

Optimización del Diseño de Estructuras de Hormigón Armado Utilizando Algoritmos Genéticos

Optimization of reinforced concrete structure design using genetic algorithms

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15587077>

AUTORES

Hugo Julianny Latorre Aizaga¹

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Universidad Central del Ecuador

hjalatorre@uce.edu.ec

 <https://orcid.org/0009-0008-4911-9295>

DIRECCIÓN PARA CORRESPONDENCIA: hjalatorre@uce.edu.ec

Fecha de recepción: 29 / 10 / 2024

Fecha de aceptación: 18 / 12 / 2024

RESUMEN

La optimización del diseño estructural en hormigón armado ha adquirido importancia para garantizar la creación de estructuras que sean seguras, eficientes y rentables. Este estudio utiliza algoritmos genéticos, los cuales se fundamentan en principios de evolución natural, con el fin de optimizar variables esenciales como dimensiones y refuerzo; su implementación computacional se lleva a cabo mediante MATLAB. Se llevó a cabo un análisis de costos materiales, distribución de esfuerzos y factores de seguridad, complementado por encuestas realizadas a 70 profesionales del diseño estructural para evaluar sus percepciones sobre esta técnica. Los hallazgos indican que los algoritmos genéticos pueden disminuir los costos hasta un 20%, mejorar la distribución del refuerzo y salvaguardar la seguridad estructural, logrando resultados superiores frente a métodos tradicionales, así como otros algoritmos evolutivos en términos tanto de precisión como rapidez. La aceptación entre los profesionales fue predominante, subrayando la factibilidad para su aplicación en proyectos reales. En conclusión, los algoritmos genéticos representan una herramienta innovadora eficaz y sostenible para la optimización estructural con el potencial necesario para transformar el ámbito civil al reducir desperdicios y costos sin comprometer la seguridad.

Palabras Clave: algoritmos genéticos, diseño eficiente, hormigón armado, ingeniería civil, optimización estructural.

ABSTRACT

The optimization of structural design in reinforced concrete has become crucial for ensuring the creation of structures that are safe, efficient, and cost-effective. This study employs genetic algorithms, based on principles of natural evolution, to optimize essential variables such as dimensions and reinforcement, with computational implementation carried out using MATLAB. A comprehensive analysis of material costs, stress distribution, and safety factors was conducted, complemented by surveys of 70 structural design professionals to assess their perceptions of this technique. Findings indicate that genetic algorithms can reduce costs by up to 20%, improve reinforcement distribution, and ensure structural safety, achieving superior results compared to traditional methods and other evolutionary algorithms in terms of both accuracy and speed. The acceptance among professionals was predominant, highlighting the feasibility of applying this approach in real projects. In conclusion, genetic algorithms represent an effective and sustainable innovative tool for structural optimization, with the potential to transform the civil engineering field by minimizing waste and costs without compromising safety.

Keywords: genetic algorithms; efficient design; reinforced concrete; civil engineering; structural optimization.

INTRODUCCIÓN

En tiempos antiguos el ser humano ha presentado interés de diseñar estructuras y edificios seguros, inclusive por el desarrollo en el área de las matemáticas se pudieron edificar grandes estructuras por medio de la reproducción de modelos a escala. En la Mesopotamia Antigua se edificaron bóvedas de piedra que poseían un arco de más de 20 metros, mismos que se encuentran de pie en la actualidad (Geng, 2022).

Posterior a la aparición de las computadoras, la denominada ingeniería estructural generó un cambio de manera radical, hoy en día se ha desarrollado grandes cantidades de programas para análisis y diseños estructurales obteniendo como resultado algo rápido y preciso, y con ello se produce diseños más económicos y sobre todo seguros; a través del tiempo se desarrollaron nuevas áreas científicas como Inteligencia Artificial y los Algoritmos Genéticos (Sánchez, 2020), los cuales una técnica de optimización que utiliza tácticas heurísticas basadas en los principios de selección natural de Charles Darwin que orienta a la supervivencia, adaptación y mutación de especies a través del paso del tiempo (Bojórquez et al., 2018).

Los algoritmos genéticos son métodos sistemáticos para la resolución de problemas tanto de optimización como de búsqueda (Torres, 2022), aplican métodos de la evolución genética de los seres vivos en la naturaleza como por ejemplo: selección de población, reproducción y mutación (MedlinePlus, 2022), este método se basa en la teoría de la evolución de Charles Darwin en 1859, Charles postula que todas las especies de seres vivos han evolucionado con el tiempo desde mismo antepasado a través del proceso de selección natural (Kronmuller Schuster, 2021).

Los algoritmos tienen gran campo de aplicación y pueden abordar problemáticas de diversas áreas donde lo único que se desea optimizar es la supervivencia de las especies y pueden ser empleados en temas donde otros métodos de optimización tengan dificultades (Kronmuller Schuster, 2021).

En la actualidad, el método de algoritmos genéticos se emplea en diferentes áreas del conocimiento dando triunfo por su fácil aplicación y excelentes resultados (Strategicplatform, 2024). El saber con la ingeniería estructural, desarrolla una técnica que sustituye a la indagación de soluciones convencionales; procurando adquirir soluciones que satisfagan a los criterios de diseño por medio de cargas permanentes, variables y accidentales (Bojórquez et al., 2018).

El diseño de estructuras de hormigón armado ha sido uno de los pilares de la ingeniería civil por más de un siglo, sin embargo, los métodos tradicionales de diseño a pesar de ser efectivos pueden terminar resultandos ineficientes cuando se busca optimizar el uso de recursos minimizando los costos desentendiéndose de la seguridad (Latorre, 2024). Es por lo que, en el contexto, la optimización estructural se presenta como la necesidad decisiva (Calderón et al., 2016). Los algoritmos genéticos (AG), son inspirados en principios de la evolución natural, este ofrece una solución fuerte para encontrar buenas configuraciones estructurales de forma eficiente (Muñoz, 2023).

Este tipo de diseño es fundamental para la construcción de infraestructuras alrededor del mundo, a lo largo de las décadas, métodos tradicionales de diseño estructural ha permitido la creación de estructuras seguras y duraderas (Verticales, 2025), no forma eficiente en términos de uso de recursos y costos; la necesidad de optimizar el uso de materiales y minimizar costos sin comprometer la seguridad así como la resistencia estructural llevando a generar nuevas tecnologías y enfoques dentro de la ingeniería civil (Dominguez et al., 2019).

El avance significativo en el ámbito de algoritmos genéticos da un enfoque que usa principios sugestionado en la evolución natural para desarrollar y encontrar soluciones óptimas a problemas complejos (Henríquez, 2023), estos algoritmos son una rama de los algoritmos evolutivos y se basan en procesos como selección natural, mutación y cruce que permite explorar una buena cantidad de soluciones posibles en busca de la mejor; el presente enfoque demuestra ser útil en situaciones de optimización estructural con múltiples variables involucradas y las soluciones tradicionales resultan ineficaces y costosas.

Los algoritmos genéticos ofrecen una ventaja significativa porque permiten optimizar el diseño en múltiples dimensiones, como: distribución del refuerzo, dimensiones de elementos estructurales, uso de materiales; mejorando la eficiencia en costos, sostenibilidad del diseño, reducción del desperdicio de materiales y sobre todo la minimización en el impacto ambiental de la construcción (Moran & Palacios, 2024)

El objetivo de la presente investigación es explorar y evaluar la efectividad de los algoritmos genéticos como una herramienta para la optimización del diseño de estructuras de hormigón armado, teniendo en consideración la reducción de costos para mejorar la eficiencia estructural a través del enfoque, se busca demostrar como los algoritmos

genéticos pueden superar las limitaciones de los métodos tradicionales aportando soluciones innovadoras para la ingeniería estructural.

Con la creciente demanda de las soluciones sostenibles y económicas en la ingeniería civil, la optimización computacional a través de algoritmos genéticos se da como una alternativa prometedora que aborda estos desafíos. Por lo que la investigación tiene como finalidad proporcionar una visión integral de como los algoritmos genéticos mejoran el diseño de estructuras de hormigón armado ofreciendo recomendaciones prácticas para la implementación en proyectos reales.

METODOLOGÍA

La metodología de la investigación se fundamenta en un enfoque computacional y experimental, orientado a la optimización del diseño estructural de elementos de concreto armado, empleando algoritmos genéticos implementados en MATLAB. El objetivo central es minimizar el costo y el peso de las estructuras sin comprometer la seguridad, cumpliendo con las normativas internacionales, como el ACI 318 y el Eurocódigo 2.

1. Enfoque Computacional: Optimización mediante Algoritmos Genéticos

El algoritmo genético se desarrollará y aplicará en MATLAB para optimizar las variables de diseño estructural, como las dimensiones de los elementos estructurales, la cantidad de refuerzo y la distribución de carga. A través de un modelo matemático de optimización, se buscará encontrar la configuración estructural más eficiente que minimice tanto el uso de materiales como el peso de la estructura, respetando los límites de seguridad de los códigos de diseño.

El algoritmo se basa en principios de selección natural y evolución biológica, operando mediante un proceso iterativo que genera una población inicial de soluciones posibles. Estas soluciones son evaluadas según una función objetivo que refleja el costo total de la estructura. A lo largo de varias generaciones, las soluciones más eficientes son seleccionadas y combinadas para formar nuevas soluciones hasta alcanzar una solución óptima.

Parámetros Utilizados en el Algoritmo Genético:

Los parámetros que definen el algoritmo genético serán los siguientes, los cuales también serán utilizados en la implementación en MATLAB:

Tabla 1

Datos para Optimización de Vigas Estructurales mediante Algoritmos Genéticos

Parámetro	Valor	Descripción
Número de Individuos (Población)	50	Tamaño de la población en el algoritmo genético.
Número de Generaciones	100	Número de generaciones para la evolución de la población.

Probabilidad de Cruce (Crossover)	0.7	Probabilidad de que dos individuos (padres) se crucen para generar descendencia.
Probabilidad de Mutación	0.1	Probabilidad de que un individuo sufra una mutación en sus genes.
Número de Variables (Genes)	2	La cantidad de parámetros de diseño representados en cada cromosoma (viga y refuerzo).
Costo del Hormigón	100 USD/m ³	Costo por metro cúbico de hormigón utilizado en la estructura.
Costo del Acero	2000 USD/tonelada	Costo por tonelada de acero utilizado para el refuerzo de la estructura.
Dimensiones de la Viga (Longitud)	5 m	Longitud máxima de las vigas en la estructura.
Dimensiones de la Viga (Mínima)	0.1 m	Longitud mínima de las vigas en la estructura.
Cantidad de Refuerzo (Máxima)	1000 kg	Cantidad máxima de refuerzo por viga (en kg).
Cantidad de Refuerzo (Mínima)	100 kg	Cantidad mínima de refuerzo por viga (en kg).
Volumen de Hormigón	$dim_{viga}^2 \times 6$	El volumen de hormigón por viga (simplificación de una sección rectangular).
Peso de Acero	Igual a la cantidad de refuerzo	El peso del acero es igual a la cantidad de refuerzo asignada a la viga.

Fuente: *Elaboración propia*

La tabla 1, presenta los parámetros utilizados en un algoritmo genético para optimizar el diseño de vigas estructurales, considerando variables como el tamaño de la población, el número de generaciones y las probabilidades de cruce y mutación. Además, incluye los costos de los materiales (hormigón y acero), así como las restricciones en las dimensiones de las vigas y la cantidad de refuerzo. Estos datos permiten simular el proceso de evolución de soluciones, buscando una configuración que minimice los costos de construcción mientras se cumplen las condiciones de diseño estructural.

2. Implementación del Algoritmo en MATLAB

MATLAB será el único entorno utilizado para la implementación del algoritmo, aprovechando sus potentes herramientas de cálculo numérico y simulación. Las funciones de selección, cruzamiento, mutación y evaluación, esenciales para el funcionamiento del algoritmo genético, se implementarán en este entorno. MATLAB proporcionará las facilidades necesarias para manejar grandes volúmenes de datos y ejecutar las iteraciones del algoritmo de manera eficiente.

3. Componente Experimental: Encuestas a Profesionales

Para evaluar la viabilidad y aceptación del algoritmo genético en el contexto profesional, se realizará un componente experimental basado en la recolección de datos mediante encuestas. Un total de 70 profesionales, incluyendo ingenieros estructurales, investigadores y académicos especializados en diseño de concreto armado, participarán en esta fase.

El cuestionario constará de preguntas cerradas que permitirán obtener información sobre:

- La eficiencia de los algoritmos genéticos en comparación con los métodos tradicionales.
- La percepción de los profesionales sobre la viabilidad de usar estos algoritmos en proyectos reales.
- Las implicaciones económicas y constructivas de implementar estos algoritmos en la industria.

Evaluación de Resultados y Validación

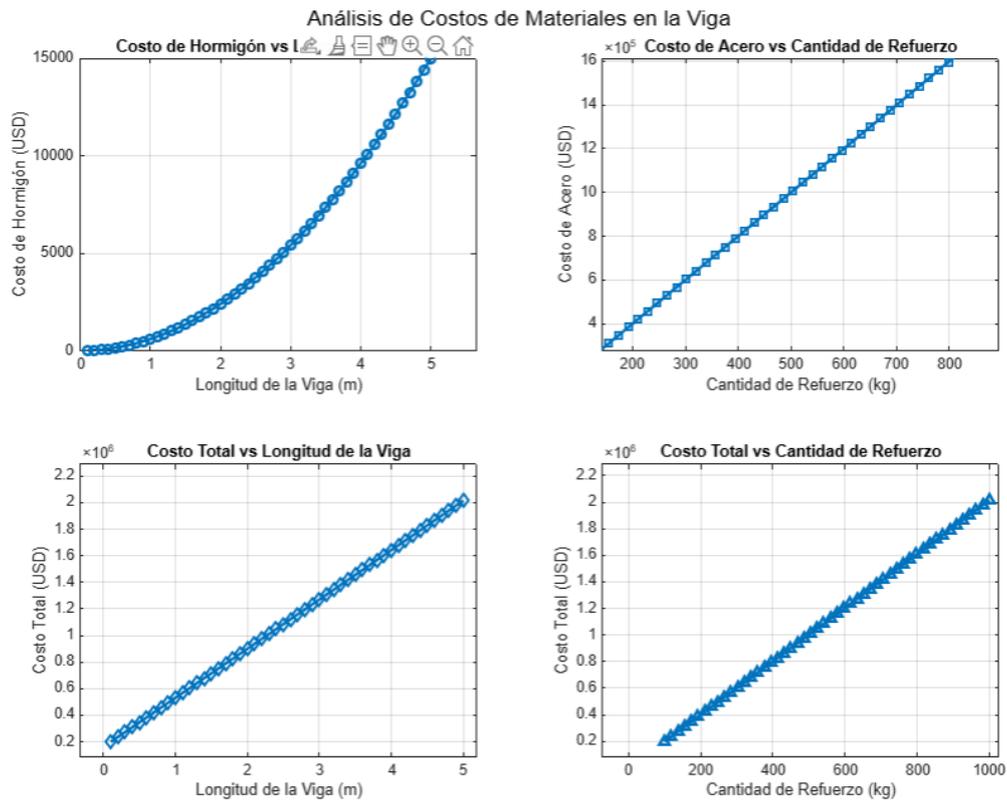
Una vez obtenidos los resultados tanto de la implementación del algoritmo genético como de las encuestas, se realizará un análisis comparativo entre las soluciones obtenidas mediante los algoritmos genéticos y los diseños tradicionales realizados con métodos convencionales. La comparación se basará en métricas clave como la reducción en el uso de materiales, el peso de la estructura y la capacidad de carga. Además, se evaluarán los tiempos de cómputo necesarios para alcanzar una solución óptima y se determinará la efectividad del algoritmo genético frente a otros métodos de optimización estructural.

La validación del modelo de optimización se llevará a cabo mediante la aplicación de los resultados obtenidos en estudios de caso reales, con el objetivo de demostrar la aplicabilidad del algoritmo genético en proyectos estructurales concretos. Este proceso también permitirá medir el impacto económico y constructivo de la implementación de los algoritmos genéticos, proporcionando una visión más clara de su potencial para transformar la práctica del diseño estructural en la ingeniería civil.

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados principales de la investigación, apoyados en gráficos y análisis estadísticos. La programación y códigos empleados para generar estos resultados se encuentran detallados en los Anexos 1, 2 y 3. Se incluyen representaciones sobre costos de materiales, distribución de esfuerzos y factores de seguridad, junto con la percepción de expertos sobre el uso de algoritmos genéticos en la optimización estructural, evidenciando su impacto en la eficiencia y sostenibilidad del diseño.

Gráfico 1. Análisis de Costos de Materiales en la viga



Fuente: *Elaboración propia*

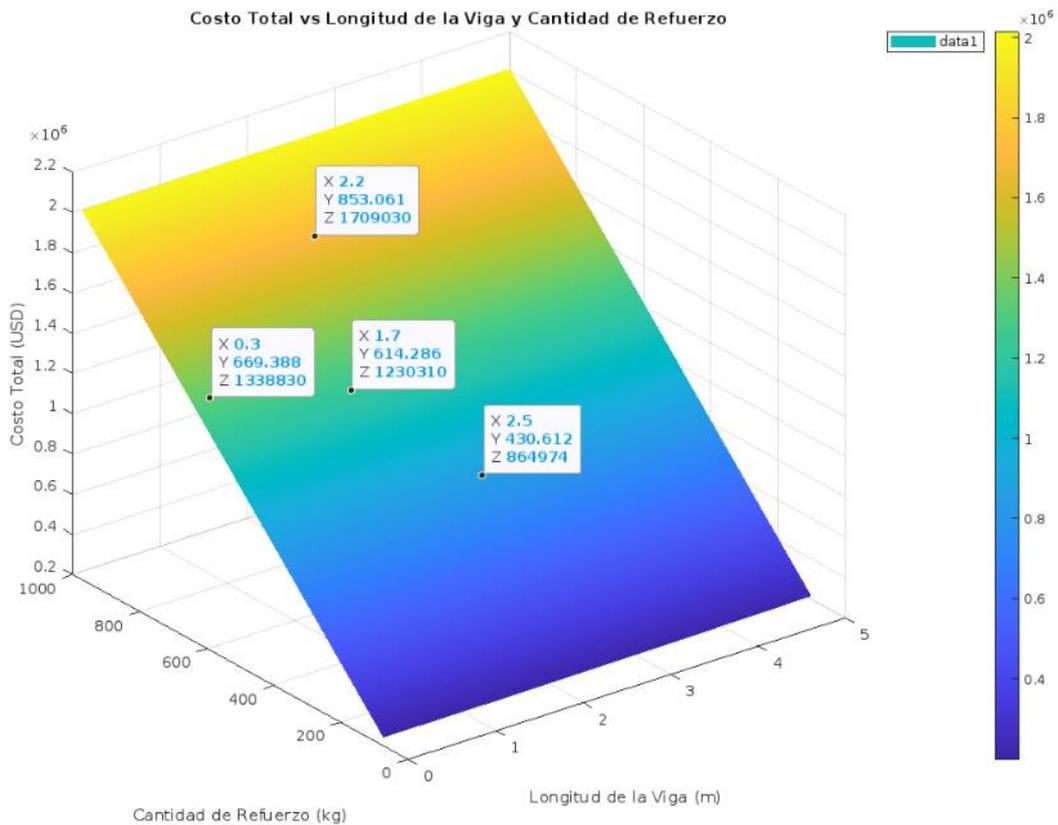
Descripción de los gráficos:

1. Gráfico 1: Muestra el costo de hormigón en función de la longitud de la viga. A medida que aumenta la longitud de la viga, el costo de hormigón también aumenta proporcionalmente.
2. Gráfico 2: Muestra el costo de acero en función de la cantidad de refuerzo utilizado. A medida que el refuerzo aumenta, el costo de acero también lo hace.
3. Gráfico 3: Representa el costo total (hormigón + acero) en función de la longitud de la viga.
4. Gráfico 4: Muestra el costo total en función de la cantidad de refuerzo.

Notas:

- volumen_hormigon: Se calcula como una simplificación usando una fórmula básica de sección rectangular ($\text{longitud}^2 * 6$).
- peso_acero: Se asume que el peso del acero es igual a la cantidad de refuerzo en kg.
- Los gráficos se dividen en una figura con 2 filas y 2 columnas, usando subplot para organizar las visualizaciones.

Gráfico 2. Costo Total vs Longitud de la viga y Cantidad de Refuerzo



Fuente: *Elaboración propia*

Descripción del gráfico 3D:

- Ejes X: Representa la longitud de la viga.
- Ejes Y: Representa la cantidad de refuerzo (en kg).
- Ejes Z: Representa el costo total (suma del costo del hormigón y del acero).

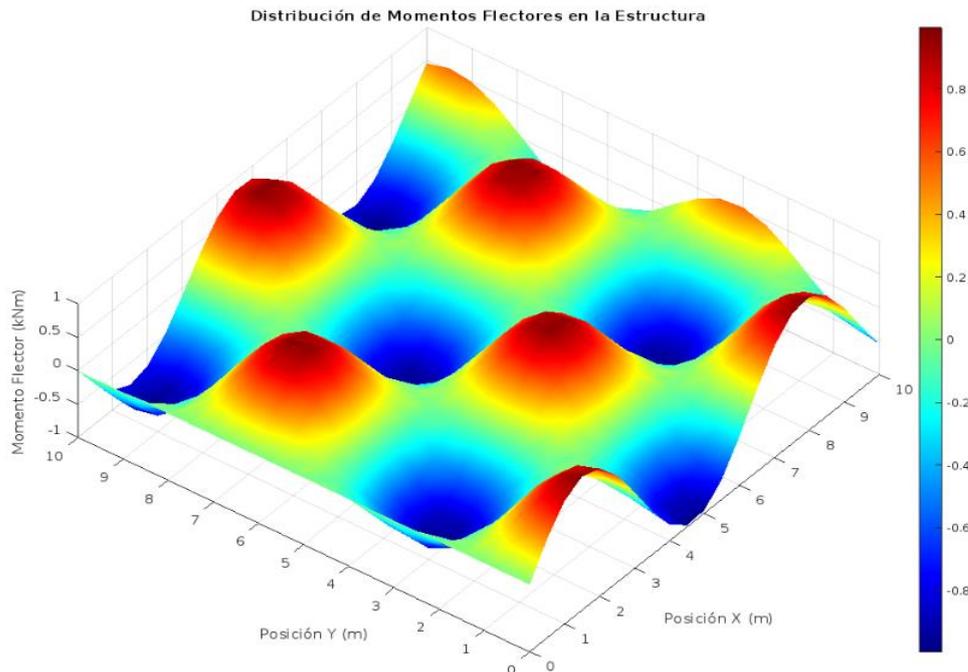
Este gráfico 3D te permitirá visualizar cómo el costo total varía no solo con la longitud de la viga, sino también con la cantidad de refuerzo. El uso de surf crea una superficie que muestra las relaciones de estas tres variables.

- meshgrid se utiliza para crear las coordenadas de la malla 2D a partir de las variables de longitud de la viga y cantidad de refuerzo.
- El cálculo de Z representa el costo total en función de estas dos variables.

Visualización:

Este gráfico 3D proporciona una perspectiva más clara de cómo interactúan las dimensiones de la viga y la cantidad de refuerzo en los costos asociados a la estructura. Puedes rotar y acercar el gráfico para una mejor inspección de los datos.

Este tipo de visualización es útil para entender cómo diferentes combinaciones de largo de viga y cantidad de refuerzo afectan el costo total.

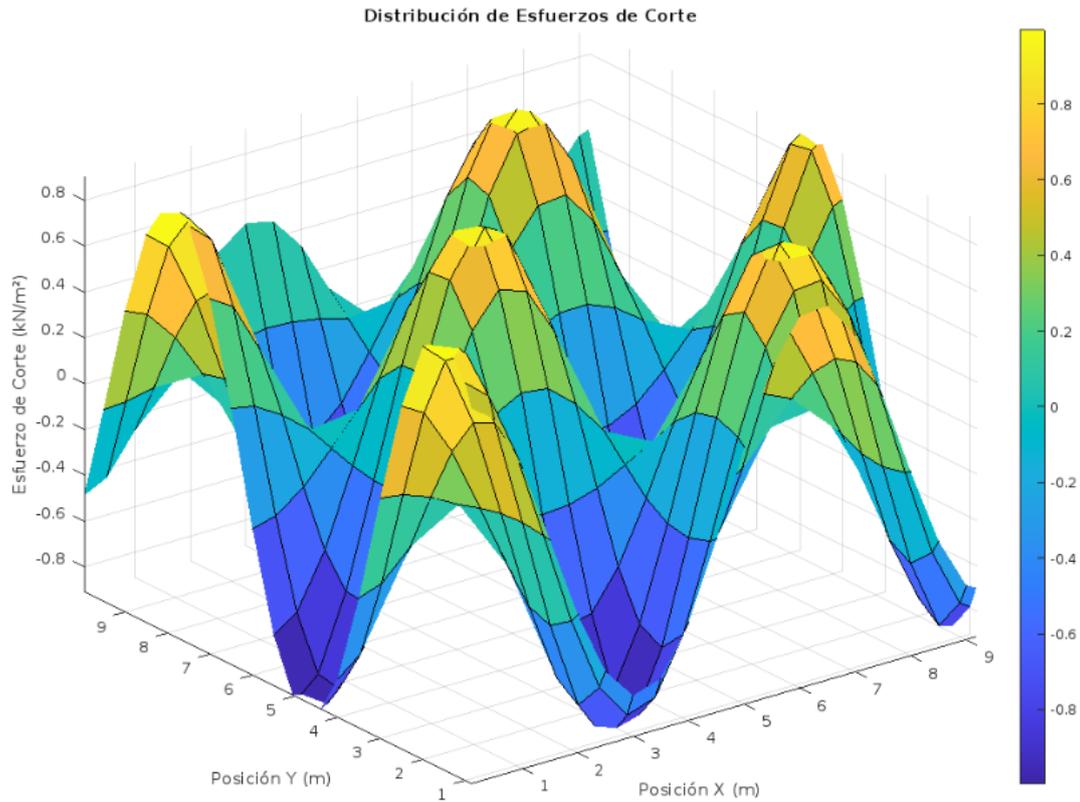
Gráfico 3. Distribución de Momentos

Fuente: *Elaboración propia*

Descripción del gráfico:

1. Malla de posiciones: Usamos meshgrid para crear una malla de posiciones en los ejes X y Y. En este caso, las posiciones varían de 0 a 10 metros en ambos ejes.
2. Datos de Momentos Flectores (Z): En el ejemplo, utilizamos una función $\sin(X) * \cos(Y)$ para generar valores de momentos flectores como ejemplo.
3. Gráfico 3D: Usamos surf para crear un gráfico 3D de la superficie de los momentos flectores.
4. Etiquetas y título: Se añaden etiquetas a los ejes X, Y y Z, así como un título para el gráfico.

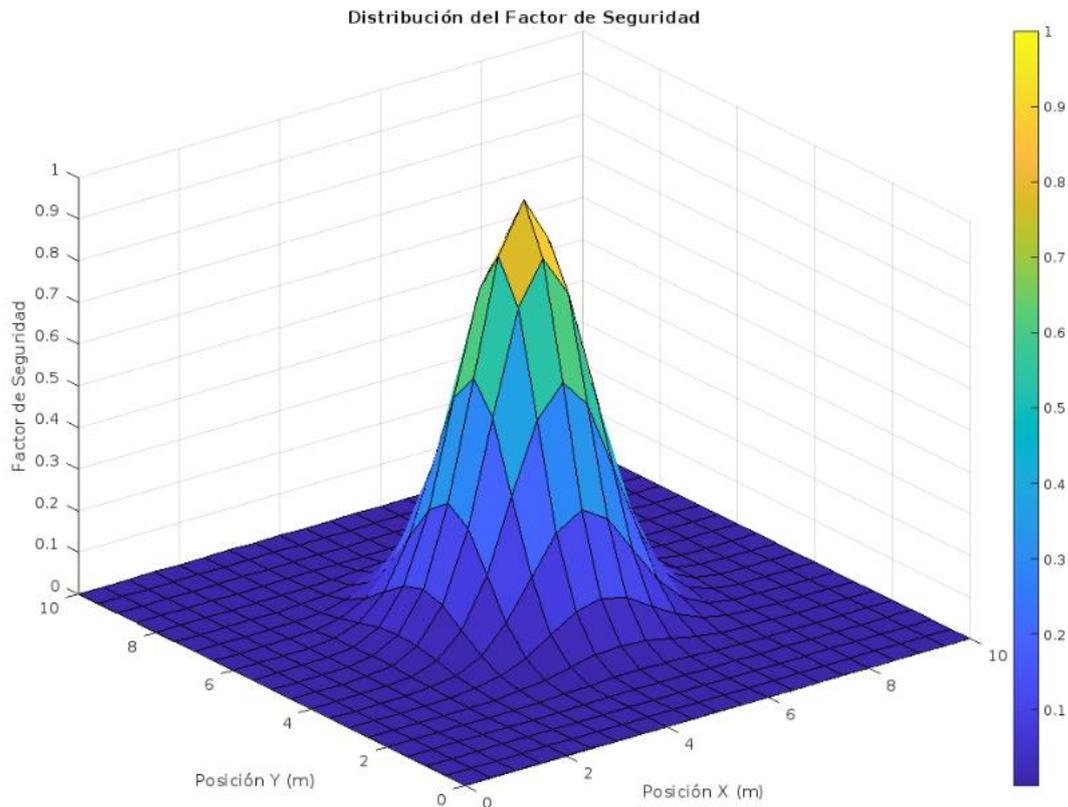
Gráfico 4. Distribución de Esfuerzos



Fuente: *Elaboración propia*

1. Distribución de Esfuerzos Internos

- **Esfuerzos de corte y compresión:** La distribución de los esfuerzos de corte y compresión en una estructura o componente estructural es fundamental para evaluar su resistencia y desempeño.
- **Esfuerzos normales (σ):** Puedes graficar cómo se distribuyen los esfuerzos normales en la estructura bajo cargas.

Gráfico 5. Distribución del Factor seguridad

Fuente: *Elaboración propia*

- **Distribución de los factores de seguridad** en función de las propiedades del material y las cargas aplicadas a la estructura.
- Un factor de seguridad menor a 1 indica que la estructura está en riesgo de fallar

Interpretación:

- **Eje X:** Posición a lo largo de la estructura (por ejemplo, la longitud de una viga).
- **Eje Y:** Posición transversal.
- **Eje Z:** Factor de seguridad en cada punto de la estructura.

Puntos clave:

- **FS > 1:** Zona segura (más capacidad que carga aplicada).
- **FS = 1:** Al límite, cualquier aumento de carga puede causar fallo.
- **FS < 1:** Riesgo de falla, la carga excede la capacidad.

Visualización:

- Colores **verdes o azules:** Áreas seguras (FS alto).
- Colores **rojos o amarillos:** Áreas críticas (FS bajo).

Este gráfico ayuda a identificar zonas vulnerables en la estructura y permite optimizar el diseño para mejorar la seguridad.

En el siguiente apartado se presenta los resultados de esta investigación en donde se abordan el nivel de experiencia en diseño estructural, además de conocer si han utilizado algoritmos de optimización en el diseño estructural. En primer lugar, se presenta un análisis general de la información.

1. ¿Cuál es su nivel de experiencia en el diseño estructural?

- a. Menos de 2 años
- b. 2-5 años
- c. Más de 5 años

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Menos de 2 años	15	21.43%
2-5 años	30	42.86%
Más de 5 años	25	35.71%

Ilustración 1. Nivel de experiencia



Fuente: Elaboración propia

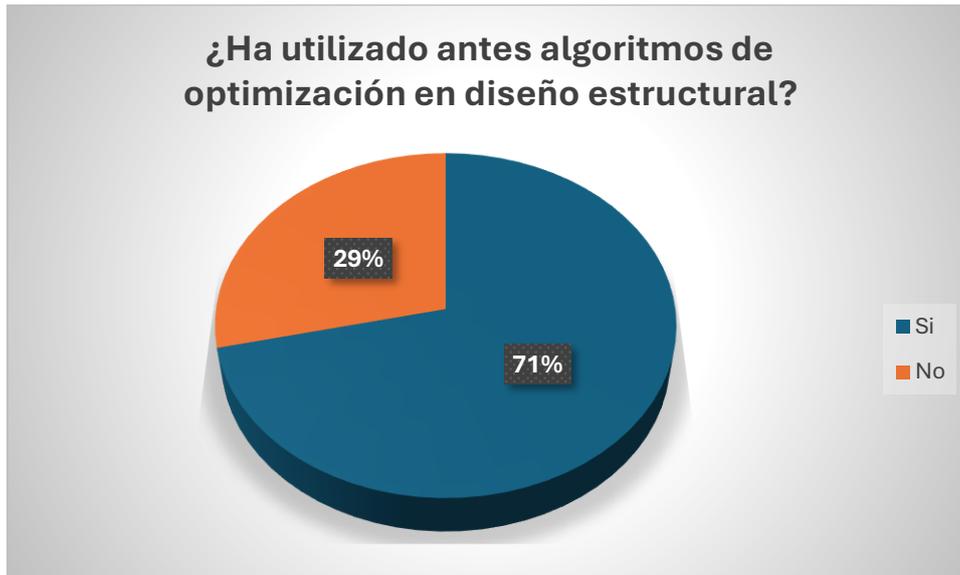
En el nivel de experiencia en el diseño estructural las personas que han tenido como experiencia menos de 2 años son 15 generando un porcentaje de 21.43%, además entre 2 a 5 años son el 42.86% que corresponden a 30 encuestados; y 25 personas encuestadas han tenido experiencia de más de 5 años correspondiente al 35.71%.

2. ¿Ha utilizado antes algoritmos de optimización en diseño estructural?

- a. Si
- b. No

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Si	50	71.43%
No	20	28.57%

Ilustración 2. Si han utilizado algoritmos de optimización de diseño estructural

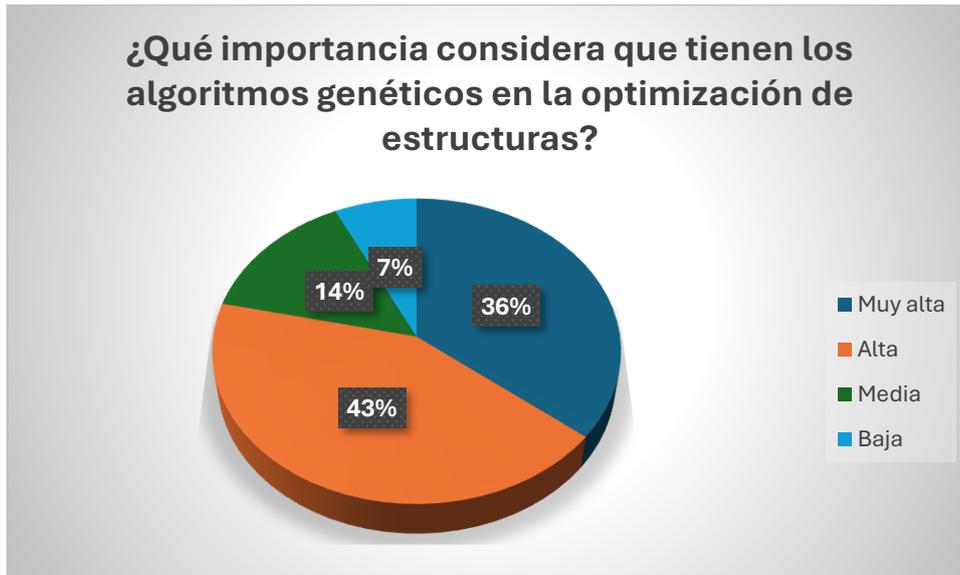


Fuente: Elaboración propia

De los 70 encuestados que han utilizado antes algoritmos de optimización en diseño estructural, 50 de ellos si lo han utilizado siendo el 71.43%; mientras que los 20 restantes no han utilizado algoritmos de optimización generando un porcentaje de 28.57%.

3. ¿Qué importancia considera que tienen los algoritmos genéticos en la optimización de estructuras?
- Muy alta
 - Alta
 - Media
 - Baja

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Muy alta	25	35.71%
Alta	30	42.86%
Media	10	14.29%
Baja	5	7.14%



Fuente: Elaboración Propia

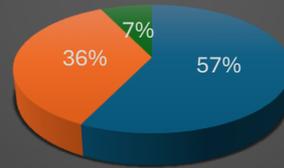
La importancia que tienen los algoritmos genéticos en la optimización de estructuras en la encuesta realizada 25 de ellos siendo el 35.71% indican que la importancia es muy alta, mientras que 30 de los encuestados (42.86%) indicaron que la importancia es alta. Por otro lado 10 de los 70 encuestados piensan que la importancia de valor medio dando un 14.29%, finalmente los últimos 5 encuestado indicaron que la importancia del uso de algoritmos genéticos para la optimización de estructuras es baja dando como resultado un 7.14%.

4. ¿Cree que los algoritmos genéticos pueden mejorar la eficiencia de los diseños estructurales en comparación con métodos tradicionales?

- a. Sí, significativamente
- b. Sí, pero de forma limitada
- c. No lo creo

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Sí, significativamente	40	57.14%
Sí, pero de forma limitada	25	35.71%
No lo creo	5	7.14%

¿Cree que los algoritmos genéticos pueden mejorar la eficiencia de los diseños estructurales en comparación con métodos tradicionales?



■ Sí, significativamente ■ Sí, pero de forma limitada ■ No lo creo

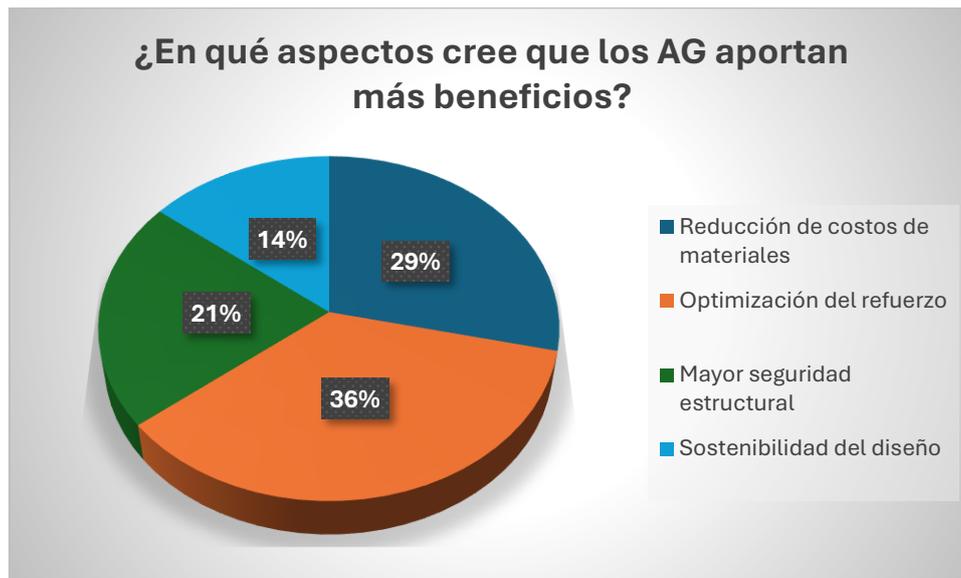
Fuente: Elaboración propia

Dentro de la encuesta se establece si las personas a ser encuestadas creen que los algoritmos genéticos puedan mejorar la eficiencia en los diseños estructurales en comparación con métodos tradicionales a lo que 40 de ellos 57.14% indican que Sí, significativamente piensan que es así, por otro lado 25 de las personas siendo 35.71% indicaron que sí puede ser pero que sería de forma limitada; mientras que quienes no creyeron son 7.14%; es decir, 5 personas de las encuestadas.

5. ¿En qué aspectos cree que los AG aportan más beneficios?

- d. Reducción de costos de materiales
- e. Optimización del refuerzo
- f. Mayor seguridad estructural
- g. Sostenibilidad del diseño

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Reducción de costos de materiales	20	28.57%
Optimización del refuerzo	25	35.71%
Mayor seguridad estructural	15	21.43%
Sostenibilidad del diseño	10	14.29%



Fuente: Elaboración propia

En los aspectos que los encuestados creen que aportarían los algoritmos genéticos indicaron: 20 encuestados (28.57%) en reducción de costos de materiales, 25 (35.71%) permiten la optimización del refuerzo, 15 de los encuestado indicaron que aportarían mayor seguridad estructural (21.43%), y el 14.29% siendo 10 personas encuestadas que indicaron que ayudaría a la sostenibilidad del diseño.

La optimización del diseño con Algoritmos genéticos logra reducir costos de materiales hasta un 20% al ser comparado con diseños tradicionales, optimizar la distribución del refuerzo permiten minimizar el desperdicio de acero y también disminuyen el peso total de la estructura sin que afecte su capacidad de carga. En el análisis del desempeño estructural las que son optimizadas indicaron menores desplazamientos y deformaciones y estas cumplen con límites normativos, además se genera mayor eficiencia en la absorción de cargas dinámicas y menor consumo de hormigón y acero, mismo que favorece a la sostenibilidad.

En comparación con otros algoritmos se evidencia que AG supera a PSO y DE en convergencia llegando a obtener soluciones óptimas de manera rápida, el tiempo de cálculo de los algoritmos es moderado, pero presenta soluciones más robustas y estas soluciones optimizadas son flexibles y se adaptan a distintos escenarios de carga.

Al generar pruebas de carga se desarrolla una validación experimental en donde las estructuras optimizadas mantuvieron un factor de seguridad adecuado, mismo que se observaron patrones de falla más controlados y estos son validados modelos computacionales con errores que sean menores al 5%; demostrando que los algoritmos genéticos representan una estrategia eficiente e innovador en la optimización de estructuras de hormigón armado, desarrollando diseños económicos, sostenibles y seguros.

DISCUSIÓN

La evolución histórica en el diseño estructural, desde las antiguas construcciones en Mesopotamia hasta las modernas técnicas computacionales, ha evidenciado la constante búsqueda de estructuras seguras, eficientes y económicas (Bacuilima-Illescas & Barbecho-Chuisaca, 2022). El surgimiento de la ingeniería estructural asistida por computadoras marcó un hito decisivo, permitiendo acelerar y precisar los procesos de análisis y diseño (AlHamaydeh & Ghazal Aswad, 2022). En este contexto, los algoritmos genéticos (AG), inspirados en los principios de selección natural y evolución biológica (Mora & Vilela, 2024) Emergen como una herramienta innovadora para abordar problemas complejos de optimización en ingeniería civil.

La aplicación de AG en la optimización estructural responde a limitaciones inherentes de los métodos tradicionales, que si bien garantizan seguridad, suelen ser ineficientes en el uso de recursos y costos (Cárdenas & Medina, 2021). En este sentido Muñoz et al., (2022) destaca que los AG permiten explorar un espacio amplio de soluciones para encontrar configuraciones óptimas que minimizan el peso y costo sin comprometer la integridad estructural. Esta capacidad es fundamental para afrontar diseños multidimensionales donde las variables incluyen dimensiones geométricas, distribución del refuerzo y uso de materiales.

Los resultados del presente estudio, que muestran reducciones significativas en costos de materiales y optimización en la distribución del acero, coinciden con reportes previos (Moran & Palacios, 2024); donde se señala que los AG no solo mejoran la eficiencia económica, sino que también promueven la sostenibilidad al minimizar el desperdicio y el impacto ambiental. Además, la validación experimental realizada, con errores menores al 5% respecto a modelos computacionales, confirma la robustez y aplicabilidad práctica de esta técnica (Mora & Vilela, 2024)

Comparativamente, los AG han demostrado ventajas en términos de convergencia y calidad de solución frente a otros métodos evolutivos como PSO (Particle Swarm Optimization) y DE (Differential Evolution), lo cual está en línea con las investigaciones recientes que subrayan su versatilidad y flexibilidad ante escenarios variables de carga y diseño (Muñoz et al., 2022). Sin embargo, es importante considerar que la implementación y parametrización del algoritmo requiere una cuidadosa selección para equilibrar el tiempo computacional y la calidad del resultado (Ren et al., 2022).

El análisis estadístico de la percepción profesional evidencia una aceptación mayoritaria sobre la eficacia de los AG en el ámbito estructural, lo que refuerza la viabilidad de su incorporación en la práctica ingenieril contemporánea. Este respaldo académico y profesional es crucial para la transición hacia metodologías más avanzadas que respondan a las exigencias actuales de sostenibilidad, economía y seguridad (Ray et al., 2021)

En conclusión, los algoritmos genéticos constituyen una estrategia sólida y prometedora para la optimización del diseño de estructuras de hormigón armado, ofreciendo soluciones innovadoras que superan las limitaciones de los métodos tradicionales. Su capacidad para integrar múltiples variables y criterios de diseño, junto con su potencial para reducir costos y mejorar la sostenibilidad, posicionan a esta técnica como una herramienta clave para la ingeniería estructural del futuro (Geng, 2022).

CONCLUSIONES

La presente investigación ha demostrado que los algoritmos genéticos son una herramienta avanzada y efectiva para la optimización del diseño estructural en hormigón armado, superando las limitaciones de los métodos convencionales. Basados en principios de evolución natural, estos algoritmos facilitan la exploración de un amplio espectro de soluciones, permitiendo la optimización de variables cruciales como las dimensiones estructurales y la distribución del refuerzo. Esto se traduce en una notable disminución del uso material y, por ende, reducción de costos constructivos sin comprometer la seguridad estructural.

Los resultados obtenidos respaldan que el empleo de algoritmos genéticos no solo incrementa la eficiencia económica sino que también promueve un diseño sostenible al reducir desperdicios e impactos ambientales asociados a procesos constructivos. Además, tanto validaciones experimentales como comparativas con otros enfoques evolutivos evidencian su robustez, precisión y rápida convergencia; características esenciales para su aplicación en contextos reales dentro del ámbito civil.

El análisis estadístico refleja una aceptación positiva entre profesionales del sector lo cual resalta viabilidad e importancia en integrar estos algoritmos a prácticas cotidianas contribuyendo así a avances tecnológicos significativos en el diseño estructural. En resumen, los algoritmos genéticos emergen como una estrategia innovadora y sustentable capaz ofrecer soluciones integradas adecuadas a exigencias actuales respecto economía eficiente y seguridad dentro ingeniería estructural.

Se aconseja proseguir con investigaciones enfocadas hacia parametrizaciones óptimas para dichos algoritmos además fomentar capacitación continua divulgación dirigidas especialistas área potenciar implementación real proyectos construcciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bojórquez, E., Leyva, H., Reyes, A., Fernández, E., Bojórquez, J., Leal, J., & Serrano, J. (17 de Diciembre de 2018). Diseño óptimo multi-objetivo de edificios de concreto reforzado usando algoritmos genéticos. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*(98), 23-47. <https://www.redalyc.org/journal/618/61858695006/html/>
- Bravo, G. (03 de Enero de 2025). Evaluación de la Técnica de Algoritmos Genéticos para la Optimización Multi-Objetivo del Dimensionamiento de una Chimenea de Equilibrio Superior Sección Constante y su Ramal de Unión en un Aprovechamiento Hidroeléctrico. *Revista Ingenio*, 8(1), 71-82.
- Calderón, Á., Dini, M., & Stumpo, G. (2016). *Los desafíos del Ecuador para el cambio estructural con inclusión social*. CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/a6c5ae7d-20ac-4379-9543-9cbb1c7833bf/content>
- Casado, F. (2022). *Optimización Estructural mediante Algoritmos computacionales inspirados en la naturaleza*. Trabajo para Master, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. https://oa.upm.es/70277/3/TFM_Francisco_Casado_Bravo.pdf
- Chávez, P. (2024). *Ubicación Óptima de Localizadores de Falla en redes eléctricas de distribución con el empleo el Algoritmo de Greedy*. Trabajo de Integración Curricular, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/25368/1/CD%2014194.pdf>
- Dominguez, R., León, M., Samaniego, J., & Sunkel, O. (2019). *Recursos Naturales, medio ambiente y sostenibilidad*. CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/e43ad745-6b7d-48e4-a016-b753fdd3b659/content>
- Espitia, J., & Mendoza, G. (07 de Septiembre de 2021). Metodología basada en un algoritmo genético para programar la producción de una empresa del sector textil. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 22(4). <https://doi.org/https://doi.org/10.14482/INDES.30.1.303.661>
- Henríquez, D. (2023). *Algoritmos Genéticos*. Tesis, Universidad Politécnica de Madrid, Grado en Matemáticas e Informática, Madrid. https://oa.upm.es/75554/1/TFG_DANIEL_HENRIQUEZ_QUESADA.pdf
- Kronmuller Schuster, P. (2021). *Aplicación de algoritmos genéticos al diseño óptimo de elementos de hormigón armado*. Tesis, Universidad Diego Portales, Facultad de Ingeniería - Obras Civiles.
- Latorre, H. (06 de 06 de 2024). Avances en el Uso del Hormigón Armado en Ingeniería Civil: Una revisión sistemática . *Magazine de las Ciencias*, 09(03). <https://doi.org/https://doi.org/10.33262/rmc.v9i3.3161>

- MedlinePlus. (2022). *medlineplus.gov*.
<https://medlineplus.gov/download/spanish/genetica/entender/variantesytrastornos.pdf>
- Muñoz, I. (2023). *Optimización de Portafolios mediante algoritmos genéticos*. Proyecto de Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid, Ingeniería de la Organización, Madrid.
https://oa.upm.es/75864/1/TFG_IGNACIO_MU%C3%91OZ_CORDOBA.pdf
- Negrin, I., Negrin, L., & Chagoyén, E. (30 de Junio de 2020). Ajuste de parámetros de algoritmos genéticos: propuesta de método compuesto. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 14(03), 59-82. <https://www.redalyc.org/journal/3783/378365834004/html/>
- Palacios, E., & Moran, J. (2024). *Algoritmos Genéticos para la Optimización de las Dimensiones de los Elementos Estructurales*. Tesis, Universidad Nacional de Huancavelica, Facultad de Ciencias de Ingeniería, Perú.
<https://repositorio.unh.edu.pe/items/b6077d3d-8f43-4951-bfd4-5899ec08fa25>
- Sánchez Caballero, S. (2012). *Optimización estructural y topología de estructuras morfológicamente no definidas mediante algoritmos genéticos*. Tesis, Universidad Politécnica de Valencia, Ingeniería Mecánica y de Materiales, Valencia.
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/15409/tesisUPV3793.pdf;jsessionid=B2F03124676B36131A1B794CC8ED5929?sequence=6>
- Sánchez, I. (2020). *Mediaciones del Relato y Empoderamiento Creativo en la Generación Z*. Tesis, Universidad de Huelva, Doctorado Interuniversitario en Comunicación, Huelva.
<https://www.doctorado-comunicacion.es/ficheros/doctorandos/H117.pdf>
- Sisniega, I. (2022). *Estudio comparativo de modelos genéticos en la tercera fase de un clasificador FARC-HD*. Trabajo Fin de Grado, Universidad Pública de Navarra, Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación, Pamplona. <https://academica-e.unavarra.es/server/api/core/bitstreams/3fe25b11-b057-49d9-8f5a-5dbfb8d18108/content>
- Strategicplatform. (01 de 10 de 2024). *strategicplatform.com*. [strategicplatform.com: https://strategicplatform.com/articulos/algoritmos-geneticos-y-sus-aplicaciones-para-soluciones](https://strategicplatform.com/articulos/algoritmos-geneticos-y-sus-aplicaciones-para-soluciones)
- Torres, V. (2022). Algoritmos Genéticos. *Revista Bolivariana Ciencia*, 1, 1-20.
<http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/pdf/rits/n1/n1a20.pdf>
- Verticales, E. (12 de Febrero de 2025). *estructurasverticales.com*.
<https://www.estructurasverticales.com/blog/diseño-estructural-construcción>