**Pila:** Soporta el tablero en puntos intermedios y transmiten las cargas a la cimentación.

-**Estribos:** Soportan el tablero en los extremos, transmiten las cargas a la cimentación y sirven como muros de contención. La contención puede ser total (estribos cerrados) o parcial (estribos abiertos).

-**Cimentación:** Transmiten las cargas al suelo. Puede ser superficial (zapatas) o profunda (pilotes, caisson).

Figura No. 13. Elementos subestructura.



Nota: Tomada de Godínez (2010).

Los puentes se pueden clasificar según (Herrera J. , 1996):

- **Utilidad:** Puentes peatonales, puentes para carreteras, puentes para vías férreas, puentes para paso de tuberías (agua, gas, aceite, petróleo, entre otras) y puentes grúas.

- **Material:** Puentes en madera, puentes en concreto (reforzado o pretensado), puentes metálicos, puentes mixtos.
- **Localización de la calzada:** calzada o paso superior, calzada o paso intermedio, calzada o paso inferior.

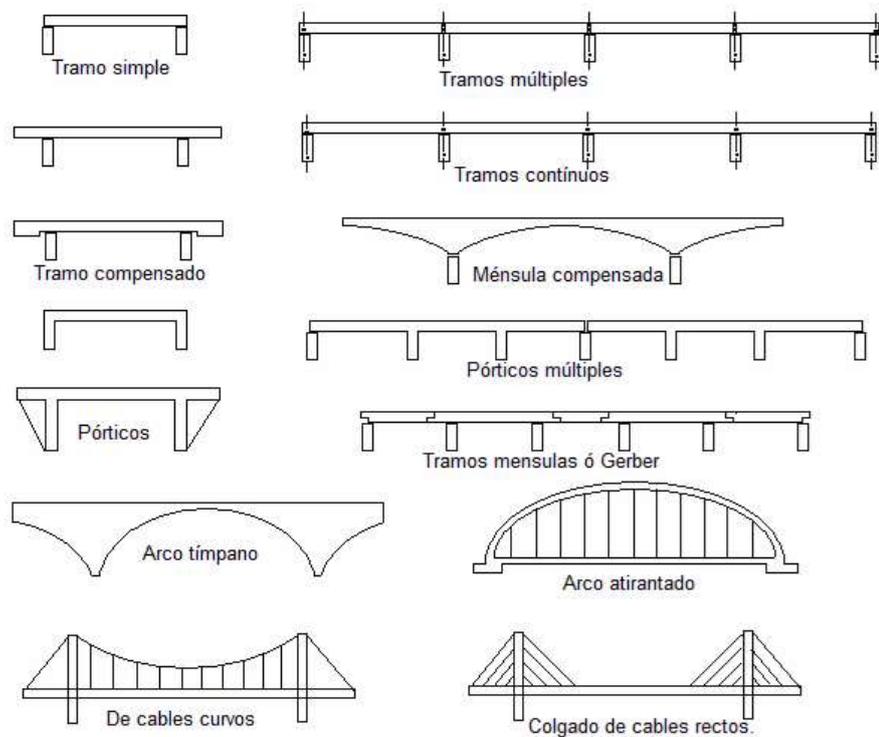
- **Tipo de estructura:**

Estructura longitudinal:

- Puentes de una simple luz (una sola luz simplemente apoyada).
- Puentes de contrapeso, voladizo y luz central apoyada.
- Puentes de varias luces, ya sea de vigas simples o de vigas continuas.
- Puentes de viga continúa, voladizo y luz central apoyada.
- Puentes de estructura aporticada (articulada o empotrada).
- Puente en arco (articulado o empotrado).
- Puente atirantado-colgado de cables rectos.
- Puentes colgantes-colgado de cables curvos (sin viga de rigidez⁶⁰ o con viga de rigidez).
- puentes levadizos.

⁶⁰ Los puentes sin viga de rigidez se utilizan solo para pasos provisionales.

Figura No. 14. Clasificación de puentes según estructura longitudinal.

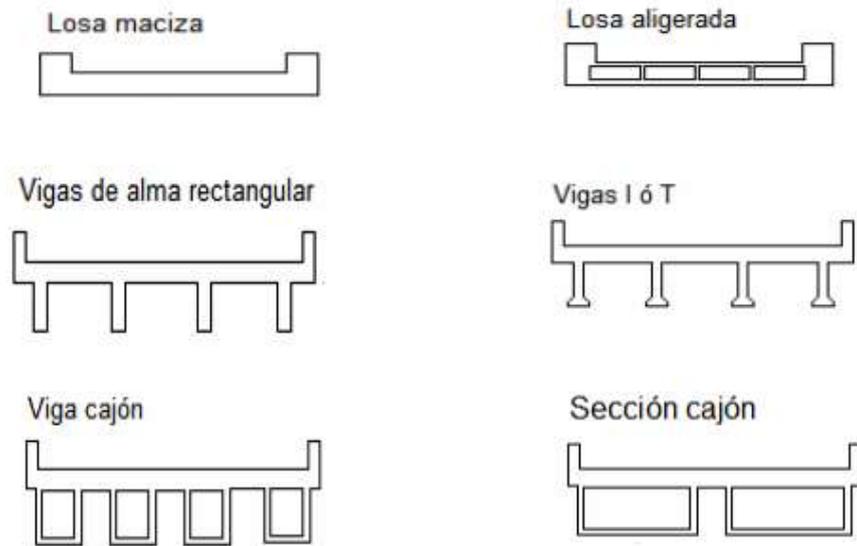


Fuente: Tomada de Godínez (2010).

Estructura transversal:

- Losas maciza o aligerada (con tubos o con sección cuadrada o rectangular).
- Viga y losa (de alma rectangular, viga T, viga doble T, viga cajón).
- Sección cajón.

Figura No. 15. Clasificación de puentes según estructura transversal.



Fuente: Tomada de Godínez (2010).

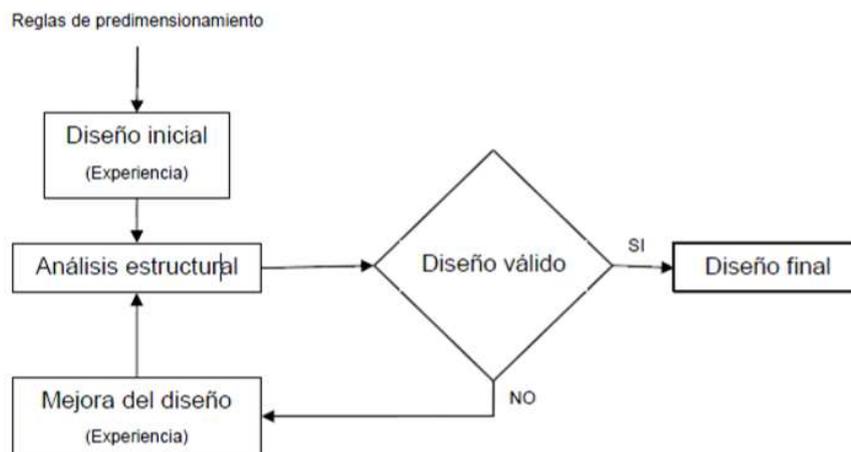
4.2. FILOSOFÍA DEL DISEÑO DE ESTRUCTURAS

Siguiendo a Martí Albiñana (2010), la metodología tradicional empleada para cualquier estructura en general en la ingeniería civil, incluidos los puentes, se basa en el conocimiento y experiencia del diseñador, quienes pre-dimensionan y diseñan cada una de las partes, elementos o secciones de la estructura; comprobando bajo las normas vigentes las soluciones propuestas y aplicando los ajustes y correcciones adecuadas sobre el diseño inicial, en caso de ser necesarios. En la mayoría de casos la solución adecuada será la que sea más económica de construir, sin embargo, el diseñador tradicional no llega a conocer si la solución final propuesta está cerca o no del costo y/o diseño óptimo, teniendo en cuenta otras

variables, como: menor impacto ambiental, menor/mayor impacto social, menor contaminación (menor huella de carbono), mayor durabilidad, menor costo de mantenimiento, sensación estética, entre otras.

La figura No.16, muestra el proceso iterativo normal de diseño a prueba y error, el cual cobra un costoso capital humano y tiempo de dedicación.

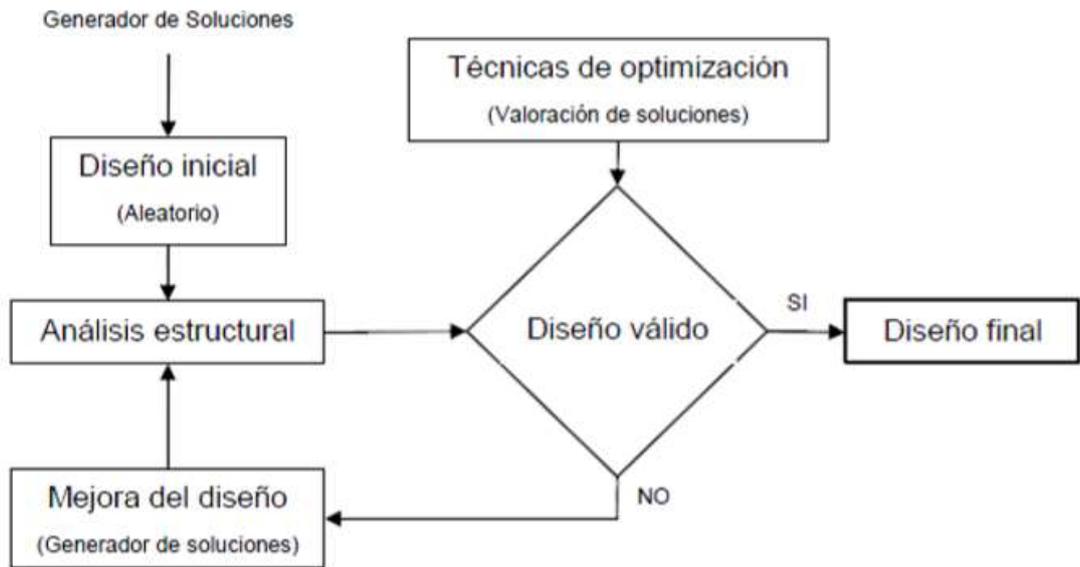
Figura No. 16.Método tradicional de diseño de estructuras.



Fuente: Tomada de Martí Albiñana (2010).

Con el desarrollo de las técnicas de optimización y el avance en la potencia de cálculo de los ordenadores actuales, ha surgido una nueva metodología de diseño, el cual permite realizar de manera totalmente automatizada el dimensionamiento de la estructura, con un rendimiento muy superior a la técnica de diseño convencional (ver figura No.17).

Figura No. 17. Método de diseño con técnicas de optimización.



Fuente: Tomada de Martí Albiñana (2010).

4.3. OPTIMIZACIÓN EN EL DISEÑO DE PUENTES

La construcción en general y en específico de las grandes estructuras como lo son los puentes están encaminadas a la búsqueda de la mayor eficiencia posible en su fases de diseño, construcción, mantenimiento (vida útil) y demolición (cumplimiento de su ciclo de vida/uso), debido a su elevado consumo de recursos naturales, impacto ambiental generado (incluido contaminación) y costos económicos (Marmaneu, 2016). El diseño óptimo (solución óptima), es aquella que cumpla los parámetros técnicos de resistencia mínimos dados por las normas de diseño de puentes, el menor impacto ambiental, menor impacto social, menor contaminación (menor huella de carbono), mayor durabilidad, el menor costo de mantenimiento y

el menor costo de desmonte o demolición (tanto económicamente como en huella de carbono).

4.3.1. Tipologías de puentes optimizadas

De acuerdo al análisis bibliográfico realizado⁶¹, las principales tipologías de puentes optimizados son las siguientes:

Tabla No. 17. Tipologías de puentes optimizados

Tipología de puente	Ciclo de vida				Total
	Diseño	Construcción	Uso y Mantenimiento	Demolición y disposición final	
Arco	2%	0%	0%	0%	2%
Atirantado	6%	0%	0%	0%	6%
Box culvert-deprimido	4%	0%	0%	0%	4%
Colgante	2%	0%	0%	0%	2%
Losa aligerada	6%	0%	0%	0%	6%
Losa maciza	2%	0%	8%	0%	10%
Sección cajón	31%	2%	4%	2%	40%
Viga I	17%	0%	6%	0%	23%
Todos	0%	0%	6%	0%	6%
Total general	71%	2%	25%	2%	100%

Nota: Ver listado de artículos consultados en el apéndice.

Fuente: “Elaboración propia”.

En la tabla No.17, se aprecia que la tipología de puente más estudiada es la sección cajón (40%), seguida por el puente en viga I (23%) y el puente en losa maciza (10%).

Lo anterior debido a que estas tipologías son las más empleadas en el mundo, en lo que a puentes en concreto se refiere.

Con respecto al ciclo de vida se evidencia que la fase más estudiada es la de diseño (71%), seguida por la fase de uso y mantenimiento (25%); dejando relegada a lo

⁶¹ En apéndice, los artículos consultados.

que hace referencia a procesos constructivos y planificación de obra (2%), demolición y disposición final (2%).

4.3.2. Elementos estructurales optimizados

Los principales elementos estructurales optimizados, según el análisis bibliográfico⁶², son los siguientes:

Tabla No. 18. Elementos estructurales optimizados.

Tipología elemento	Sub total
Box culvert-tunel	3%
Estribo	3%
Cimentación	3%
Losa aligerada	5%
Cable	7%
Pila	7%
Cajón	10%
Losa maciza	29%
Viga I	31%
Total	100%

Nota: Ver listado de artículos consultados en el apéndice.
Fuente: “Elaboración propia”.

Tabla No. 19. Tipología de concreto optimizados

Tipología concreto	Sub total
Pretensado (prefabricado)	33%
Postensado (In situ)	29%
Reforzado (in situ)	38%
Total	100%

Nota: Ver listado de artículos consultados en el apéndice.
Fuente: “Elaboración propia”.

⁶² En apéndice, los artículos consultados.

De acuerdo a la tabla No.18, los principales elementos estructurales estudiados en optimización son: la viga en I (31%), seguido por la losa maciza (29%) y por la sección en cajón (10%).

De la tabla No.19, se evidencia que las tipologías de concreto pretensado (prefabricado)(33%) , postensado (in situ) (29%) y reforzado (in situ) (38%), se han estudiado relativamente en la misma proporción.

4.3.3. Funciones objetivo

De acuerdo a la literatura consultada⁶³, las funciones objetivo de mayor uso en la optimización de puentes, son las siguientes:

- **Costo de construcción⁶⁴:** Esta función evalúa el producto de la cantidad de cada actividad por sus precios unitarios (incluye costos de material, mano de obra, equipos (formaleta, equipos de colocación de concreto, equipos de izaje, entre otros) y transportes.

⁶³ En apéndice, los artículos consultados.

⁶⁴ Función objetivo referenciada en: (Ahsan, Rana, & Ghani, 2012), (Alcalá J. , 2009), (Alcalá, González-Vidosa, Yepes, & Martí, 2018), (Alcalá, Martí, Yepes, & García-Segura, 2014), (Aydin & Ayvaz, 2010), (Aydin & Ayvaz, 2013), (Baldomir, Hernández, Nieto, & Jurado, 2010), (Barone, Frangopol, & Soliman, 2014), (de Dios C. , 2006) ,(Frangopol & Liu, 2007), (Frangopol, Yang, García-Segura, & Yepes, 2017), (Hongyou, Xudong, Zhijun , & Hongping, 2017), (Jenkins, 1992), (Kumar, Gardoni, & Sanchez-Silva, 2009) , (Lee & Kim, 2007), (Liu & Hammad, 1997), (Liu & Frangopol, 2006), (Lounis & Cohn, 1993), (Lounis & Cohn, 1995), (Lute, 2011), (Luz, Yepes, & González-Vidosa, 2015), (Martí Albiñana, 2010), (Martí & González-Vidosa, 2010), (Martí, Yepes, & González-Vidosa, 2015), (Martí, Yepes, González-Vidosa, & Alcalá, 2013), (Martí, Yepes, González-Vidosa, & Luz, 2014), (Martínez, González-Vidosa, Hospitaler, & Yepes, 2010), (Martínez, González-Vidosa, Hospitaler, & Yepes, 2013), (Martínez, Hospitaler, Alcalá, & González-Vidosa, 2011), (Marzouk, Said, & El-said, 2009), (Perea C. , Alcalá, González-Vidosa, Yepes, & Payá-Zaforteza, 2008), (Perea C. , Alcalá, Yepes, González-Vidosa, & Hospitaler, 2008), (Sirca & Adeli, 2005), (Yepes, Alcalá, Perea, & González Vidosa, 2007), (Yepes, González-Vidosa, & Martí, 2015), (Yepes, Martí, & García-Segura, 2017).

$$C = \sum_{i=1}^n m_i p_i$$

Ecuación No. 4

Donde:

C : Costo de construcción.

m_i : cantidad de material o actividad.

p_i : precio unitario.

Tabla No. 20. Costos unitarios y valores unitarios de emisión CO2.

Construction units	CO ₂ (kg)	Cost (€)
kg of reinforcing steel in the beams (B-500-S)	3.03	2.81
kg of reinforcing steel in the slab (B-500-S)	3.04	1.50
kg of active steel (Y-1860-S7)	3.13	3.62
kg of beam steel fiber	2.35	1.10
m of beam formwork	15.49	80.37
m ² of slab formwork	41.91	32.00
m ³ of slab concrete HA-25	282.08	70.00
m ³ of slab concrete HA-30	303.47	75.00
m ³ of slab concrete HA-35	303.47	80.00
m ³ of slab concrete HA-40	303.47	85.00
m ³ of beam concrete HP-35	332.21	130.81
m ³ of beam concrete HP-40	332.21	142.74
m ³ of beam concrete HP-45	332.21	152.10
m ³ of beam concrete HP-50	332.21	163.59

Fuente: Tomada de Yepes, Martí, & García-Segura (2017).

- **Costo proceso constructivo**⁶⁵: Esta función evalúa la suma de los costos de vaciado de elementos prefabricados en patio de fundición y de vaciado en sitio

⁶⁵ Función referenciada en: (Marzouk, Said, & El-said, 2009)

de construcción, incluyendo el costo de lanzado e instalación del prefabricado (vigas).

$$CPC = CSC + CYC$$

Ecuación No. 5

Donde:

CPC: Costo procesos constructivo.

$$CSC = TIIC_{st} + (TDIC_{st} * TD_{st} * 7 / WD) + (MC_{slab} + LEDC_{st} + TD_{st})$$

Ecuación No. 6

$$CYC = TIIC_{cy} + (TDIC_{cy} * TD_{cy} * 7 / WD) + (MC_{beams} + LEDC_{cy} + TD_{cy})$$

Ecuación No. 7

CSC: Costo sitio de construcción.

CYC: Costo patio de vaciado/fundición.

TIIC_{st}: Costo indirecto independiente del tiempo para el sitio de construcción.

TDIC_{st}: Costo indirecto dependiente del tiempo para el sitio de construcción.

TD_{st}: Duración total de la construcción de la losa en el sitio de construcción.

WD: Cantidad de días laborales por semana.

MC_{slab}: Costo de la losa (incluye: refuerzo, concreto y lanzado de vigas).

LEDC_{st}: Costo de equipamiento por día.

TIIC_{cy}: Tiempo independiente del costo indirecto para el patio de vaciado/fundición seleccionado.

TDIC_{cy}: Costo indirecto dependiente del tiempo para el patio de lanzamiento seleccionado.

TD_{cy} : Duración total de la fabricación de vigas en el bastidor.

MC_{beams} : Costo de vigas prefabricadas (incluye: acero de refuerzo, sistema de tensado, concreto y aditivos).

$LEDC_{cy}$: Costo diario de mano de obra y equipo de vaciado/fundición.

Tabla No. 21. Patios de fundición disponibles para evaluación.

Casting yard	Initial cost (L.E.)	Hourly cost (L.E./h)	Storage capacity (beams)	Transportation cost (L.E./beam)	Transportation duration (min)
A	10,000	10	10	0	Uniform (1,2)
B	1,000,000	100	50	400	Uniform (60,120)
C	1,000	50	20	200	Uniform (15,30)
D	3,000	25	15	100	Uniform (30,60)

Fuente: Tomado de Marzouk, Said, & El-said (2009).

Tabla No. 22. Costos de recursos por hora.

Process	Resource	Assigned number	Hourly cost (L.E./h)
Beams fabrication	Formwork crew	1	30
	Reinforcement crew	Optimization variable	15
	Stressing crew	Optimization variable	20
	Concrete crew	1	30
	Yard crane	2	50
Beams erection	Formwork crew	2	30
	Reinforcement crew	6	15
	Concrete crew	1	60
	Concrete pump	1	90
	Cranes	1	60
	Launching girder system	1	150

Fuente: tomado de Marzouk, Said, & El-said (2009).

- **Emisiones CO2 (huella de carbono)⁶⁶:** Esta función evalúa las emisiones de CO2 generadas durante la construcción, desde la explotación y transformación de los materiales a emplear, hasta la entrega de la estructura para uso. Se cuantifica como el producto de la cantidad de cada actividad por valores unitarios de emisión:

$$CO_2 = \sum_{i=1}^n m_i eco2_i$$

Ecuación No. 8

Donde:

CO_2 : Emisiones CO2.

m_i : Cantidad de actividad.

$eco2$: Valor unitario de emisión de CO2

- **Energía consumida en la construcción⁶⁷:** Esta función evalúa la energía consumida en la construcción de la estructura (incluye energía consumida en la transformación de materiales, mano de obra, equipos (formaleta, equipos de colocación de concreto, equipos de izaje) y trasportes. Se cuantifica como el producto de la cantidad de cada actividad por valores unitarios de energía consumida:

⁶⁶ Función objetivo referenciada en: (Alcalá, Martí, Yepes, & García-Segura, 2014), (Martínez-Martín, González-Vidosa, Hospitaler, & Yepes, 2012), (Yepes, Martí, & García-Segura, 2015), (Yepes, Martí, & García-Segura, 2017).

⁶⁷ Función objetivo referenciada en: (Alcalá, González-Vidosa, Yepes, & Martí, 2018), (Martí, García-Segura, & Yepes, 2016), (Penadés Plá, García, & Yepes, 2019).

$$E = \sum_{i=1}^n m_i e_i$$

Ecuación No. 9

Donde:

C : Costo de construcción.

m_i : cantidad de actividad.

e_i : Energía unitaria empleada.

Tabla No. 23. Energía consumida por ejecución de actividad.

Unit measurements	Energy (kWh)
m ³ of scaffolding	20.4
m ² of formwork	8.7
m ³ of lighting	1137.5
kg of steel (B-500-S)	10.44
kg of post-tensioned steel (Y1860-S7)	12.99
m ³ of concrete HP-35	612.22
m ³ of concrete IIP-10	646.61
m ³ of concrete HP-45	681
m ³ of concrete IIP-50	715.39
m ³ of concrete HP-55	749.77
m ³ of concrete HP-60	784.16
m ³ of concrete HP-70	852.94
m ³ of concrete HP-80	921.72
m ³ of concrete IIP-90	990.49
m ³ of concrete HP-100	1059.27

Fuente: Tomado de Penadés Plá, García, & Yepes (2019).

- **Peso**⁶⁸: Esta función evalúa el peso de la estructura. Se cuantifica como el producto del volumen de cada elemento estructural por los pesos unitarios de cada elemento (depende de los materiales constitutivos):

$$W = \sum_{i=1}^n V_i w_i$$

Ecuación No. 10

Donde:

W : Peso de la estructura.

V_i : Volumen de cada elemento estructural.

w_i : Peso unitario de cada elemento.

- **Costo de mantenimiento**⁶⁹: esta función evalúa el costo de mantenimiento a lo largo de la vida útil de la estructura, traída a valor presente neto. El mantenimiento consiste en la reposición de recubrimiento de concreto, respecto al acero, y al sellado de grietas y fisuras superficiales. Esta función se cuantifica de la siguiente forma:

$$C_{ms} = \sum_{j=1}^{Nms1} \frac{Cms1j}{(1+v)^{t_j}} + \sum_{j=1}^{Nms2} \frac{Cms2j}{(1+v)^{t_j}}$$

Ecuación No. 11

⁶⁸ Función objetivo referenciada en: (Baldomir, Hernández, Nieto, & Jurado, 2010), (Dhillon, 1991), (Jenkins, 1992).

⁶⁹ Función objetivo referenciada en: (Frangopol, Yang, García-Segura, & Yepes, 2017), (Barone, Frangopol, & Soliman, 2014), (Frangopol, Lin, & Estes, 1997), (Kumar, Gardoni, & Sanchez-Silva, 2009), (Lee & Kim, 2007), (Liu & Hammad, 1997), (Liu & Frangopol, 2006), (Miyamoto, Kawamura, & Nakamura, 2000).

C_{ms} : Costo del mantenimiento a valor presente neto (El mantenimiento consiste en reposición de recubrimiento de concreto, respecto al acero y al sellado de grietas y fisuras superficiales).

N_{ms1} : Número de mantenimiento sobre las superficie de concreto.

$$C_{ms1j} = ((C_{wb} + C_{rm})V_{csi} + (C_{bc} + C_{tp})A_{si})$$

Ecuación No. 12

C_{wb} : Costo de lavado a presión por chorro de agua.

C_{rm} : Aplicación de la capa de mortero de reparación estructural.

C_{bc} : Aplicación del puente de adherencia concreto viejo-concreto nuevo.

C_{tp} : Costo del equipo móvil de izaje para realizar los trabajos.

V_{csi} : Volumen del concreto reemplazado.

A_{si} : Área de concreto reemplazada

- **Impacto ambiental de las labores de mantenimiento⁷⁰**: Esta función evalúa el impacto ambiental (emisión de CO2) de las labores de mantenimiento. Esta función se cuantifica de la siguiente forma:

$$E_{ms} = \sum_{j=1}^{N_{ms1}} E_{ms1j} + \sum_{j=1}^{N_{ms}} E_{ms2j}$$

Ecuación No. 13

E_{ms} : Emisión de CO2 en las labores de mantenimiento.

N_{ms1} : Número de mantenimiento sobre las superficies de concreto.

⁷⁰Función citada en: (Frangopol, Yang, García-Segura, & Yepes, 2017), (Penadés Plá,2017).

$$C_{ms1j} = \left((E_{wb} + E_{rm})V_{csi} + (E_{bc} + E_{tp})A_{si} \right)$$

Ecuación No. 14

Donde:

E_{wb} : Emisión CO2 de lavado a presión por chorro de agua.

E_{rm} : Emisión CO2 de la capa de mortero de reparación estructural.

E_{bc} : Emisión CO2 del puente de adherencia concreto viejo-concreto nuevo.

C_{tp} : Emisión CO2 del equipo móvil de izaje para realizar los trabajos.

V_{csi} : Volumen del concreto reemplazado.

A_{si} : Área de concreto reemplazada

Ecuación No. 15. Costo y emisiones de CO2 para las labores de mantenimiento..

Mean cost	Mean CO ₂ emission
$C_{wb} = 11.5 \text{ (€/m}^2\text{/cm)}$ [49]	$E_{wb} = 0.91 \text{ (kg/m}^2\text{/cm)}$ [48]
$C_{bc} = 16.41 \text{ (€/m}^2)$ [48]	$E_{bc} = 15.85 \text{ (kg/m}^2)$ [48]
$C_{rm} = 43.28 \text{ (€/m}^2\text{/cm)}$ [50]	$E_{rm} = 25.5 \text{ (kg/m}^2\text{/cm)}$ [48]
$C_{tp} = 53.71 \text{ (€/m}^2)$ [48]	$E_{tp} = 142.09 \text{ (kg/m}^2)$ [48]
$C_{run,cars} = 0.07 \text{ (€/km)}$ [25]	$E_{run,cars} = 0.22 \text{ (kg/km)}$ [25]
$C_{run,truck} = 0.34 \text{ (€/km)}$ [25]	$E_{run,truck} = 0.56 \text{ (kg/km)}$ [25]
$C_{wage} = 20.77 \text{ (€/h)}$ [25]	
$C_{driver} = 24.54 \text{ (€/h)}$ [25]	
$C_{cargo} = 3.64 \text{ (€/h)}$ [25]	

Fuente: Tomado de Frangopol, Yang, García-Segura, & Yepes (2017).

- **Impacto social de las labores de mantenimiento**⁷¹: El impacto social se mide a partir de las interrupciones del tráfico, durante las labores de mantenimiento.

Se calcula de la siguiente manera:

$$C_s = C_{run} + C_{time}$$

Ecuación No. 16

⁷¹ Función citada en: (Frangopol, Yang, García-Segura, & Yepes, 2017), (Penadés Plá,2017).

Donde:

C_s : Costo de impacto social.

C_{run} : Costos asociados a los desvíos.

C_{time} : Costos asociados a la pérdida de tiempo.

$$C_{run} = \sum_{i=1}^{Nm} \left[C_{run,car} \left(1 - \frac{T_{truck}}{100} \right) + C_{run,truck} \left(\frac{T_{truck}}{100} \right) \right] \frac{L_{detour} T_{detou} A_{DT}}{(1 + v)^t}$$

Ecuación No. 17

Donde:

Nm : Número de interrupciones del tráfico.

$C_{run,car}$: Costos asociados a mayores gastos en combustible y desgaste mecánico en automóviles.

$C_{run,car}$: Costos asociados a mayores gastos en combustible y desgaste mecánico en camiones.

T_{truck} : Promedio diario de tráfico de camiones.

A_{DT} : Tráfico promedio diario.

L_{detour} : Longitud de desvío.

T_{detour} : Tiempo consumido al recorrer el desvío.

$$C_{time} = \sum_{i=1}^{Nm} \left[C_{wage} O_{car} \left(1 - \frac{T_{truck}}{100} \right) + (C_{driver} O_{truck} + C_{cargos}) \left(\frac{T_{truck}}{100} \right) \right] \frac{L_{detour} T_{detour} A_{DT} / S}{(1 + v)^t}$$

Ecuación No. 18

Donde:

C_{wage} : Compensación salarial conductores de automóvil.

C_{driver} : Compensación salarial conductores de camión.

C_{carga} : Valor de la carga

O_{car} : Ocupación promedio de automóviles.

O_{truck} : Ocupación promedio de camiones.

s : Velocidad promedio en los desvíos.

$$E_{run} = E_{run} = \sum_{i=1}^{Nm} \left[E_{run,car} \left(1 - \frac{T_{truck}}{100} \right) + E_{run,truck} \left(\frac{T_{truck}}{100} \right) \right] L_{detour} T_{detour} A_{DT}$$

Ecuación No. 19

$E_{run,car}$: Emisión de CO2 automóviles en el recorrido de desvío.

$E_{run,truck}$: Emisión de Co2 camiones en el recorrido de desvío.

Tabla No. 24. Valores medios para el cálculo del impacto social.

Unit measurements	Mean value	COV
T_{truck} (%)	12	0.2
A_{DT} (veh/day)	8500	-
L_{detour} (km)	2.9	-
T_{detour} (day)	7	-
S (km/h)	50	0.15
O_{cars}	1.5	0.15
O_{truck}	1.05	0.15
v (%)	2	-

Fuente: Tomado de Frangopol, Yang, García-Segura, & Yepes (2017).

De acuerdo a la bibliografía consultada⁷², la distribución de la función objetivo en estudios de optimización, es la siguiente:

Tabla No. 25. Funciones objetivo

Tipología de puente	Función objetivo								Total
	CC	CPC	EC	ECC	PE	CM	IA	IS	
Arco	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	2%
Atirantado	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%
Box culvert-tunel	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3%
Colgante	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%
Losa aligerada	5%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	6%
Losa maciza	8%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	8%
Sección cajón	22%	2%	6%	3%	0%	0%	3%	3%	40%
Viga I	14%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	16%
Todos	0%	0%	0%	0%	0%	19%	0%	0%	19%
Total general	59%	2%	8%	5%	2%	19%	3%	3%	100%

Nota:

CC : Costo de construcción.

CPC:Costo proceso constructivo.

EC:Emisiones CO2 (Huella de carbono).

ECC:Energía consumida en la construcción.

PE:Peso de la estructura.

CM.Costo de mantenimiento.

IA:Impacto ambiental labores de mantenimiento.

IS: Impacto social labores de mantenimiento.

*Ver listado de artículos consultados en el apéndice.

Fuente: "Elaboración propia".

En la tabla No.25, se puede observar que la función objetivo más utilizada es la función costo de construcción (59%), seguida de la de costo de mantenimiento (19%). Se destaca la inclusión de funciones objetivo en todo el ciclo de vida del puente, aunque aún falta incluir funciones objetivo que involucren el desmonte y la

⁷² En apéndice, los artículos consultados.

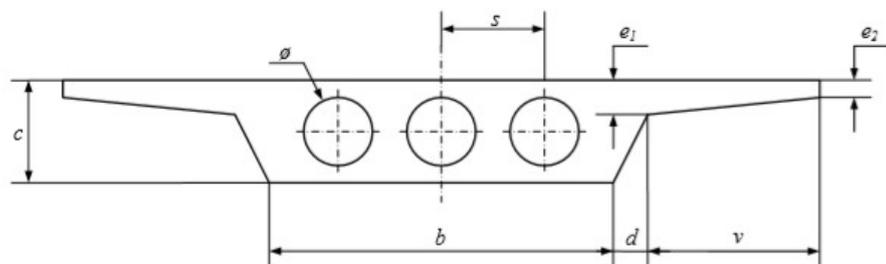
demolición de este, para tener el ciclo de vida de la estructura completo. La última tendencia es involucrar funciones objetivo con evaluación subjetiva, como lo es la estética, a través de relaciones geométricas de los elementos, definidas por los artistas y arquitectos, y optimizados a través de lógica difusa (Ohkubo, Dissanayake, & Taniwaki, 1998).

4.3.4. Variables de diseño

Generalmente en los problemas de optimización de puentes se manejan de 40 a 120 variables de tipología discreta. Las principales variables de diseño, encontradas son las siguientes:

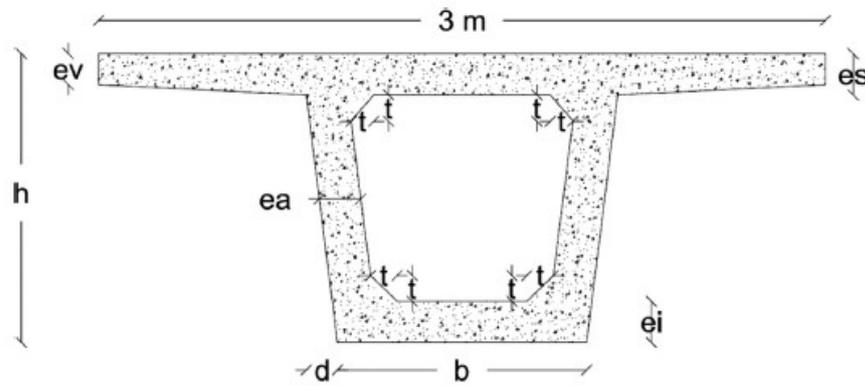
- **Geométricas:** Tiene que ver con las dimensiones de los elementos estructurales en concreto (ancho, alto, espesores, recubrimiento de acero, tamaño aligeramiento, distanciamiento entre aligeramiento, etc). Estas variables se hacen de tipo discretas, fijando algunas opciones predeterminadas de medida, verificando que estas sean funcionales a la hora de construir.

Figura No. 18. Variable geométricas tablero de puente pretensado aligerado.



Fuente: Tomado de Alcalá J. (2009).

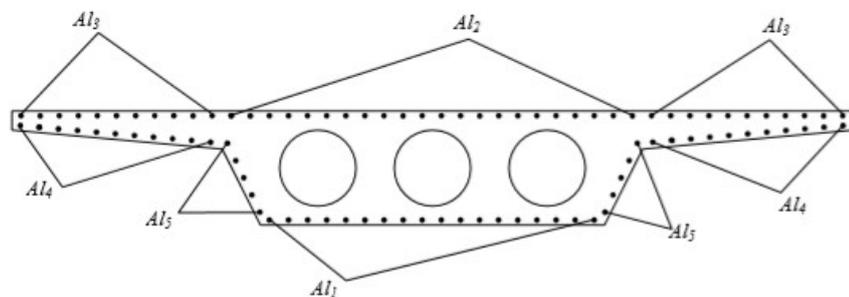
Figura No. 19. Variables geométricas puente sección en cajón.



Fuente: Tomado de Penadés Plá, García, & Yepes (2019).

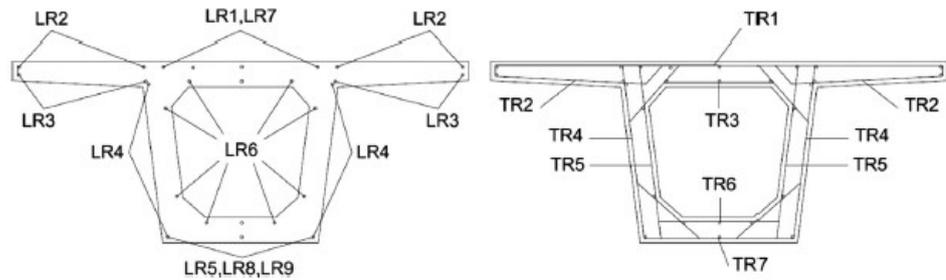
- **Refuerzo pasivo:** Tiene que ver con el refuerzo para soportar esfuerzos de tensión y corte generados en el uso de la estructura (resistencia, diámetro, espaciamiento/separación). Estas variables se hacen de tipo discreta, preestableciendo resistencias, diámetros y separación, de modo que la resistencia y los diámetros sean comerciales y la disposición, practica a la hora de construir.

Figura No. 20. Variables acero pasivo, tablero de puente pretensado aligerado.



Fuente: Tomado de Alcalá J. (2009).

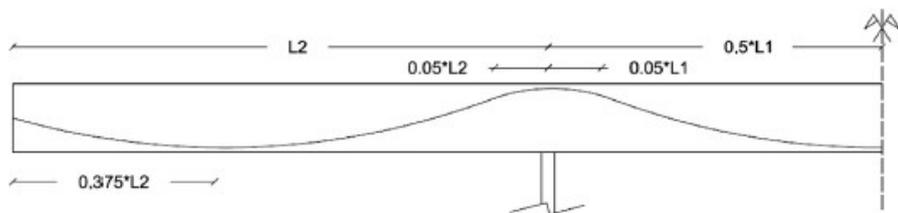
Figura No. 21. Variables acero pasivo, puente sección en cajón (Penadés Plá, García, & Yepes, 2019).



Fuente: Tomado de Penadés Plá, García, & Yepes (2019).

- Refuerzo activo (Acero pretensado/postensado)** : Tiene que ver con el refuerzo para soportar esfuerzos de tensión generados en el uso de la estructura (resistencia, diámetro de torón, número de torones, fuerza de tensionamiento). Estas variables se hacen del tipo discretas, predeterminando resistencia de cable, número de torones, y fuerzas y etapas de tensionamiento), de manera que las resistencias y los cables sean comerciales y las fuerzas de tensionamiento sean logrables con equipos disponibles en el mercado.

Figura No. 22. variables de acero activo, puentes de sección cajón.



Fuente: Tomado de Penadés Plá, García, & Yepes (2019).

- **Tipo de concreto:** Tiene que ver con la resistencia del concreto para resistir los esfuerzos de compresión, puede ser de resistencia común (de 3000 psi a 5000 psi) o de alta resistencia (de 6000 psi a 14000 psi).
- **Tipo de aditivos:** Tiene que ver con el uso de reductores de agua, retardantes, acelerantes, incorporadores de aire, macro fibras y micro fibras.

Tabla No. 26. Variables para optimización de un puente tipo Viga I.

Design variables	Variable type	Explicit constraint
Girder spacing (S) (m)	Discrete	$B_w/10 \leq S \leq B_w$
Girder depth (G_d) (mm)	Discrete	$1,000 \leq G_d \leq 3,500$
Top flange width (TF_w) (mm)	Discrete	$300 \leq TF_w \leq S$
Top flange thickness (TF_t) (mm)	Discrete	$75 \leq TF_t \leq 300$
Top flange transition thickness (TFT_t) (mm)	Discrete	$50 \leq TFT_t \leq 300$
Bottom flange width (BF_w) (mm)	Discrete	$300 \leq BF_w \leq S$
Bottom flange thickness (BF_t) (mm)	Discrete	$a \leq BF_t \leq 600$
Web width (W_w) (mm)	Discrete	$b \leq W_w \leq 300$
Number of strands per tendon (N_s)	Integer	$1 \leq N_s \leq 27$
Number of tendons per girder (N_T)	Integer	$1 \leq N_T \leq 20$
Lowest tendon position at the end from bottom fiber (y_1) (mm)	Continuous	$A_M \leq y_1 \leq 1,000$
Initial stage prestress (% of full prestress) (η)	Continuous	$1\% \leq \eta \leq 100\%$
Slab thickness (t) (mm)	Discrete	$175 \leq t \leq 300$
Slab main reinforcement ratio (ρ)	Continuous	$\rho_{min} \leq \rho \leq \rho_{max}$

Note: B_w = bridge width; a = clear cover + duct diameter; b = clear cover + web rebars diameter + duct diameter; A_M = minimum vertical edge distance for anchorage; and ρ_{min} and ρ_{max} are, respectively, minimum and maximum permissible reinforcement of slab according to AASHTO (2002).

Fuente: Tomado de Ahsan, Rana, & Ghani (2012).

- Ubicación de patio de construcción: Tiene que ver con la elección para el vaciado de vigas prefabricadas, en función del costo, espacio y distancia al sitio de construcción.
- Tiempo entre la fabricación y el inicio de instalación: Tiene que ver con la planificación de inicio de instalación de las vigas, una vez se inicie la fabricación el patio de construcción. Es importante para la reducción de costos de la logística de la construcción en general.
- Numero de formaletas: Tiene que ver con el número de juegos de moldes para construir las vigas prefabricadas.
- Métodos de curado del concreto: Tiene que ver con la forma de curado normal o acelerado (utilizando aditivos o con máquinas a vapor).
- Número de cuadrillas: tiene que ver con el número de cuadrillas en el vaciado del prefabricado y en el lanzamiento o montaje en sitio de construcción.
- Número de equipo de tensionado: tiene que ver con el número de equipos disponibles en patio de construcción, para pretensado o postensado de los elementos estructurales (vigas).

4.3.5. Parámetros de diseño

Los parámetros son valores predeterminados constantes, que no se entran a optimizar. Los principales parámetros encontrados son los siguientes:

- Parámetros geométricos: Hace referencia a magnitudes de la estructura predefinidas debido a preferencias y/o alguna restricción técnica.

- Parámetros relativos a la carga de diseño: cargas de diseño de acuerdo al uso, la ubicación y las condiciones ambientales a las que se va a someter la estructura; todo esto de acuerdo a la normativa y manuales aplicables.
- Parámetros de materiales: Hace referencia a las características técnicas de los materiales, relativo a su resistencia y tamaños.
- Parámetros económicos y/o de consumo: Hace referencia a los precios o consumos unitarios (Energía, CO2, peso unitario, entre otros), que se tienen como guía para evaluar la función objetivo.
- Parámetros de legislación o normativos: Hace referencia a los códigos, normas o leyes que se deben tener en cuenta para el diseño y optimización de la estructura.

Tabla No. 27. Parámetros para optimización de diseño de un box culvert.

<i>Geometric parameters</i>
Horizontal free span: 13.00 m
Vertical free span: 6.17 m
Earth cover: 1.50 m
<i>Loading related parameters</i>
Earth density: 20.00 kN/m ³
Coefficient of active earth pressure: 0.33
Coefficient of resting earth pressure: 0.50
<i>Ground bearing characteristics</i>
Ballast coefficient: 10 MN/m ³
<i>Economic related parameters</i>
Unit costs: see Table 2
<i>Legislative related parameters</i>
Code regulations: EHE/EC2/IAP-98
Security coefficients: EHE/EC2/IAP-98
<i>Exposure related parameters</i>
Internal ambient conditions: IIb (EHE)
External ambient conditions: IIa (EHE)

Fuente: Tomado de Perea C. Alcalá, Yepes, González-Vidosa, & Hospitaler (2008).

Tabla No. 28. Parámetros para optimización de diseño de un puente sección cajón.

<i>Material parameters</i>	
Maximum aggregate size	20 mm
Reinforcing steel	B-500-S
Post-tensioned steel	Y1860-S7
Strand diameter	$\Phi_s = 0.6"$
Tensioning time	7 days
<i>Geometrical parameters</i>	
Pedestrian bridge width	B = 3 m
Number of spans	3
Central span length	L1 = 50 m
External span length	L2 = 40 m
Clearance	5 m
Diaphragm thickness	1.2 m
<i>Exposure related parameters</i>	
External ambient conditions	IIb
<i>Regulation related parameters</i>	
Regulations	EHE-08/IAP-11/Eurocodes
Service working life	100 years
<i>Loading related parameters</i>	
Reinforced concrete self-weight	25 kN/m ³
Asphalt layer self-weight	24 kN/m ³
Mean asphalt thickness	47.5 mm
Bridge milling self-weight	1 kN/m
Live load	5 kN/m ²
Differential settling	5 mm

Fuente: Tomado de Penadés Plá, García, & Yepes (2019).

Tabla No. 29. Parámetros económicos y de consumo de energía, para la optimización del diseño de un tablero de concreto preesforzado.

Unit	Description	Embodied Energy (kW·h)	Cost (€)
m ³	scaffolding	4.11	10.12
m ²	slab formwork	32.13	41.93
m ²	lightening	82.38	110.14
kg	steel B-500-S	9.72	0.59
kg	steel Y-1860-S7	20.55	5.89
m ³	slab concrete HP 35	419.40	110.14
m ³	slab concrete HP 40	447.13	119.32
m ³	slab concrete HP 45	471.87	131.25
m ³	slab concrete HP 50	546.10	146.77

Fuente: Tomado de Alcalá, González-Vidosa, Yepes, & Martí (2018).

4.3.6. Restricciones de diseño

Las restricciones son las condiciones que el modelo de optimización debe cumplir, generalmente hace referencia a relaciones geométricas preestablecidas para los elementos estructurales y estados límite⁷³ (servicio⁷⁴, fatiga y fractura⁷⁵, resistencia⁷⁶ y eventos extremos⁷⁷) establecido por las normas⁷⁸ aplicables para el diseño (CCP-14⁷⁹, AASHTO⁸⁰, EC 2⁸², JTG D-D60-2004⁸³, JTG/T D60-01-2004⁸⁴, KRTA⁸⁵, DMRB⁸⁶, SHB⁸⁷, SSCPRB⁸⁸).

Siguiendo a Ahsan, Rana, & Ghani (2012), los estados límite se pueden agrupar de la siguiente forma:

- Tensión máxima de trabajo a esfuerzos a flexión.
- Resistencia última a esfuerzos a flexión.

⁷³ Los estados límite están concebidos para proveer un puente construible y útil, capaz de soportar las cargas de diseño con seguridad por un periodo de vida especificado.

⁷⁴ **Estado límite de servicio:** Se considera como el conjunto de restricciones impuestas a las tensiones, deformaciones, y anchos de fisura bajo las condiciones normales de servicio (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2014).

⁷⁵ **Estado límite de fatiga y fractura:** Se considera como el conjunto de restricciones impuestas al rango de tensiones como resultado del paso de un único camión de diseño, ocurriendo el número anticipado de ciclos del rango de tensión (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2014).

⁷⁶ **Estado límite de resistencia:** Se debe considerar para garantizar que se provee de resistencia y estabilidad, tanto local como global, para resistir las combinaciones de carga estadísticamente significativas que se espera que un puente experimente durante su ciclo de vida de diseño (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2014).

⁷⁷ **Estado límite de eventos extremos:** Se debe considerar para garantizar la supervivencia estructural de un puente durante un sismo o inundación severa, o cuando se presente un choque con una embarcación, o un vehículo, posiblemente bajo condiciones de socavación (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2014).

⁷⁸ Las normas no son concebidas para suplantar la capacidad ni el criterio profesional del diseñador, solamente estipulan los requisitos mínimos necesarios para proveer la seguridad pública (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2014).

⁷⁹ Norma Colombiana de Diseño de Puentes (Bogotá D.C, 2014).

⁸⁰ American Association of State Highway and Transportation Officials-Standard Specifications for Highway bridges (Washington, 1994).

⁸¹ American Association of State Highway and Transportation Officials-LRFD Bridge Design Specifications (Washington, 2014).

⁸² Eurocódigo 2.

⁸³ General Code for Design of Highway Bridge and culverts, China, 2004.

⁸⁴ Wind-resistant Design Specification for Highway Bridges, China, 2004.

⁸⁵ Korean roadway bridge design code, Ministry of land, transport and marine affairs, Korea (2005).

⁸⁶ Design manual for roads and bridge

⁸⁷ Specifications for highway bridges, Japan road Assn., Japan, 1994.

⁸⁸ Standard specifications and code of practice for road bridges, Indian Roads Congress, India.

- Resistencia última al esfuerzo cortante y torsión.
- Ductilidad.
- Deflexiones máximas
- Estabilidad lateral (vigas).
- Excentricidad máxima (torones).
- Fisuración.
- Fatiga.
- Relaciones geométricas mínimas de elementos (Longitud, ancho, espesor).
- Mínimos recubrimientos de acero.

4.3.7. Técnicas de optimización

De acuerdo al análisis bibliométrico realizado⁸⁹, las técnicas de optimización más empleadas, son las siguientes:

Tabla No. 30. Técnicas de optimización metaheurísticas empleadas.

Tipología puente	Heurística-Metaheurística empleada												Total
	AG	BA	PSO	CH	EV	MM	RS	RN	BG	RT	AU	AL	
Arco	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%
Atirantado	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%
Box culvert-deprimido	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4%	0%	0%	0%	4%	0%	7%
Colgante	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%
Losa aligerada	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4%	0%	2%	0%	0%	0%	5%
Losa maciza	7%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	9%
Sección cajón	9%	2%	0%	7%	0%	5%	13%	0%	0%	0%	4%	2%	42%
Viga I	7%	0%	0%	0%	2%	0%	5%	2%	0%	2%	2%	2%	22%
Todos	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%
Total	36%	2%	2%	7%	2%	5%	25%	2%	4%	2%	9%	4%	100%

Nota:

AG : Algoritmos genéticos.

⁸⁹ En apéndice, los artículos consultados.

BA: Búsqueda armónica.
PSO: Búsqueda enjambre.
CH: Colonia de hormigas.
EV:EVOP.
MM: Algoritmos meméticos.
RS: Recocido simulado.
RN:Redes neuronales.
BG:Búsqueda por gradiente.
RT: Reencadenamiento de trayectorias.
AU:Aceptación por umbrales.
AL: Algoritmo luciérnagas
Fuente: "Elaboración propia".

En la tabla No.30, se puede apreciar que las técnicas metaheurísticas más utilizadas son los algoritmos genéticos (36%) y el recocido simulado (25%); sin embargo, es de aclarar que no se ha comprobado que un método sea mejor que otro (Teorema No Free Lunch⁹⁰), el rendimiento de la metaheurística depende de la calidad de la codificación, del conocimiento del problema y de la experiencia del programador⁹¹. Es muy habitual que se empleen algoritmos híbridos (combinación de metaheurísticas), para mejorar el rendimiento. Los programas más utilizados para codificación de la meta heurísticas son Matlab⁹², Fortran⁹³, Visual Basic⁹⁴ y GAMS/MINOS⁹⁵, y con respecto al diseño estructural SAP⁹⁶, ANSYS⁹⁷, ABAQUS⁹⁸

⁹⁰ El teorema de Free Lunch, establece que una metaheurística que es muy eficiente para un determinado tipo de problemas es muy ineficiente para algún otro tipos de problemas, por lo tanto no es posible generalizar la supremacía de una técnica metaheurística con respecto a las otras (Wolpert & Macready, 1997).

⁹¹ Aun no se sabe con exactitud por qué un algoritmo o método metaheurístico funciona o no funciona para solucionar un determinado problema (Amir-Hosseini, Xin-She, Siamak, & Amir-Hosseini, 2013).

⁹² <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

⁹³ <https://www.fortran.com/the-fortran-company-homepage/whats-new/g95-windows-download/>

⁹⁴ <https://www.microsoft.com/es-co/download/details.aspx?id=10019>

⁹⁵ https://www.gams.com/latest/docs/S_MINOS.html

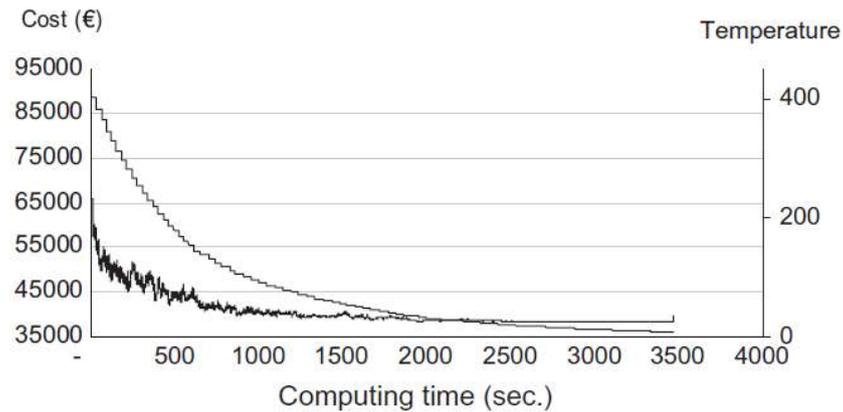
⁹⁶ <https://www.csiespana.com/software/2/sap2000#>

⁹⁷ <https://www.ansys.com/>

⁹⁸ <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/productos/abaqus/>

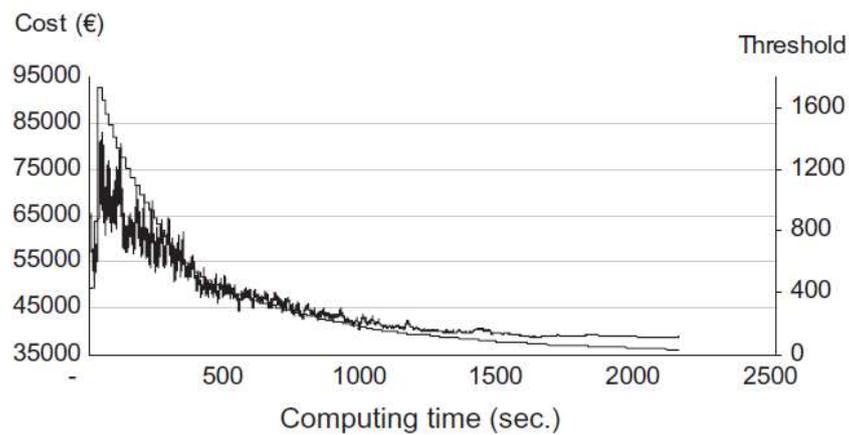
y ETABS⁹⁹. Generalmente los programas encuentran soluciones buenas entre las 500 y 3000 iteraciones con tiempos de cómputo que varían entre 30 min y 90 min.

Tabla No. 31. Evolución del costo y la temperatura Vs. Tiempo de cómputo, método recocido simulado.



Fuente: Tomado de Martí & González-Vidosa (2010).

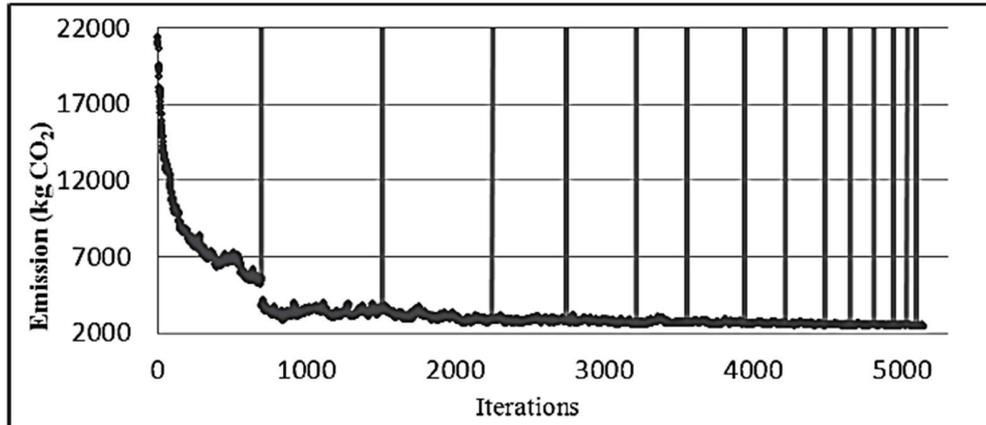
Tabla No. 32. Evolución del costo y el umbral Vs. Tiempo de cómputo, método aceptación por umbrales.



Fuente: Tomado de Martí & González-Vidosa (2010).

⁹⁹ <https://www.csiespana.com/software/5/etabs>

Tabla No. 33. Evolución de las emisiones CO₂ Vs. Número de iteraciones, método colonia de hormigas (Alcalá, Martí, Yepes, & García-Segura, 2014)



Fuente: Tomado de Alcalá, Martí, Yepes, & García-Segura (2014).

4.3.8. Principales conclusiones en las investigaciones sobre optimización de diseño de puentes

Las conclusiones más relevantes encontradas en los artículos estudiados, son las siguientes:

- El costo mínimo y las emisiones CO₂ en la etapa de construcción, tienen una correlación directamente proporcional (objetivos alineados).
- El costo mínimo y el peso de la estructura tienen una correlación directamente proporcional (objetivos alineados).
- Con un aumento reducido del costo (6%-12.5%), se logra mayor factor de seguridad y durabilidad en las estructuras de concreto (Factor de seguridad global de 1 a 1.4).

- La relación entre el costo y las emisiones CO₂, durante la construcción se mantienen para todos los niveles de seguridad; por lo tanto, la optimización de costos es un buen enfoque para minimizar las emisiones CO₂, independiente del nivel de seguridad.
- A pesar de que la estructuras se deterioran de forma diferencial, se recomienda realizar la reparación de todas las superficies conjuntamente para minimizar el impacto social (Genera ahorros económicos).
- El inicio temprano del primer mantenimiento, mejora la vida útil de la estructura, pero eleva el costo de operación a lo largo del ciclo de vida.
- Para reducir las emisiones de CO₂, se debe reducir el número de mantenimientos a lo largo de la vida útil del puente.
- El menor número de mantenimientos a lo largo de la vida útil del puente, minimiza el impacto social.
- El aumento de espesor del recubrimiento del acero, aumenta el costo de construcción, pero genera reducciones importantes en el costo del mantenimiento a lo largo del ciclo de vida.
- Cuando no es posible el aumento en el recubrimiento del acero, un aumento de resistencia del concreto, puede generar reducciones importantes en el costo del mantenimiento a lo largo del ciclo de vida.
- La adición de macro fibra aumenta la resistencia del concreto, pero a costos económicos muy altos (Económicamente no resulta eficiente).

- En la fase de fabricación (producción de acero y producción de cemento) y en la fase de mantenimiento, se obtiene la mayor producción de CO₂.
- El optimizar la energía empleada, no asegura la optimización del costo mínimo en la construcción de la estructura.
- Con los procesos de optimización se ha logrado reducir los costos de construcción en alrededor de un 15% al 30%, con respecto al diseño convencional.
- Es importante fijar muy bien las restricciones en los métodos de optimización, para no tener diseños económicos pero inseguros. En el caso de no tener bien definidas dichas restricciones, se recomienda el uso del diseño óptimo basado en la teoría de confiabilidad.
- Un incremento del 6% en el costo del puente, en ocasiones, puede aumentar su vida útil al doble.

5. CONCLUSIONES

- En el periodo entre 1990 y 2019¹⁰⁰, se dio un crecimiento exponencial en la investigación sobre la optimización de puentes en concreto; lo anterior debido a la rápida evolución de la inteligencia artificial y las ciencias de la computación en dicho espacio de tiempo. En la actualidad, las investigaciones son lideradas por universidades de España, Estados Unidos y China¹⁰¹. Con respecto a los grupos de investigación, los más fuertes son los de la Universidad Politécnica de Valencia (Víctor Yepes Piquera. PhD, España) y el de la Universidad de Lehigh (Dan Frangopol PhD, Estados Unidos)¹⁰². La investigación en Latinoamérica y específicamente en Colombia, es muy escasa en este campo.
- Las revistas que más publicaciones tiene en el área de la optimización heurística y/o metaheurística, en el diseño de puentes, son¹⁰³: Journal Structural Engineering, Engineering Structures y Advances in Engineering Software.
- Las fases del ciclo de vida más estudiada en la optimización de puentes son¹⁰⁴: diseño (71%) y, uso y mantenimiento (71%).
- Las tipologías de puentes más estudiadas son¹⁰⁵: la sección de cajón (40%), el puente en viga I (23%) y el puente en losa maciza (10%). Lo anterior debido a

¹⁰⁰ Ver Figura No.1. Histograma de publicaciones, relacionadas con el uso de técnicas de optimización heurística y/o metaheurística, en el diseño de puentes en concreto.

¹⁰¹ Ver Figura No.5. Documentos publicados por país, relacionados con el uso de técnicas de optimización heurística y/o metaheurística, en el diseño de puentes en concreto

¹⁰² Ver Figura No.4 Documentos publicados por autor, relacionados con el uso de técnicas de optimización heurística y/o metaheurística, en el diseño de puentes en concreto

¹⁰³ Ver Tabla No.2.Revistas que presentan artículos relacionados con el uso de técnicas de optimización heurísticas y metaheurísticas, en el diseño de puentes en concreto.

¹⁰⁴ Ver Tabla No.17. Tipologías de puentes optimizados.

¹⁰⁵ Ver Tabla No.17. Tipologías de puentes optimizados.

que estas tipologías son las más empleadas en el mundo, en lo que a puentes en concreto se refiere.

- Los principales elementos estructurales estudiados en optimización, son¹⁰⁶: la viga en I (31%), la losa maciza (29%) y la sección cajón (10%).
- Las tipologías de concreto pretensado (prefabricado)(33%) , postensado (in situ) (29%) y reforzado (in situ) (38%), se han estudiado relativamente en la misma proporción¹⁰⁷.
- Las funciones objetivo más utilizadas son¹⁰⁸: El costo de construcción (59%) y el costo de mantenimiento (19%).
- Las principales variables a optimizar en el diseño de puentes, son: Las geométricas, refuerzo pasivo, refuerzo activo (pretensado y postensado), tipos de concreto y tipos de aditivos.
- Las técnicas metaheurísticas más utilizadas en el diseño de puentes son¹⁰⁹: Los algoritmos genéticos (36%) y el recocido simulado (25%).
- Ante la variedad de técnicas heurísticas y metaheurísticas, no se puede concluir que una funciona mejor que otra, ya que los resultados obtenidos dependen de la estructura del problema (modelo matemático, la combinación de los mecanismos inherentes a las técnicas (proceso híbrido), conocimiento experto del problema, entre otros) (Teorema de no free lunch).

¹⁰⁶ Ver Tabla No.18.Elementos estructurales optimizados.

¹⁰⁷ Ver Tabla No.19.Tipología de concreto optimizados

¹⁰⁸ Ver Tabla No.25.Funciones objetivo

¹⁰⁹ Ver Tabla No.30.Técnicas de optimización metaheurísticas empleadas

- Se obtienen mejores resultados en la resolución de problemas (menor costo computacional y reducción de tiempo) cuando se aplica la combinación de varias técnicas heurísticas (Proceso híbridos).
- Con los procesos de optimización se ha logrado reducir los costos de construcción en alrededor de un 15% al 30%, con respecto al diseño convencional.

6. RECOMENDACIONES

- Al emplear técnicas de optimización, es de gran importancia fijar claramente las restricciones de seguridad y estabilidad, para no caer en la mala práctica de la hiper-optimización, en donde se tienen estructuras económicas, pero con factores de seguridad muy bajos.
- Latinoamérica y en especial Colombia, deben impulsar la investigación en esta área, la cual generaría grandes beneficios ante el desarrollo en infraestructura que se está generando con las vías 4G.
- Aún se tiene las siguientes preguntas sobre diseño de puentes y la inteligencia artificial, las cuales solo se puede resolver con mayor cantidad de estudios en el campo (Yepes V. , 2020):
 - ¿Es capaz la inteligencia artificial de diseñar automáticamente estructuras?
 - ¿Es capaz la inteligencia artificial de suplantar la experiencia del ingeniero en el prediseño de la estructura?
 - ¿Puede alcanzarse una economía importante en los costos de construcción de las estructuras sin disminución de la calidad ni de la seguridad?
 - ¿Puede optimizarse varios criterios o parámetros a la vez?¿Existen las estructuras de bajo costo y alta seguridad?.
 - ¿Debe revisarse las normas y/o códigos con el cálculo optimizado de estructuras?
- Las futuras líneas de investigación en el campo de optimización de puentes, pueden ser las siguientes:

- Optimización en la toma de decisiones sobre la construcción de un puente en determinado sitio, teniendo en cuenta variables económicas, de impacto social, de seguridad estructural, de impacto ambiental, entre otras.
- Implementación en el software comercial de las técnicas de optimización.
- Optimización de la fase constructiva en puentes de concreto.
- Optimización del diseño estructural teniendo en cuenta eventos extremos (Tsunamis, grandes terremotos, inundaciones, deslizamiento de tierras, entre otras).
- Nuevas técnicas de optimización, que minimicen los costos computacionales y de tiempo.
- Inclusión de la demolición o retiro del puente, en la optimización del ciclo de vida.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahsan, R., Rana, S., & Ghani, N. (2012). Cost Optimum Design of Posttensioned I-Girder Bridge Using Global Optimization Algorithm. *Journal of Structural Engineering*, 273-284.
- Alcalá, J. (2009). Optimización heurística económica de tableros de puentes losa prestensados. *Tesis doctoral*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Alcalá, J., González-Vidoso, F., Yepes, V., & Martí, J. (2018). Embodied energy optimization of prestressed concrete slab bridge decks. *Technologies*, 400-409.
- Alcalá, J., Martí, J., Yepes, V., & García-Segura, T. (2014). Optimization of concrete I-beams using a new hybrid glowworm swarm algorithm. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 1190-1205.
- Al-Rousan, R., Haddad, R., & Mutaz, A. (2014). Optimization of economic practicability of fiber-reinforced polymer (FRP) cable-stayed bridge decks. *Bridge Structures*, 129-143.
- Althöfer, I., & Koschnick, K. (1996). On the convergence of threshold accepting. *Applied Mathematics and Optimization*, 957-969.
- Álvarez-Valdés, O., & Tamarit, J. (1989). Algoritmos heurísticos deterministas y aleatorios en secuenciación de proyectos con recursos limitados. *Qüestió*, 1-3.

Amir-Hosseini, G., Xin-She, Y., Siamak, T., & Amir-Hosseini, A. (2013). Metaheuristic Algorithms in Modeling and Optimization. *Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures*, 1-24.

Ansys. (10 de Enero de 2020). *Ansys Structures*. Obtenido de <https://www.ansys.com/>

Araujo, I., Maldonado, E., & Cho, G. (2011). Ambient vibration testing and updating of the finite element model of a simply supported beam bridge. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 344-354.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). (2014). Norma Colombiana de Diseño de Puentes (CCP-14). Colombia: Ministerio de Transporte de Colombia.

Aswad, A., Djazmati, B., & Aswad, G. (2002). Optimal sizing of prestressed bridge superstructures in Pennsylvania by LRFD. *Precast/Prestressed Concrete Institute*, 26-37.

Aydin, Z., & Ayvaz, Y. (2010). Optimum topology and shape design of prestressed concrete bridge girders using a genetic algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 151-162.

Aydin, Z., & Ayvaz, Y. (2013). Overall cost optimization of prestressed concrete bridge using genetic algorithm. *Korean Society of Civil Engineering*, 769-776.

Baldomir, A., Hernández, S., Nieto, F., & Jurado, A. (2010). Cable optimization of a long span cable stayed bridge in la Coruña (Spain). *Advances in Engineering Software*, 931-938.

Barone, G., Frangopol, D., & Soliman, M. (2014). Optimization of Life-Cycle Maintenance of Deteriorating Bridges with Respect to Expected Annual System Failure Rate and Expected Cumulative Cost. *Journal of Structural Engineering*.

Barr, R., Golden, B., James, K., Resende, M., & Stewart, W. (1995). Designing and reporting on computational experiments with heuristics methods. *Journal of Heuristics*, 9-32.

Cañedo, R., Rodríguez, R., & Montejo, M. (2010). Scopus: la mayor base de datos de literatura científica arbitrada al alcance de los países subdesarrollados. *Revista Cubana de Información en Ciencias de la Salud*.

Cohn, M., & Lounis, Z. (1994). Optimal design of structural concrete bridge systems. *Journal of Structural Engineering*, 2653-2674.

Consoli, S., & Darby-Dowman, K. (2006). *Combinatorial Optimization and Metaheuristics*. Brunel University Technical Report.

CSI Computers & Structures, Inc. (11 de Enero de 2020). *ETABS*. Obtenido de <https://www.csiespana.com/software/5/etabs>

CSI Computers & Structures, Inc. (10 de Enero de 2020). *SAP 2000*. Obtenido de <https://www.csiespana.com/software/2/sap2000#>

Das Gupta, C., & Paul, H. (1986). Optimization of Prestressed Concrete Bridge Girders. *Engineering Optimization*, 13-24.

Dassault Systemes. (6 de Enero de 2020). *ABAQUS*. Obtenido de <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/productos/abaqus/>

- de Dios, C., Alcalá, J., Yepes, V., & González-Vidoso, F. (2006). Optimum design of the box frame tunnel of the underground line Palma - UIB. *X International Conference on Project Engineering*, (págs. 12-15). Valencia (España).
- Dhillon, B. (1991). Optimum Design of Composite Hybrid Plate Girders. *Journal of Structural Engineering*, 2088-2098.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., & Coloni, A. (1996). The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B*, 1-13.
- Dueck, G. (1993). New Optimization Heuristic: The Great Deluge Algorithm and Record-to-Record Travel. *Journal of Computational Physics*, 86-92.
- Dueck, G., & Scheuer, T. (1990). Threshold Accepting: A general purpose optimization algorithm appearing superior to simulated annealing. *Journal of Computational Physics*, 161-175.
- Elsevier. (s.f.). *SCOPUS*. Obtenido de <https://www.elsevier.com/solutions/scopus>
- Enright, M., & Frangopol, D. (1999). Maintenance planning for deteriorating concrete bridges. *Journal of Structural Engineering*, 1407-1414.
- Escobar, J., & Linfati, R. (2012). Un algoritmo metaheurístico basado en recocido simulado con espacio de búsqueda granular para el problema de localización y ruteo con restricciones de capacidad. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 1-12.
- Esmoris, A. V. (1 de Julio de 2013). Algoritmos heurísticos en optimización. *Tesis de maestría*. Santiago de Compostela, Coruña, España: Universidad Santiago de Compostela.

Estes, A., & Frangopo, D. (2001). "Minimum expected cost-oriented optimal maintenance planning for deteriorating structures: Application to concrete bridge decks. *Reliability Engineering & System Safety*, 281-291.

Fereig, S. (1996). Economic preliminary design of bridges with prestressed I-girders. *Journal of Bridge Engineering*, 18-25.

Fernández-Vargas, J., & Bonilla-Petriciolet, A. (2014). Desarrollo de un algoritmo de optimización global en colonias de hormigas con selección de región factible para espacios continuos. *Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 178-187.

Frangopol, D., & Liu, M. (2007). Bridge network maintenance optimization using stochastic dynamic programming. *Journal of Structural Engineering*, 1772-1782.

Frangopol, D., Enright, M., & Estes, A. (1999). Integration of maintenance, repair, and replacement decisions in bridge management based on reliability, optimization, and life-cycle cost. *8th International Bridge Management Conference*, (págs. 1-13). Denver (Colorado).

Frangopol, D., Yang, D., García-Segura, T., & Yepes, V. (2017). Lifetime reliability-based optimization of post-tensioned box-girder. *Engineering Structures*, 381-391.

Gallego Rendón, R. A., Toro Ocampo, R. A., & Escobar Zuluaga, A. H. (2015). *Técnicas heurísticas y metaheurísticas*. Pereira (Colombia): Universidad Tecnológica de Pereira.

GAMS. (5 de Enero de 2020). *MINOS and QUADMINOS*. Obtenido de https://www.gams.com/latest/docs/S_MINOS.html

- Geem, Z., Kim, J., & Loganathan, G. (2001). A new heuristic optimization algorithm: Harmony Search. *Simulation*, 60-68.
- Geren, K., & Tadros, M. (1994). The NU precast prestressed concrete bridge I-girder series. *Precast/Prestressed Concrete Institute*, 26-39.
- Glover, F. (1986). Future paths for Integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operations Research*, 533-549.
- Glover, F. (1998). A template for scatter search and path relinking. *Artificial Evolution, Lecture Notes in Computer Science* , 13-54.
- Godinez, G. (2010). *Diseño y construcción de puentes*. Venezuela: Universidad de Oriente.
- Hart, J., & Shogan, A. (1987). Semi-greedy heuristics: An empirical study. *Operations Research Letter*, 107-114.
- Hassanain, M., & Loov, R. (1999). Design of prestressed girder bridges using high performance concrete - An optimization approach. *Precast/Prestressed Concrete Institute*, 40-55.
- Hernández, S., Fontan, N., & Marcos, D. (2010). VTOP. An improved software for design optimization of prestressed concrete beams. *Advances in Engineering Software*, 415-421.
- Herrera, F. (2009). Introducción a los algoritmos metaheurísticos. *XIII Conferencia de la asociación Española para la inteligencia artificial* (pág. 130). Granada: Universidad de Granada.
- Herrera, J. (1996). *Puentes*. Bogotá D.C: Universidad Católica de Colombia.

Holland, J. (1975). *Adaptation In Natural and Artificial Systems. The University of Michigan Press.*

Hongyou, C., Xudong, Q., Zhijun , C., & Hongping, Z. (2017). Layout and size optimization of suspension bridges based on coupled. *Engineering Structures*, 170-183.

Jenkins, W. (1992). Plane frame optimum design environment based on genetic algorithm. *Journal of Structural Engineering*, 3103-3112.

Jones, H. (1985). Minimum Cost Prestressed Concrete Beam Design. *Journal of Structural Engineering*, 2464-2478.

Kasuga, A., Arai, H., Breen, J., & Furukawa, K. (1995). Optimum cable-force adjustments in concrete cable-stayed bridges. *Journal of Structural Engineering*, 685-696.

Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. *Proceedings of ICNN95-International Conference on Neural Networks*, 1942-1948.

Kim, K., & Park, M. (2008). Optimum design of LB-DECK plate girder bridge. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, 135-142.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C., & Vecchi, M. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science* 220, 671-680.

Koh, H., Park, K., & Kim, H. (2008). "Maintenance planning for deteriorating bridge using preference- based optimization method. *Korean Society of Civil Engineers*, 223-231.

Kumar, R., Gardoni, P., & Sanchez-Silva, M. (2009). Effect of cumulative seismic damage and corrosion on the life-cycle cost of reinforced concrete bridges. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 887-905.

Lebrada-Nueva, Y., Enríquez-Urbano, J., & García-Ojito, Y. (2014). Un algoritmo de búsqueda local iterada como solución al problema de la mochila. *Programación Matemática y Software*, 57-64.

Lee, C., & Kim, S. (2007). GA-based algorithm for selecting optimal repair and rehabilitation methods for reinforced concrete (RC) bridge decks. *Automation in Construction*, 153-164.

Liu, C., & Hammad, A. (1997). Maintenance strategy optimization of bridge decks using genetic algorithm. *Journal of Transport*, 91-100.

Liu, C., & Hammad, A. (1997). Multiobjective Optimization of Bridge Deck Rehabilitation Using Genetic Algorithm. *Microcomputers in Civil Engineering*, 431-443.

Liu, M., & Frangopol, D. (2006). "Optimizing bridge network maintenance management under uncertainty with conflicting criteria: Life-cycle maintenance, failure, and user costs. *Journal of Structural Engineering*, 1835-1845.

Lounis, Z. (1993). Multiobjective optimization of prestressed concrete structures. *Journal of Structural Engineering*, 794-808.

Lounis, Z., & Cohn, M. (1993). Optimization of precast prestressed concrete bridge girder systems. *Precast/Prestressed*, 61-78.

- Lounis, Z., & Cohn, M. (1995). Computer-aided design of prestressed concrete cellular bridge decks. *Microcomputers in Civil Engineering*, 1-11.
- Lounis, Z., Mirza, M., & Cohn, M. (1997). Segmental and conventional recast prestressed concrete I-bridge girders. *Journal of Structural Engineering*, 73-82.
- Lourenco, H., Martin, O., & Stützle, T. (2010). Iterated Local Search: Framework and Applications. En M. Gendreau, & J. Potvin, *Handbook of Metaheuristic* (págs. 1-38). New York: Springer.
- Lute, V. (2011). Genetic Algorithms-based Optimization of Cable Stayed Bridges, ". *Software Engineering Applications*, 571-578.
- Luz, A., Yepes, V., & González-Vidosa, F. (2015). Diseño de estribos abiertos en puentes de carretera obtenidos mediante optimización híbrida de escalada estocástica. *Informes de la construcción*, 540-555.
- Madhkhan, M., Kianpour, A., & Harchegani, M. (2013). Life-cycle cost optimization of prestressed simple-span concrete bridges with simple and spliced girders. *Iranian Journal of Science and Technology*, 53-56.
- Marmaneu, A. (Julio de 2016). Aplicabilidad del análisis multivariante a las técnicas de optimización de los puentes de hormigón. *Tesis de maestría* . Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Marsh, P., & Frangopol, D. (2007). Lifetime multiobjective optimization of cost and spacing of corrosion rate sensors embedded in a deteriorating reinforced concrete bridge deck. *Journal of Structural Engineering*, 777-787.

Martí Albiñana, J. V. (2010). Diseño óptimo de tableros isostáticos de vigas artesas prefabricadas pretensadas. *Tesis doctoral*. Valencia, Valencia, España: Universidad Politecnica de Valencia.

Martí, J., & González-Vidosa, F. (2010). Design of prestressed concrete precast pedestrian bridges by heuristic optimization. *Advances in Engineering Software*, 916-922.

Martí, J., García-segura, T., & Yepes, V. (2016). Structural design of precast-prestressed concrete U-beam road bridges based on embodied energy. *Journal of Cleaner Production*, 231-240.

Martí, J., Yepes, V., & González-Vidosa, F. (2015). Memetic Algorithm Approach to Designing Precast-Prestressed Concrete Road Bridges with Steel Fiber Reinforcement. *Journal of Structural Engineering*.

Martí, J., Yepes, V., González-Vidosa, F., & Alcalá, J. (2013). Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing. *Engineering Structures*, 342-352.

Martí, J., Yepes, V., González-Vidosa, F., & Luz, A. (2014). Diseño automático de tableros óptimos de puentes de carretera de vigas artesa prefabricadas mediante algoritmos meméticos híbridos. *Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 145-154.

Martí, R., & Laguna, M. (2002). Scatter search. En T. a. Trends. Springer-Verlang.

Martí, R., Pardalos, P., & Resende, M. (2018). *Handbook of Heuristics*. Switzerland: Springer.

- Martínez, F., González-Vidosa, F., Hospitaler, A., & Yepes, V. (2010). Heuristic Optimization of RC Bridge Piers with Rectangular Hollow Sections. *Computers and Structures*, 375-386.
- Martínez, F., Gozález-Vidosa, F., Hospitaler, A., & Yepes, V. (2013). A parametric study of piers for motorway bridge viaducts. *Structural Engineering*, 723-740.
- Martínez, F., Hospitaler, A., Alcalá, J., & González-Vidosa, F. (2011). Design of tall bridge piers by ant colony optimization. *Engineering Structures*, 2320-2329.
- Martínez-Martín, F., González-Vidosa, F., Hospitaler, A., & Yepes, V. (2012). Multi-Objective optimization design of bridge piers with hybrid heuristic algorithms. *Journal of Zhejiang University*, 420-432.
- Martins, A., Simoes, C., & Negro, J. (2015). Optimization of cable forces on concrete cable-stayed bridges including geometrical nonlinearities. *Computers & Structures*, 18-27.
- Marzouk, M., Said, H., & El-said, M. (2009). Framework for multiobjective optimization of launching girder bridges. *Journal of Construction Engineering and Management*, 791-800.
- MathWorks. (8 de Enero de 2020). *MATLAB*. Obtenido de <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- McCulloch, W., & Pitts, W. (1943). A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. *Mathematical Biophysics*, 115-133.
- Melián, B., Moreno, J., & Moreno, M. (2003). Metaheurísticas: Una visión global. *Revista Iberoamericana de inteligencia artificial*.

Microsoft. (11 de Enero de 2020). *Visual Basic*. Obtenido de <https://www.microsoft.com/es-co/download/details.aspx?id=10019>

Miyamoto, A., Kawamura, K., & Nakamura, H. (2000). Bridge management system and maintenance optimization for existing bridges. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 45-55.

Mladenovich, N., & Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Journal of Computation Physics*, 1097-1100.

Mohammad, S., Ahamad, T., & Makhlof, L. (2018). A Hybrid method based on Cuckoo search algorithm for global optimization problems. *Journal of Information and Communication Technology*, 469-491.

Morcous, G., Lounis, Z., & Mirza, M. (2003). Identification of environmental categories for Markovian deterioration models of bridge decks. *Journal of Bridge Engineering*, 353-361.

Moreno, J., & Mladenovic, N. (2014). Búsqueda por entornos variables para planificación logística. *Mathematics*, 1-17.

Moscato, P. (1989). On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts: Towards memetic algorithms. *Caltech Concurrent Computation Program*.

Mostafa, A., Mohamed, E., & Mostafa, S. (2019). Structural optimization of concrete arch bridges using Genetic. *Ain Shams Engineering Journal*, 507-516.

Müller-Mebach, H. (1981). Heuristics and their design: a survey. *European Journal of Operational Research*, 1-23.

Ohkubo, S., Dissanayake, P., & Taniwaki, K. (1998). "An approach to multicriteria fuzzy optimization of a prestressed concrete bridge system considering cost and aesthetic feeling. *Structural Optimization*, 132-140.

Penadés Plá, V. (Septiembre de 2017). Aplicación de la toma de decisión multicriterio al diseño sostenible de puentes de hormigón. *Tesis de maestría*. Valencia, Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.

Penadés Plá, V., García, T., & Yepes, V. (2019). Accelerated optimization method for low-embodied energy concrete boxgirder. *Engineering Structures*, 556-565.

Penadés-Plá, V., Gracia-Segura, T., Martí, J., & Yepes, V. (2018). An optimization-LCA of a prestressed Concrete. *sustainability*, 300-317.

Perea, C., Alcalá, J., González-Vidoso, F., Yepes, V., & Payá-Zaforteza, I. (2008). Optimization of reinforced concrete structures by simulated annealing. *I-Tech Education and Publishing*.

Perea, C., Alcalá, J., Yepes, V., González-Vidoso, F., & Hospitaler, A. (2008). Design of reinforced concrete bridge frames by heuristic optimization. *Advances in Engineering Software*, 676-688.

Periodico El Tiempo. (16 de 6 de 2019). ¿En qué van los procesos de los edificios "enfermos" en Medellín?

Querales, L. (2017). *Buscadores y bases de datos académicos*. Obtenido de Una experiencia 2.0: <https://www.unaexperiencia20.com/2017/01/buscadores-bases-datos-academicas.html>

Rabbat, B., & Russell, H. (1982). Optimized Sections for Precast Prestressed Bridge Girders. *Precast/Prestressed Concrete Institute*, 88-104.

Riojas, A. (2005). Conceptos, algoritmo y aplicación al problema de las N – reinas. *Trabajo de grado*. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Sancho-Caparrini, F. (s.f.). *Inteligencia artificial*. Obtenido de <http://www.cs.us.es/~fsancho/>

Scimago-Scopus. (s.f.). *Scimago Journal & Country Rank*. Obtenido de <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=Enter+Journal+Title%2C+ISSN+or+Publisher+Name>

Sirca, G., & Adeli, H. (2005). Cost Optimization of Prestressed Concrete Bridges. *Journal of Structural Engineering*, 380-388.

Templeman, A. (1979). Optimum design of concrete cellular spine beam bridge deck. *Institution of Civil Engineering*, 389-409.

The Fortran Company. (20 de Enero de 2020). Obtenido de <https://www.fortran.com/the-fortran-company-homepage/whats-new/g95-windows-download/>

Torres, G., Brotchie, J., & Cornell, C. (1966). A Program for the Optimum Design of Prestressed Concrete Highway Bridges. *Precast/Prestressed Concrete Institute*, 63-71.

Un algoritmo metaheurístico basado en recocido simulado con espacio de búsqueda granular para el problema de localización y ruteo con restricción de capacidad. (2012). *Ingenierías Universidad de Medellín*, 1-12.

Wikipedia. (13 de Enero de 2020). *Heurística*. Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Heurística>

Wikipedia. (13 de Enero de 2020). *Metaheurística*. Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Metaheurística>

Wolpert, D., & Macready, W. (1997). No free lunch theorems for. *IEEE Transactions on Evolutionary*, 67-82.

Yang, X.-S. (2010). Firefly Algorithms for Multimodal Optimization. *Proceedings of the 5th International Conference on Stochastic Algorithms: Foundations and Applications*, 1-11.

Yepes Piqueras, V. (29 de Junio de 2019). Toma de decisiones en la gestión del ciclo de vida de puentes e infraestructuras viarias de alta eficiencia social bajo presupuesto restrictivo. Valparaíso, Chile.

Yepes, V. (12 de Enero de 2020). *Más de 10 años investigando la optimización de estructuras de hormigón*. Obtenido de <https://victoryepes.blogs.upv.es/2018/02/20/mas-de-10-anos-investigando-la-optimizacion-de-estructuras-de-hormigon/>

Yepes, V., Martí, J., & García-Segura, T. (2015). Cost and CO2 emission optimization of precast-prestressed concrete U-beam road bridges by a hybrid glowworm swarm algorithm. *Automatización en Construcción*, 123-134.

Yepes, V., Martí, J., & García-Segura, T. (2017). Design optimization of precast-prestressed concrete road bridges with steel fiber-reinforcement by a hybrid

evolutionary algorithm. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 179-189.

Yuan, M., & Yan, D. (2011). Optimization on closure scheme of multi-span prestressed concrete box-girder bridge. *Advance Materials Research* , 2369-2375.

ANEXOS

ANEXO A. TABLA BIBLIOGRÁFICA REFERIDA

APLICACIÓN DE HEURÍSTICAS Y METAHEURÍSTICAS EN EL DISEÑO DE PUENTES EN CONCRETO
TABLA BIBLIOGRAFÍA REFERIDA

Id	Título	Autores	Año	Tipo de documento	Revista/Editorial	Tipo de puente	Elemento optimizado	Tipo de concreto	Ciclo de vida	Función objetivo	Norma	Método optimización	Software
1	Plane frame optimum design environment based on genetic algorithm	Jenkins, W.	1992	Artículo	<i>Journal of Structural Engineering</i>	Atirantado	Cable-viga de rigidez	Reforzado	Diseño	Costo	DMRB	Algoritmos genéticos	Fortran-C++
2	Multiobjective optimization of prestressed concrete structures	Lounis, Z., & Cohn, M.	1993	Artículo	<i>Journal of Structural Engineering</i>	Losa maciza	Losa maciza	Postensado	Diseño	Costo	AASTHO,ACI-89	Búsqueda por gradiente-Algoritmo Lagrangiano	Fortran
3	Computer-aided design of prestressed concrete cellular bridge decks	Lounis, Z., & Cohn, M.	1995	Artículo	<i>Microcomputers in Civil Engineering</i>	Losa aligerada	Losa aligerada	Pretensado	Diseño	Costo	AASTHO,ACI-89	Búsqueda por gradiente-Algoritmo Lagrangiano	Fortran
4	Maintenance strategy optimization of bridge decks using genetic algorithm	Liu, C., & Hammad, A.	1997	Artículo	<i>Journal of Transport,</i>	Losa maciza	Losa maciza	Reforzado	Mantenimiento	Costo	SHB	Algoritmos genéticos	Fortran
5	Multiobjective Optimization of Bridge Deck Rehabilitation Using Genetic Algorithm	Liu, C., & Hammad, A.	1997	Artículo	<i>Microcomputers in Civil Engineering</i>	Losa maciza	Losa maciza	Reforzado	Mantenimiento	Costo	SHB	Algoritmos genéticos	Matlab-Openses
6	Bridge management system and maintenance optimization for existing bridges	Miyamoto, A., Miyamoto, A., & Nakamura, H.	2000	Artículo	<i>Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering</i>	Todos	Viga-losa	Todos	Mantenimiento	Costo	SHB	Algoritmos genéticos	Visual Basic
7	Cost Optimization of Prestressed Concrete Bridges	Sirca, G., & Adeli, H.	2005	Artículo	<i>Cost Optimization of Prestressed Concrete Bridges</i>	Viga I	Viga	Pretensado	Diseño	Costo	AASTHO	Redes neuronales	Visual Basic
8	Optimum design of the box frame tunnel of the underground line Palma - UIB.	de Dios, C., Alcalá, J., Yepes, V., & González-Vidosa, F.	2006	Artículo	X International Conference on Project Engineering	Box culvert-tunel	Box culvert-tunel	Reforzado	Diseño	Costo	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Recocido simulado-Aceptacion por umbrales	Matlab-Abaqus
9	Optimizing bridge network maintenance management under uncertainty with conflicting criteria: Life-cycle maintenance, failure, and user costs	Liu, M., & Frangopol, D.	2006	Artículo	<i>Journal of Structural Engineering</i>	Losa maciza	Losa maciza	Reforzado	Mantenimiento	Costo	AASTHO	Algoritmos genéticos	Matlab-RELSYS
10	Bridge network maintenance optimization using stochastic dynamic programming	Frangopol, D., & Liu, M.	2007	Artículo	<i>Journal of Structural Engineering</i>	Todos	Viga-losa	Todos	Mantenimiento	Costo	AASTHO	Algoritmos genéticos-Simulaciones de Montecarlo	Fortran
11	GA-based algorithm for selecting optimal repair and rehabilitation methods for reinforced concrete (RC) bridge decks	Lee, C., & Kim, S	2007	Artículo	<i>Automation in Construction</i>	Losa maciza	Losa maciza	Reforzado	Mantenimiento	Costo	KRTA	Algoritmos genéticos	Matlab
12	Ant colony optimization of reinforced concrete bridge piers of rectangular hollow section	Martínez, F., Yepes, V., Hospitaler, A., & González-Vidosa	2007	Artículo	<i>Proceeding of the Ninth International Conference on the Application of Artificial</i>	Sección cajón	Pila-cimentación	Reforzado	Diseño	Costo	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Colonia de hormigas	Fortran
13	Optimization of Reinforced Concrete Structures by Simulated Annealing	González-Vidosa, F., Alcalá, J., Carrera, M., Payá-Zaforteza, I., & Yepes, V.	2008	Libro	<i>Simulated Annealing</i>	Viga I	Estribo	Reforzado	Diseño	Costo	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Recocido simulado	Matlab-ANSYS
14	Design of reinforced concrete bridge frames by heuristic optimization	Perea, C., Alcalá, J., Yepes, V., González-Vidosa, F., & Hospitaler, A.	2008	Artículo	<i>Design of reinforced concrete bridge frames by heuristic optimization</i>	Box culvert-tunel	Box culvert-tunel	Reforzado	Diseño	Costo	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Recocido simulado-Aceptacion por umbrales	Fortran
15	Optimización heurística económica de tableros de puentes losa prestensados	Alcalá, J.	2009	Tesis doctoral	Universidad Politécnica de Valencia	Losa aligerada	Losa aligerada	Postensado	Diseño	Costo	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Recocido simulado	Fortran
16	Effect of cumulative seismic damage and corrosion on the life-cycle cost of reinforced concrete bridges	Kumar, R., Gardoni, P., & Sanchez-Silva, M.	2009	Artículo	<i>Earthquake Engineering and Structural Dynamics</i>	Todos	Viga-losa	Todos	Mantenimiento	Costo	AASTHO	Algoritmo genéticos-Simulaciones de montecarlo	Matlab
17	Framework for multiobjective optimization of launching girder bridges	Marzouk, M., Said, H., & El-said, M.	2009	Artículo	<i>Journal of Construction Engineering and Management</i>	Sección cajón	Cajón	Postensado	Construcción	Costo	No registra	Colonia de hormigas	Fortran
18	Optimum topology and shape design of prestressed concrete bridge girders using a genetic algorithm	Aydin, Z., & Ayvaz, Y.	2010	Artículo	<i>Structural and Multidisciplinary Optimization</i>	Viga I	Viga	Postensado	Diseño	costo	AASTHO	Algoritmos genéticos	Fortran
19	Overall cost optimization of prestressed concrete bridge using genetic algorithm	Aydin, Z., & Ayvaz, Y.	2010	Artículo	<i>Korean Society of Civil Engineering</i>	Viga I	Viga	Pretensado	Diseño	Costo	AASTHO	Algoritmos genéticos	Fortran
20	Cable optimization of a long span cable stayed bridge in la Coruña (Spain)	Baldomir, A., Hernández, S., Nieto, F., & Jurado, A.	2010	Artículo	<i>Advances in Engineering Software</i>	Atirantado	Cable	Pretensado	Diseño	Costo	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Algoritmos genéticos	Fortran
21	Diseño óptimo de tableros isostáticos de vigas artesa prefabricadas prestensadas	Martí Albiñana, J. V.	2010	Tesis doctoral	<i>Universidad Politécnica de Valencia</i>	Sección cajón	Viga-losa	Pretensado	Diseño	Costo	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Recocido simulado-Aceptacion por umbrales	GAMS/MINOS
22	Design of prestressed concrete precast pedestrian bridges by heuristic optimization	Martí, J., & González-Vidosa, F.	2010	Artículo	<i>Advances in Engineering Software</i>	Sección cajón	Viga-losa	Pretensado	Diseño	Costo	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Recocido simulado-Aceptacion por umbrales	Matlab
23	Heuristic Optimization of RC Bridge Piers with Rectangular Hollow Sections	Martínez, F., González-Vidosa, F., Hospitaler, A., & Yepes, V.	2010	Artículo	<i>Computers and Structures</i>	Sección cajón	Pila	Reforzado	Diseño	Costo	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Colonia de hormigas-Algoritmos genéticos	Fortran
24	Multi-Multiobjective optimization design of bridge piers with hybrid heuristic algorithms	Martínez-Martín, F., González-Vidosa, F., González-Vidosa, F., & Yepes, V.	2010	Artículo	<i>Journal of Zhejiang University</i>	Sección cajón	Pila	Reforzado	Diseño	Costo-CO2	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Recocido simulado-Algoritmos genéticos	Fortran
25	Ambient vibration testing and updating of the finite element model of a simply supported beam bridge	Araujo, I., Maldonado, E., & Cho, G.	2011	Artículo	<i>Fontiers of Architecture and Civil Engineering in China</i>	Viga I	Viga	Postensado	Uso	Error-calibración	CCP-95	Algoritmos genéticos	Fortran
26	Genetic Algorithms-based Optimization of Cable Stayed Bridges	Lute, V.	2011	Artículo	<i>Software Engineering Applications</i>	Atirantado	Cable-losa	Reforzado	Diseño	Costo	ISSCPRB	Algoritmos genéticos	Fortran
27	Cost Optimum Design of Posttensioned I-Girder Bridge Using Global Optimization Algorithm	Ahsan, R., Rana, S., & Ghani, N.	2012	Artículo	<i>Journal of Structural Engineering</i>	Viga I	Viga	Postensado	Diseño	Costo	AASTHO	EVOP	Fortran
28	Life-cycle cost optimization of prestressed simple-span concrete bridges with simple and spliced girders	Madhkan, M., Kianpour, A., & Harchegani, M.	2013	Artículo	<i>Iranian Journal of Science and Technology</i>	Viga I	Viga-losa	Postensado	Diseño-mantenimiento	Costo	No registra	Reencadenamiento de trayectorias-Dirección factible	Fortran
29	Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing	Martí, J., Yepes, V., González-Vidosa, F., & Alcalá, J.	2013	Artículo	<i>Engineering Structures</i>	Sección cajón	Viga-losa	Pretensado	Diseño	costo	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Recocido simulado-Algoritmos genéticos	Fortran
30	A parametric study of piers for motorway bridge viaducts	Martínez, F., González-Vidosa, F., Hospitaler, A., & Yepes, V.	2013	Artículo	<i>Journal of Structural Engineering</i>	Sección cajón	Pila	Reforzado	Diseño	Costo	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Colonia de hormigas	Fortran
31	Optimization of concrete I-beams using a new hybrid glowworm swarm algorithm	Alcalá, J., Martí, J., Yepes, V., & García-Segura	2014	Artículo	<i>Latin American Journal of Solids and Structures</i>	Viga I	Viga	Postensado	Diseño-Construcción	Costo-CO2	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Recocido simulado-luciernagas	Fortran
32	Optimization of Life-Cycle Maintenance of Deteriorating Bridges with Respect to Expected Annual System Failure Rate and Expected Cumulative Cost	Barone, G., Frangopol, D., & Soliman, M.	2014	Artículo	<i>Journal of Structural Engineering</i>	Viga I	Viga-losa	Todos	Mantenimiento	Costo	AASTHO	Algoritmos genéticos	Fortran
33	Diseño automático de tableros óptimos de puentes de carretera de vigas artesa prefabricadas mediante algoritmos meméticos híbridos	Martí, J., Yepes, V., González-Vidosa, F., & Luz, A.	2014	Artículo	<i>Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño en Ingeniería</i>	Sección cajón	Viga-losa	Pretensado	Diseño	Costo	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Memético	Fortran
34	Diseño de estribos abiertos en puentes de carretera obtenidos mediante optimización híbrida de escalada estocástica	Luz, A., Yepes, V., & González-Vidosa, F.	2015	Artículo	<i>Informes de la construcción</i>	Viga I	Estribo-cimentación	Reforzado	Diseño	Costo	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Recocido simulado-Aceptacion por umbrales	Fortran
35	Memetic Algorithm Approach to Designing Precast-Prestressed Concrete Road Bridges with Steel Fiber Reinforcement	Martí, J., Yepes, V., & González-Vidosa, F.	2015	Artículo	<i>Journal of Structural Engineering</i>	Sección cajón	Viga-losa	Pretensado	Diseño	Costo	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Memético	Visual Basic
36	Cost and CO2 emission optimization of precast-prestressed concrete U-beam road bridges by a hybrid glowworm swarm algorithm	Yepes, V., Martí, J., & García-Segura, T.	2015	Artículo	<i>Automation in Construction</i>	Sección cajón	Cajón	Pretensado	Diseño	Costo-CO2	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Recocido simulado-luciernagas	Visual Basic
37	Structural design of precast-prestressed concrete U-beam road bridges based on embodied energy	Martí, J., García-segura, T., & Yepes, V.	2016	Artículo	<i>Journal of Cleaner Production</i>	Sección cajón	Viga-losa	Pretensado	Diseño	Costo-Energía incorpor	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Recocido simulado-Algoritmos genéticos	Matlab-SAP
38	Lifetime reliability-based optimization of post-tensioned box-girder	Frangopol, D., Yang, D., García-Segura, T., & Yepes, V.	2017	Artículo	<i>Engineering Structures</i>	Sección cajón	Cajón	Postensado	Diseño-mantenimiento	Costo-CO2	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Búsqueda armónica	Matlab
39	Layout and size optimization of suspension bridges based on coupled	Hongyou, C., Xudong, Q., Zhijun, C., & Hongping, Z.	2017	Artículo	<i>Journal of Structural Engineering</i>	Colgante	Cable-losa	Reforzado	Diseño	Costo	JTG D60,JTG/T D60-01	Busqueda enjambre PSO	Matlab
40	Design optimization of precast-prestressed concrete road bridges with steel fiber-reinforcement by a hybrid evolutionary algorithm	Yepes, V., Martí, J., & García-Segura, T.	2017	Artículo	<i>Evolutionary algorithm. International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements</i>	Sección cajón	Cajón	Pretensado	Diseño	Costo-CO2	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Algoritmos genéticos	Fortran
41	Embodied Energy Optimization of Prestressed Concrete Slab Bridge Decks	Alcalá, J., González-Vidosa, F., Yepes, V., & Martí, J.	2018	Artículo	<i>Hormigón y Acero</i>	Losa aligerada	Losa aligerada	Postensado	Diseño	Costo-Energía incorpor	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Recocido simulado	Fortran
42	An optimization-LCA of a prestressed Concrete	Penadés-Plá, V., Gracia-Segura, T., Martí, J., & Yepes, V.	2018	Artículo	<i>Sustainability</i>	Sección cajón	Cajón	Pretensado	Completo	costo	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Memético	Visual Basic
43	Structural optimization of concrete arch bridges using Genetic	Mostafa, A., Mohamed, E., & Mostafa, S.	2019	Artículo	<i>Ain Shams Engineering Journal</i>	Arco	Arco-losa	Reforzado	Diseño	Peso	No registra	Algoritmos genéticos	Fortran
44	Accelerated optimization method for low-embodied energy concrete boxgirder	Penadés Plá, V., García, T., & Yepes, V.	2019	Artículo	<i>Engineering Structures</i>	Sección cajón	Cajón	Postensado	Diseño	Energía	IAP,EHE,Eurocódigo 2	Recocido simulado-Kriging	Fortran