

**Optimización del Diseño de Estructuras Metálicas mediante Inteligencia Artificial y
Algoritmos**

Autor

Yuseth Jhayck Navarro Calderon

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Tutora

Dayana Carolina Antolinez

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Programa de Ingeniería Civil

2025

Tabla de contenido

Resumen.....	8
Abstract	10
Introducción	11
Capitulo 1. Generalidades	13
1.1. Fundamentos del diseño de estructuras metálicas	13
1.1.1 Principios básicos del diseño de estructuras metálicas	13
1.1.2 Proceso de diseño y herramientas	15
1.1.3. Normatividad aplicable al diseño de estructuras metálicas	18
1.1.4. Importancia de la calidad y la experiencia laboral.....	20
1.2. Principios básicos de optimización estructural	21
1.2.1 Objetivos de la optimización estructural.....	22
1.2.2. Variables y restricciones en la optimización estructural	23
1.2.3. Métodos y técnicas de optimización	24
1.2.4. Aplicaciones y beneficios	27
1.3. Introducción a la inteligencia artificial y los algoritmos aplicados	28
1.3.1 Aplicaciones de la inteligencia artificial en el diseño estructural	28
1.3.2 Algoritmos mas utilizados en la optimización estructural	30
1.3.3 Beneficios y futuro de la inteligencia artificial en la ingeniería estructural	32

1.4. Revisión de estudios previos y aplicaciones en el área.....	33
Capítulo 2. Metodología	35
2.1. Descripción de los algoritmos y técnicas de IA utilizadas.....	35
2.1.1 Algoritmos Genéticos (AG)	36
2.1.2. Redes neuronales artificiales.....	37
2.1.3. Aprendizaje por refuerzo (AR)	38
2.1.4. Integración de las técnicas	39
2.2. Criterios de optimización (peso resistencia, costo, etc.).....	42
2.2.1. Minimización del peso estructural	42
2.2.2. Seguridad estructural y cumplimiento normativo.....	43
2.2.3. Minimización de costos	45
2.2.4. Desempeño ante condiciones extremas	45
2.2.5. Sostenibilidad y reducción de la huella ambiental.....	46
2.2.6. Formulación matemática de la función objetivo y restricciones	47
2.2.7. Resumen de criterios de optimización estructural considerados	47
2.3. Procedimiento para la aplicación y evaluación.....	48
2.3.1. Definición del problema estructural.....	48
2.3.2. Modelo computacional.....	49
2.3.3. Implementación y entrenamiento de algoritmos de IA.....	50
2.3.4. Ejecución del proceso de optimización.....	50

2.3.5.	Evaluación y selección de soluciones optimas	51
2.3.6.	Validación y ajustes finales	52
2.3.7.	Incorporación de herramientas avanzadas y automatización	52
Capítulo 3. Análisis y resultados.....		53
3.1.	Casos de estudio o ejemplos prácticos.....	53
3.1.1.	Caso de estudio 1: Optimización de un voladizo mediante algoritmos inspirados en la naturaleza	53
3.1.2.	Caso de estudio 2: Optimización seccional y geométrica de una cubierta laminar de acero y vidrio	54
3.1.3.	Caso de estudio 3: Optimización de forma y geometría en la estructura de soporte de un estadio	55
3.1.4.	Caso de estudio 4: Optimización paramétrica de estructuras de acero en entorno BIM	56
3.1.5.	Caso de estudio 5: Hibridación de algoritmos genéticos con métodos clásicos para la optimización topológica.....	57
3.2.	Comparación con los métodos tradicionales.....	59
3.2.1.	Limitaciones de los métodos tradicionales	60
3.2.2.	Ventajas de los algoritmos inspirados en la naturaleza y optimización computacional	61
3.2.3.	Evidencias en casos de estudio	61
3.2.4.	Consideraciones económicas y sostenibles.....	62

3.2.5.	Limitaciones y desafíos de la optimización computacional	63
3.3.	Discusión de resultados y ventajas de la IA en la optimización	64
3.3.1.	Ventajas principales de la IA en optimización estructural	64
3.3.2.	Limitaciones y desafíos.....	65
3.3.3.	Perspectivas y aplicación en Colombia.....	66
Capítulo 4.	Conclusiones	68
4.1.	Hallazgos principales y relevancia del estudio	68
4.2.	Relación entre casos de estudio y objetivos planteados.....	69
4.3.	Limitaciones del estudio y consideraciones metodológicas	70
4.4.	Contribución al conocimiento y perspectivas futuras.....	71
4.5.	Reflexiones finales.....	72
Referencias Bibliográficas		74

Índice de figuras

Figura 1. Estructura metálica tipo pórtico en construcción.	18
Figura 2. Resultados de optimización topológica para viga en voladizo.....	24
Figura 3. Esquema del funcionamiento de un algoritmo genético.....	37
Figura 4. Esquema de una Red Neuronal Artificial (RNA).	38
Figura 5. Interacción entre el agente, el entorno y el humano en los modelos de aprendizaje por refuerzo.	39
Figura 6. Integración de algoritmos genéticos, redes neuronales y aprendizaje por refuerzo.	41

Índice de Tablas

Tabla 1. Comparación entre normativas técnicas aplicables al diseño de estructuras metálicas ..	20
Tabla 2. Fortalezas de los métodos de inteligencia artificial en el diseño estructural.	40
Tabla 4. Comparación de casos de estudio de optimización estructural con IA.....	59

Resumen

Esta investigación examina la incorporación de métodos computacionales avanzados para mejorar el proceso de diseño de estructuras metálicas, identificando las deficiencias de los procedimientos tradicionales que, si bien aseguran la seguridad estructural, limitan el desarrollo de alternativas más eficaces en términos de costos, utilización de materiales e impactos ambientales. Este estudio analiza la utilización de técnicas computacionales evolutivas, arquitecturas de procesamiento neuronal artificial y sistemas de aprendizaje automatizado como instrumentos adicionales enfocados en mejorar la calidad, optimización y precisión en la elaboración de proyectos de ingeniería estructural, superando de esta manera las limitaciones que presentan los métodos tradicionales.

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una metodología que integre tecnologías avanzadas mediante el uso de indicadores de efectividad estructural, económica y de sostenibilidad, con el fin de demostrar la capacidad de los sistemas para automatizar cálculos complejos, predecir el comportamiento de los elementos estructurales y ofrecer soluciones optimizadas que consideren múltiples variables y cumplan con las normativas vigentes. El alcance de esta investigación abarca desde la revisión de fundamentos teóricos y códigos de diseño en acero, así como directrices normativas, hasta la aplicación práctica, el análisis de resultados obtenidos a partir de modelos computacionales y la fundamentación teórica para la implementación crítica de nuevas tecnologías en el ámbito de la ingeniería estructural. El propósito principal es promover una ética de diseño más coordinada, ecológica e inteligente para los sistemas constructivos modernos y sus operaciones, contribuyendo de manera significativa tanto al cuerpo

de conocimiento como a la práctica de metodologías de diseño computacional avanzado en estructuras metálicas.

Abstract

This research examines the incorporation of advanced computational methods to enhance the design process of metallic structures, identifying the shortcomings of traditional procedures which, although ensuring structural safety, limit the development of more cost-effective alternatives in terms of material usage and environmental impact. This study analyzes the use of evolutionary computational techniques, artificial neural processing architectures, and automated learning systems as complementary tools aimed at improving quality, optimization, and accuracy in structural engineering project development, thereby overcoming the limitations presented by traditional methods.

The present work aims to develop a methodology that integrates advanced technologies through the use of indicators of structural, economic, and sustainability effectiveness, in order to demonstrate the capability of these systems to automate complex calculations, predict the behavior of structural elements, and provide optimized solutions that consider multiple variables while complying with current regulations. The scope of this research encompasses a review of theoretical foundations and steel design codes, as well as normative guidelines, extending to practical application, analysis of results obtained from computational models, and the theoretical basis for the critical implementation of new technologies in the field of structural engineering.

The primary purpose is to promote a more coordinated, ecological, and intelligent design ethic for modern construction systems and their operations, significantly contributing both to the body of knowledge and to the practice of advanced computational design methodologies in metallic structures.

Introducción

La ingeniería estructural es uno de los aspectos fundamentales en la ingeniería civil, ya que el éxito de una estructura generalmente depende de su capacidad para soportar cargas. Para este propósito, las estructuras metálicas se han consolidado como un sistema de construcción flexible, resistente y adaptable, especialmente apreciado por su ligereza, facilidad de montaje y modularidad.

Sin embargo, el diseño de tales estructuras introduce numerosos problemas técnicos asociados con la coordinación de numerosas variables, las limitaciones impuestas por las normativas y los compromisos entre objetivos como minimizar el peso mientras se asegura la resistencia estructural. En el pasado, estos problemas se han abordado, en primer lugar, utilizando métodos deterministas y estimaciones conservadoras, que garantizan la estabilidad de la estructura; pero estas estimaciones implican que generalmente no es posible buscar soluciones mas económicas, con menos insumos de material y menor impacto ambiental.

Para responder a este requisito, la optimización estructural se considera como una estrategia esencial para mejorar el rendimiento de las estructuras metálicas optimizando características, como dimensiones, distribución de material y geometría de configuración, sujetas a un conjunto de restricciones tecnológicas y normativas. Al mismo tiempo, los recientes avances en inteligencia artificial (IA) han desatado nuevos potenciales para el diseño estructural, como la automatización de cálculos complejos, la predicción del rendimiento estructural y la generación de soluciones optimas utilizando algoritmos evolutivos y redes neuronales. La combinación de IA y optimización estructural es mas que una herramienta de diseño que ahorra tiempo; permite la posibilidad de

explorar nuevas posibilidades de configuración en relación con las condiciones particulares del proyecto y los criterios de sostenibilidad.

En esta monografía, se presenta el uso de enfoques de inteligencia artificial, incluidos algoritmos genéticos, redes neuronales artificiales y optimización por enjambre de partículas para la optimización de estructuras metálicas. El propósito de este artículo es, principalmente, ilustrar como la inteligencia artificial puede emplearse como una herramienta de potencia de calculo asistentes como un medio complementario para mejorar la calidad, rapidez y precisión en el diseño estructural, aparte de los inconvenientes como las limitaciones de precisión y velocidad debido a la operación manual en un escenario normal.

Esta monografía tiene como objetivo contribuir a la comprensión y el uso de las nuevas tecnologías en la práctica de la ingeniería estructural, impulsando hacia una manera mas integrada, inteligente y sostenibles en el desarrollo de las infraestructuras modernas.

Capítulo 1. Generalidades

1.1. Fundamentos del diseño de estructuras metálicas

El diseño de estructuras metálicas es un tema importante en la ingeniería civil moderna, porque permite la construcción de edificios y también otras obras de la construcción civil con menor peso, mas fuertes y mas flexibles. Esto incluye una revisión línea por línea de todo, desde la selección de formas hasta la revisión de detalles de ensamblaje. Todo esto se basa en un fundamento legal y técnico para cuidar no solo la consistencia temporal, sino también la calidad y la eficiencia de los edificios durante toda su vida útil.

1.1.1 Principios básicos del diseño de estructuras metálicas

El diseño de estructuras metálicas es la parte indispensable de la ingeniería civil moderna, que permite construir edificios y estructuras que aseguran un alto nivel de resistencia, fiabilidad y vitalidad. Este proceso comprende varias etapas, que van desde la elección de materiales hasta el examen de todos los detalles de construcción. Todo esto se desarrolla bajo regulaciones y parámetros técnicos, que garantizan no solo la seguridad estructural, sino también el uso, función y eficiencia de los edificios durante su vida útil.

Seguridad Estructural

La seguridad es el secreto de toda estructura de construcción. Todas las estructuras metálicas diseñadas deben ser capaces de resistir cualquier carga que pueda imponerse a lo largo de su vida útil. Estas consisten en su propio peso y también en las cargas vivas de construcción, que consisten en el uso del edificio y las diversas situaciones que puedan ocurrir, por ejemplo, el viento, la actividad sísmica o un impacto.

Para garantizar la estabilidad y la resistencia de las estructuras, estas se someten a cálculos detallados en los que se consideran las diferentes combinaciones de cargas junto con factores de seguridad apropiados. Estos procesos se realizan para evitar a toda costa cualquier fallo estructural por fatiga, pandeo y el colapso total de la estructura (PEB Steel, 2025).

Funcionalidad y flexibilidad

El diseño debe responder a las necesidades del proyecto, lo que implica que se de un uso eficiente del espacio disponible y la posibilidad de realizar futuras adaptaciones. Las estructuras metálicas ofrecen unas particulares ventajas debido a su carácter modular, su ligereza relativa y su posibilidad de desmontaje. Estas características permiten que tenga una mayor adaptabilidad en el diseño arquitectónico facilitando las ampliaciones, redistribuciones o reubicaciones sin que se vea comprometida la integridad estructural del proyecto (PEB Steel, 2025).

Estética y economía

Tradicionalmente en el diseño estructural se han priorizado los principios de resistencia y funcionalidad, pero en las últimas décadas ha adquirido importancia el principio estético de la estructura. Al permitir formas ligeras y esbeltas las estructuras metálicas pueden integrarse armónicamente al entorno arquitectónico. En el diseño se tiene que considerar la optimización en el uso de materiales y los procesos constructivos, buscando siempre la mejor relación costo-beneficio. La eficiencia material, el aprovechamiento de los tiempos de ejecución y la durabilidad del sistema son los factores clave en la evaluación económica del diseño (PEB Steel, 2025).

El diseño de las estructuras metálicas no se limita a resolver las obligaciones técnicas, si no que combina un conjunto de decisiones que buscan equilibrar seguridad, funcionalidad, estética y economía. La calidad final de una estructura metálica radica precisamente en la capacidad del diseñador para integrar estos principios de manera lógica y sostenible.

1.1.2 Proceso de diseño y herramientas

En el proceso de diseño de estructuras metálicas se sigue una metodología sistemática y rigurosa que está compuesta por varias etapas las cuales permiten transformar los requerimientos del proyecto en soluciones estructurales viables, sostenibles y eficientes. A lo largo de este proceso se integran criterios técnicos, normativos y económicos basados en las herramientas de análisis y softwares especializados. El proceso de diseño de estructuras metálicas se compone por las siguientes fases.

Fase 1. Determinación de la idoneidad del sistema estructural

Esta es la etapa inicial, en la cual se evalúa la posibilidad de utilizar una estructura metálica como solución constructiva para el proyecto en cuestión. Dicha evaluación comprende factores como el tipo y función de la edificación, las condiciones de carga esperadas (Cargas vivas, muertas y accidentales), los requerimientos técnicos específicos y el presupuesto disponible. La decisión sobre la idoneidad del sistema influye de manera significativa en la estrategia general del diseño.

Fase 2. Selección del sistema estructural y diseño conceptual

Una vez confirmada la viabilidad de utilizar las estructuras metálicas, se procede a la selección de la tipología estructural más apropiada. Entre las opciones más comunes se encuentran los pórticos, marcos rígidos, cerchas y las estructuras modulares. Esta fase tiene como objetivo principal el lograr una distribución eficiente de las cargas asegurando la estabilidad global del sistema. El diseño conceptual es el que se encarga de establecer las bases geométricas y funcionales sobre las cuales se diseñara el modelo estructural definitivo (PEB Steel, 2025).

Fase 3. Dimensionamiento de componentes y diseño de conexiones

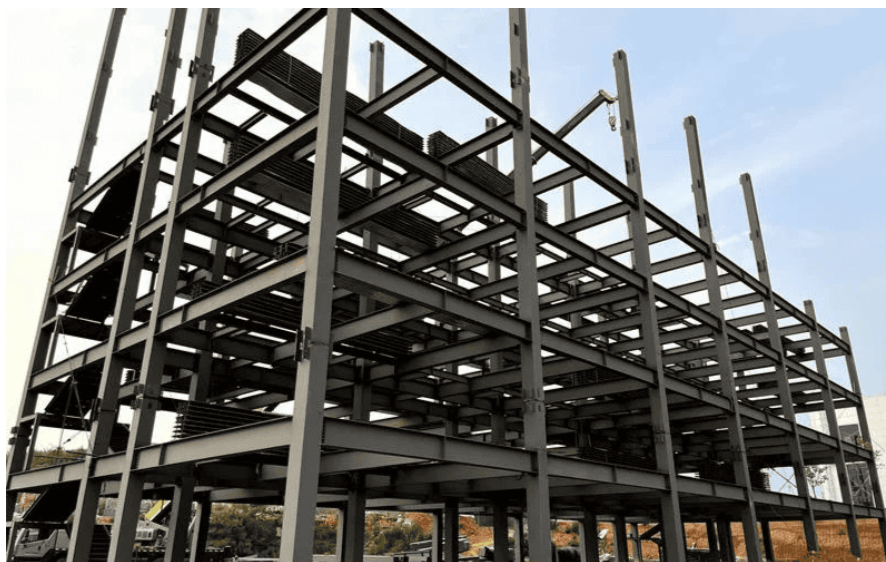
En esta etapa se comprende el análisis detallado de todos los elementos estructurales como las vigas, columnas, arriostres y los demás componentes portantes. Se determina la resistencia y comportamiento bajo carga utilizando métodos analíticos y herramientas computacionales especializadas, tales como softwares de modelado estructural por elementos finitos. Un aspecto crítico en este punto es el diseño de los nodos o conexiones ya que se constituyen los puntos en los cuales se transmiten los esfuerzos entre los elementos, ya que son determinantes para prevenir los fallos locales o las inestabilidades (Havit Steel, 2023).

Fase 4. Elaboración de planos constructivos y especificaciones técnicas

Ya en la última fase en el diseño de estructuras metálicas se desarrollan los planos de fabricación y montaje, junto con las especificaciones técnicas necesarias para su ejecución. Estos documentos deben ser claros, completos y precisos, dado que componen la guía directa para la fabricación de las estructuras y su posterior ensamblaje en obra. Una documentación técnica deficiente puede comprometer directamente la calidad estructural y generar retrasos o sobrecostos durante la fase constructiva del proyecto (PEB Steel, 2025).

En conjuntos, todas las etapas constituyen un proceso integrado en el cual las decisiones de diseño se fundamentan en principios estructurales sólidos y en el uso de herramientas tecnológicas avanzadas.

Figura 1. Estructura metálica tipo pórtico en construcción.



Nota. Ejemplo real de una estructura metálica multipiso, conformada por columnas y vigas en acero estructural. Tomado de (PEB Steel, 2025).

1.1.3. Normatividad aplicable al diseño de estructuras metálicas

El diseño de estructuras de acero esta regido por una serie de normas técnicas que son de fácil operación. Estas normativas, que se presentan tanto a nivel nacional como internacional, rigen el marco legal necesario para garantizar que las estructuras cumplan con su uso y estándares de rendimiento previstos.

En Colombia, una de las guías utilizadas para el diseño y construcción de estructuras metálicas es la norma técnica colombiana (NTC) 5832. Esta norma establece las dimensiones mínimas, propiedades mecánicas, procesos de soldadura, calidad de soldadura y requisitos de inspección. El cumplimiento de estas normas garantiza la estabilidad y durabilidad de las edificaciones, evitando cualquier tipo de falla estructuras. Esto debida a que se regulan tanto los materiales, como los

procedimientos constructivos y los esfuerzos que las pruebas de carga generan (Dye construcciones, 2023).

Además, el reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) es la regulación obligatoria para el diseño, fabricación y montaje de estructuras metálicas en Colombia, enfocándose principalmente en la resistencia contra actividades sísmicas. El Título F de la NSR-10 especifica las regulaciones para el diseño de estructuras de acero y aluminio y establece criterios para la zona sísmica, tipos de sistemas estructurales, límites de aplicación, materiales y métodos para la preparación de planos y especificaciones (NSR-10, 2010). Para la NSR-10, no solo la geometría de las estructuras metálicas ligeras y pesadas debe diseñarse de acuerdo con el peligro sísmico en la ubicación, la ductilidad de los materiales, sino también la elección adecuada de sistemas estructurales como marcos, arriostramientos y conexiones para hacer la estructura segura ante la acción sísmica (EVI SAS, 2025; Ingetecho, 2024).

El Manual de Construcción de Acero del Instituto Americano de Construcción de Acero (AISC) es un ejemplo destacado de código a nivel mundial que es conocido por ser técnicamente riguroso e incorporar avances recientes en análisis y diseño estructural. Entre ellos, se ha propuesto como estándar métodos alternativos de estado límite como el Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD), que involucra el aspecto probabilístico realista de las cargas y resistencias consideradas dentro de los diseños en muchos países (Pino y otros, 2022).

A continuación, se presenta una tabla tipo resumen que compara la NTC 5832, la NSR-10 y la AISC:

Tabla 1. Comparación entre normativas técnicas aplicables al diseño de estructuras metálicas

Normativa	Ámbito	Aspectos clave
NTC 5832	Nacional	Uniones, soldaduras, dimensiones mínimas, control de calidad.
NSR-10	Sísmico Nacional	Seguridad sísmica, sistemas estructurales, documentación.
AISC	Internacional	Evaluación probabilística, eficiencia estructural.

Las normas existentes han establecido no solo los criterios cuantitativos mínimos para el dimensionamiento adecuado de los edificios, sino que también promueven prácticas de construcción sensatas. De este modo, se reduce la posibilidad de fallos estructurales y se estandariza la construcción, fabricación e instalación de estructuras metálicas. Por lo tanto, estos requisitos no son una simple formalidad, sino que son principios esenciales que garantizan la calidad, seguridad y durabilidad de las estructuras.

1.1.4. Importancia de la calidad y la experiencia laboral

Los diseños de estructuras metálicas y la implementación de estas no pueden considerarse solo desde la correcta aplicación de condiciones técnicas y normativas. También se debe tener en cuenta la calidad de los suministros y la experiencia del equipo profesional para el proyecto. Son parámetros para determinar cuán seguro, productivo y duradero puede ser dicho trabajo en general.

Seleccionar los materiales adecuados es clave para asegurar que la estructura funcione bien con el tiempo. Por lo tanto, el uso de aceros clasificados junto con un seguimiento estricto de la

calidad durante el galvanizado, la soldadura y el atornillado, etc., debería eliminar en gran medida tales problemas de antemano.

También se necesita gente con experiencia y probada capacidad para leer y aplicar estas complicadas regulaciones técnicas. Conocer herramientas de modelado modernas, prestar atención a situaciones cruciales y buscar soluciones no estándar son habilidades que son difíciles de vincular a la calidad final del proyecto.

La investigación y el diseño, así como el procesamiento y el montaje, se avanza con dispositivos de inspección necesarios. Son más refinados y es menos probable que cometan errores. Sin embargo, su valor varía con la habilidad y capacidad técnica de la persona que los utiliza (Taesmet, 2024).

En otras palabras, lo tangible e intangible del equipo no es un plus sino una premisa para un desarrollo exitoso. Es la combinación de habilidad, atención al detalle y deber de cuidado lo que convierte un diseño en una pieza de infraestructura que hace una red segura, utilizable y duradera.

1.2.Principios básicos de optimización estructural

Los enfoques de optimización son necesarios para los ingenieros civiles para mejorar el comportamiento de las estructuras. No se trata solo de seguir un conjunto de reglas; se trata de ser buenos administradores.

La segunda fase del problema de optimización es expresar matemáticamente los objetivos y restricciones, y desarrollar modelos que faciliten la evaluación de varias opciones de diseño para

determinar el diseño óptimo. Por esta razón, y gracias a los medios computacionales, la estructura puede compararse con precisión con diferentes casos de carga, materiales y geometrías. Esta metodología, en comparación con el diseño tradicional, es una innovación importante donde un diseño generalmente se realiza con una suposición excesivamente conservadora y soluciones típicas. Esta optimización en la estructura permite desarrollar nuevas propuestas que son muy sensibles al proyecto y a cuestiones como la sostenibilidad, eficiencia y economía (Mares Carreño y otros, 2021).

Al optimizar el diseño para estructuras de acero, se puede lograr un diseño más activo en la ingeniería de construcción de manera que la estructura no solo tenga cierto grado de seguridad, sino que también logre la máxima capacidad de carga de la estructura, de modo que no solo sea económica, sino que también haga pleno uso del diseño económico y sostenible de la estructura.

1.2.1 Objetivos de la optimización estructural

La optimización estructural es un proceso secuencial de idealización de la forma óptima que cumple con la seguridad, eficiencia, economía y protección del medio ambiente. Esta metodología permite al diseñador optar por soluciones más racionales de acuerdo con los requisitos particulares del trabajo.

El objetivo final de todo este trabajo es mejorar el rendimiento estructural minimizando el peso y el costo de la obra mientras se mantiene su respuesta estructural. Esto resulta en un uso más eficiente del material, lo que tiene beneficios económicos directos y beneficios ambientales por la reducción del costo ambiental debido a la producción y transporte de materiales.

El proceso de optimización también tiene el objetivo de maximizar la resistencia y estabilidad de la estructura. Es decir, todos los componentes deben cumplir con los límites en cuanto al comportamiento de deformación, factor, estabilidad y criterios de servicio.

Otro propósito principal es la racionalización de la geometría y la distribución del material estructural para obtener el comportamiento óptimo con las cargas impuestas y reducir el desperdicio aumentando la utilidad constructiva. Este procedimiento no solo está en consonancia con la lógica de la eficiencia técnica, sino también con los principios ecológicos actuales de sostenibilidad que se encuentran en el diseño estructural moderno (ESSS, 2023).

1.2.2. Variables y restricciones en la optimización estructural

Las variables de optimización están directamente vinculadas a las dimensiones físicas, la geometría del sistema estructural y las propiedades mecánicas de los materiales empleados. Estas cantidades determinan la respuesta estructural y son cantidades sobre las cuales se mueve la optimización. Estas restricciones marcan el límite que debe obedecerse durante la optimización.

Estas pueden ser limitaciones en la longitud de los elementos o relaciones entre dimensiones y en las condiciones sobre el comportamiento de la estructura, por ejemplo, deflexiones máximas o estrés interno máximo. La adherencia a estas restricciones es necesaria para mantener la solución óptima válida y físicamente factible y segura (EEG , 2023).

Es evidente que la correcta definición de variables y restricciones es lo que hace de la optimización estructural una herramienta precisa y eficiente en el proceso de diseño.

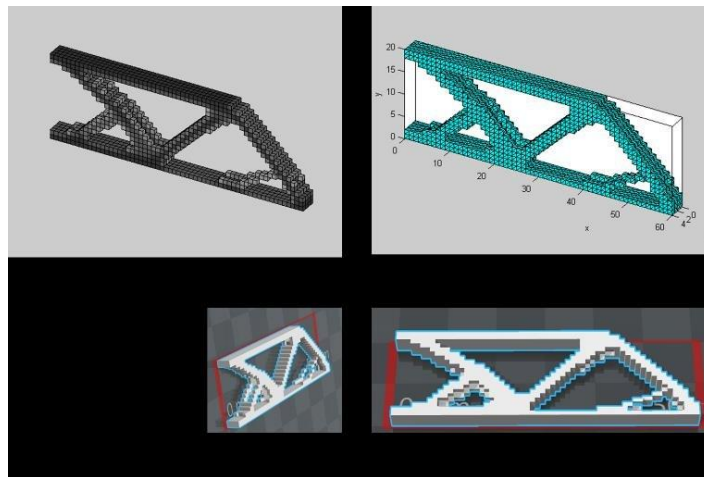
1.2.3. Métodos y técnicas de optimización

La optimización estructural se basa en la utilización de diferentes métodos y técnicas que hacen posible enfrentar problemas de diseño complejos con una amplia visión de análisis. Estas herramientas ayudan a buscar soluciones de diseño óptimas cambiando sistemáticamente las variables de diseño e investigando las respuestas estructurales con respecto a varios casos de acciones.

A continuación, se presentan algunas de las estrategias de optimización más comunes, incluyendo:

Optimización topológica

Figura 2. Resultados de optimización topológica para viga en voladizo.



Nota. Figura tomada de (Liu y Tovar, 2014).

La optimización topológica es el proceso de encontrar la distribución óptima del material en el espacio de diseño dado.

La ventaja de esto es que las áreas donde el material no está fortaleciendo particularmente la estructura o proporcionando estabilidad de ninguna manera pueden ser eliminadas, esencialmente haciendo el producto más ligero sin afectar su estabilidad general.

La optimización topológica es particularmente ventajosa en las etapas tempranas del diseño porque genera geometrías estructurales novedosas que los diseñadores podrían no descubrir de otra manera (Formlabs, s.f.).

Optimización paramétrica

La optimización paramétrica es un método para variar algunos parámetros básicos del diseño estructural, como las dimensiones geométricas, el rendimiento mecánico del material y la condición de carga que se probarán y controlarán sistemáticamente de acuerdo con el diseño.

Este tipo de enfoque permite la comparación de diferentes conjuntos de variables considerando una variedad de atributos (resistencia, rigidez, peso y costo) para encontrar la disposición que conduzca a la mejora del rendimiento estructural (ESSS, 2023).

Este enfoque es apropiado para proyectos con geometría repetitiva o modularizada como marcos, ya que puede generar grandes mejoras en el uso de materiales y el rendimiento mecánico con solo pequeños cambios en los parámetros, de manera que se promueva una mejor utilización de los recursos y una reducción de costos sin comprometer la seguridad (EEG , 2023).

Optimización multiobjetivo

Cuando se cuenta con diferentes objetivos de diseño, se debe emplear la optimización multiobjetivo. Este método no busca una única solución "mejor", sino distintas soluciones eficientes donde cada solución representa diferentes compensaciones entre los criterios. Estas soluciones se conocen como el frente de Pareto y ofrecen al diseñador la opción de seleccionar según las prioridades particulares de cada proyecto (Initube, 2023).

Algoritmos inteligentes

Cuando la búsqueda es amplia, no lineal, o cuenta con múltiples locales óptimos, se implementan algoritmos de optimización fundamentados en procesos naturales o sociales. Los algoritmos genéticos, las técnicas de enjambre de partículas y el recocido simulado son los más utilizados. Estos procedimientos tienen la capacidad de examinar de manera sistemática distribuciones complejas de la estructura y calcular el óptimo global, incluso para problemas de gran envergadura (Mares Carreño y otros, 2021).

La decisión de centrarse en una técnica de optimización dependerá de las características del problema, de la disponibilidad de los recursos computacionales y de cuál debería ser el enfoque del diseño. El uso de estas técnicas es una innovación en el diseño actual, y esto nos ha permitido desarrollar soluciones más sostenibles y eficientes.

1.2.4. Aplicaciones y beneficios

La optimización estructural ha sido desde hace muchos años y es actualmente una de las herramientas mas extendidas utilizadas en la ingeniería civil para el diseño de los diferentes tipos de estructuras, desde las mas comunes hasta las formas mas innovadoras.

Si bien sus campos de aplicación pueden ser de múltiples tipos: puntos, edificios altos, fachadas de vidrio, naves industriales, entramados espaciales, elementos de construcción complejos, lo que es común a todos es el énfasis en la optimización de estructuras y la racionalización del uso de materiales.

Su ventaja fundamental es el ahorro de materiales, lo que conduce directamente a reducciones en los costos de transporte e instalación de materiales. Este uso cuidadoso de los materiales no solo es rentable, sino que también es ecológico. Además, la optimización conduce a un mejor rendimiento de la forma ajustada al resistir las cargas más desfavorables y a satisfacer exigentes requisitos técnicos.

Por otro lado, la optimización permite la búsqueda de conceptos novedosos que estarían en el espacio de los sueños del pensamiento por un tiempo, pero que de otro modo quedarían fuera de consideración con las prácticas de diseño convencionales y también ofrece un camino para empujar los límites de la creatividad y la ingeniería (ESSS, 2023).

1.3. Introducción a la inteligencia artificial y los algoritmos aplicados

La aplicación de la inteligencia artificial (IA) está contribuyendo a una variedad de cuestiones clave hoy en día, que van desde la medicina hasta la construcción de edificios, y se ha establecido como una de las tecnologías más candentes. Especialmente en el ámbito de la ingeniería estructural y el diseño y optimización del acero, la IA ha evolucionado como una potencia impulsada por la inteligencia. Con la IA, los ingenieros pueden procesar enormes puntos de datos, prever tendencias y encontrar comportamientos complejos en un conjunto de problemas que históricamente requerían experiencia manual o herramientas de modelado lineal. Dicho progreso permite un diseño más fácil y hace posible la exploración de nuevas soluciones (Proexacademy, 2025).

Con el beneficio de estas herramientas, los ingenieros pueden desarrollar soluciones cada vez más confiables, rentables y sostenibles, diseñadas para cumplir con las condiciones únicas de su industria y optimizadas para múltiples factores. Así que la IA no reemplazará el trabajo profesional, sino que lo aumentará al mejorar el análisis y la toma de decisiones.

1.3.1 Aplicaciones de la inteligencia artificial en el diseño estructural

La aplicación de la inteligencia artificial en la ingeniería crea oportunidades para nuevas generaciones de diseño, fabricación, cálculo y selección de tecnología de materiales.

La IA se ha convertido en una herramienta creativa, agregando valor a los diseños. Una de las aplicaciones más emocionantes es la optimización del diseño. Con la ayuda de algoritmos genéticos, redes neuronales y otros métodos de aprendizaje automático, es posible crear una serie de contrapartes de diseño para facilitar al diseñador la optimización automática del proceso de diseño en cuanto a la seguridad de la construcción, el uso justo de materiales y los costos de construcción. Por lo tanto, el sistema puede seleccionar, sobre la base de modelos de predicción, la solución entre todas las alternativas posibles (Biblus , 2025).

También vale la pena mencionar la generación automática de cálculos estructurales. La IA facilita procesos que eran muy repetitivos, como la verificación de tensiones, deflexiones y combinaciones de cargas con mayor precisión y en mucho menos tiempo que los métodos convencionales. Esto ha minimizado en gran medida el nivel de error humano; además, ha acelerado las fases de desarrollo del proyecto y aumenta la trazabilidad del diseño (Maldonado, 2025).

Asimismo, la IA cuenta con la capacidad de implementar modelos de análisis predictivo, los cuales son capaces de anticipar el comportamiento estructural ante condiciones extremas (terremotos, vientos intensos o sobrecargas accidentales). Estos modelos entrenados con bases de datos históricas y simulaciones, aportan al fortalecimiento de la resiliencia estructural, garantizando el diseño de infraestructuras metálicas más robustas y adaptadas a entornos cambiantes (Proexacademy, 2025).

Por último, la IA es muy útil al momento de evaluar y seleccionar materiales de construcción, especialmente en proyectos donde se utilizan materiales nuevos o compuestos. Los sistemas inteligentes pueden predecir con alta fiabilidad la resistencia, durabilidad y comportamiento de los

materiales en distintas condiciones operativas, optimizando su uso en base a las exigencias del proyecto (Biblus , 2025).

En conjunto, estas aplicaciones establecen a la inteligencia artificial como una ayuda estratégica para el ingeniero estructural moderno, promoviendo así unos diseños más precisos, más eficientes y más adaptables a posibles reformas.

1.3.2 Algoritmos mas utilizados en la optimización estructural

La inteligencia artificial se ha desarrollado en la ciencia de la ingeniería como resultado del desarrollo y aplicación de una serie de algoritmos para resolver problemas complejos de optimización, predicción y decisión. Estos procedimientos computacionales, reconfigurados para el diseño estructural, permiten el descubrimiento de posiciones innovadoras y reaccionar a múltiples factores interdisciplinarios, haciéndolo con una precisión y rapidez que no se tiene con los métodos tradicionales.

Algoritmos genéticos

Es una técnica que está basada en las leyes de la evolución natural. Este tipo de algoritmo busca a través de un espacio muy grande de formas estructurales potenciales, con la computadora actualizando interactivamente cuáles son las más prometedoras. También es una herramienta muy

útil para la optimización estructural en situaciones de diseño complejas, ya que puede evitar los óptimos locales (Proexacademy, 2025).

Redes neuronales

Estas permiten modelar relaciones no lineales entre múltiples variables estructurales. Estas redes, al ser entrenadas con grandes volúmenes de datos, adquieren la capacidad de predecir los comportamientos de los elementos estructurales bajo las distintas de condiciones de carga, de geometría o de materiales. Su principal ventaja radica en la capacidad de generar y adaptarse a contextos variables (Biblus , 2025).

Aprendizaje por refuerzo

Estos algoritmos han sido desarrollados en los últimos años y se han vuelto cada vez más prometedores en la ingeniería estructural, porque pueden permitir que un sistema aprenda a actuar interactuando con su entorno y, por lo tanto, tomar decisiones optimizadas en cada paso e incluso mejorar con el tiempo.

En contraste, en el diseño estructural, el aprendizaje por refuerzo (RL) puede optimizar secuencias de diseño, secuencias de construcción o mecanismos de adaptación a escenarios ambientales difíciles (Maldonado, 2025).

Cada uno de los algoritmos presentados ofrece ventajas particulares sobre los otros, y teniendo en cuenta los diferentes problemas que se puedan presentar en el diseño estructural ofrecen diferentes alternativas o soluciones. El uso de estas herramientas de manera conjunta, abre las puertas a muchas posibilidades dentro del área del diseño de las estructuras metálicas.

1.3.3 Beneficios y futuro de la inteligencia artificial en la ingeniería estructural

La inteligencia artificial en la ingeniería estructural es una fuente de conocimiento y sistematización de datos para el diseñador, pero de ninguna manera debe verse como un intento de reemplazar la experiencia del experto. La inteligencia artificial no es un problema, sino un aliado al servicio de la toma de decisiones razonadas. Esto conlleva a la reducción de los márgenes de error humano y una mejora en la solución de problemas difíciles. Esta relación entre la inteligencia humana y la alta tecnología es la fuente de nuestras formas de abordar los desafíos de hoy y de mañana en el diseño estructural.

La combinación de inteligencia artificial y plataformas digitales como las herramientas BIM para el diseño puede producir un diseño más integrado y completo. Permite proporcionar un entorno virtual compartido, en el cual el modelo estructural, la geometría y la información de comportamiento están integrados en la misma base de datos, de modo que se pueda tener una visualización global del proyecto. Mejora la comunicación interdisciplinaria, además de ayudar a formar planes de resolución de disputas de construcción, para asegurar una mayor eficiencia en la planificación y toma de decisiones del proyecto. (Kepler, 2024).

Por último, la inteligencia artificial con algoritmos de optimización puede considerarse la ingeniería estructural más inteligente, más fuerte (en términos de capacidad computacional), que está más cerca, tal vez incluso al alcance, y podemos lograrlo. Los edificios diseñados de esta manera suelen ser más eficientes en el uso de recursos, mejor capacitados para enfrentar eventos climáticos extremos y condiciones cambiantes.

1.4.Revisión de estudios previos y aplicaciones en el área

Durante la última época, la inteligencia artificial se ha utilizado ampliamente en el diseño de estructuras metálicas. Esto debido a que varios trabajos de investigación demuestran que los algoritmos inteligentes tienen la capacidad de obtener múltiples soluciones estructurales, lo que nos permite seleccionar la mejor solución en un proyecto con varias problemáticas.

Arcila (2014) mostró que la generación multiobjetivo de acuerdo con algoritmos genéticos (GA) y el aprendizaje por refuerzo (RL) permite la optimización de secciones estructurales, resultando en reducciones significativas de peso y costo. Mientras tanto, Ríos (2024) introdujo la posibilidad del diseño generativo con IA, lo que de otro modo tendría en cuenta millones de combinaciones de geometría y material, reduciría los tiempos de diseño y fortalecería el poder de toma de decisiones.

Casado Bravo (2022), en un conjunto de estudios, utilizó algoritmos como GA, PSO (Optimización por Enjambre de Partículas) o GSA (Algoritmo de Búsqueda Gravitacional) con estructuras metálicas complejas, obteniendo como resultados destacados la reducción de peso y el aumento del comportamiento estructural. Igualmente, Cisneros (2020) incorporó los algoritmos

genéticos con herramientas BIM para optimizar los elementos de acero dentro de los estándares de seguridad y eficiencia normativos.

La inteligencia artificial ha demostrado una alta eficiencia en la predicción y análisis de escenarios extremos como un terremoto o vientos fuertes (Rastagaran y otros, 2021) y en combinación con herramientas digitales para mejorar la resiliencia estructural de los edificios y la sostenibilidad ambiental (Proexacademy, 2025).

Estas investigaciones en conjunto validan el papel de la inteligencia artificial en la ingeniería estructural actual, haciendo que las soluciones para los problemas modernos sean más seguras, económicas y flexibles.

Capítulo 2. Metodología

En este capítulo se expone la metodología empleada para mejorar el diseño de estructuras metálicas mediante el uso de técnicas avanzadas de inteligencia artificial. Es importante señalar que este trabajo monográfico tiene un enfoque teórico, por lo que el análisis y la discusión de los resultados se fundamentan en la revisión de la literatura y en la simulación de casos simples para demostrar la aplicación de los algoritmos elegidos. Se describen los criterios para mejorar el rendimiento, la elección de algoritmos, su puesta en práctica y los métodos utilizados para medir su eficacia. De igual manera, se detalla el método organizado utilizado para garantizar la validez, la reproducibilidad y la aplicabilidad de los resultados alcanzados.

2.1. Descripción de los algoritmos y técnicas de IA utilizadas

La inteligencia artificial se ha convertido en una herramienta esencial en la ingeniería estructural, facilitando la resolución de problemas de diseño complicados que incluyen diversas variables, limitaciones y objetivos en conflicto. Las metodologías elegidas para este estudio incluyen algoritmos genéticos, redes neuronales artificiales y el aprendizaje por refuerzo.

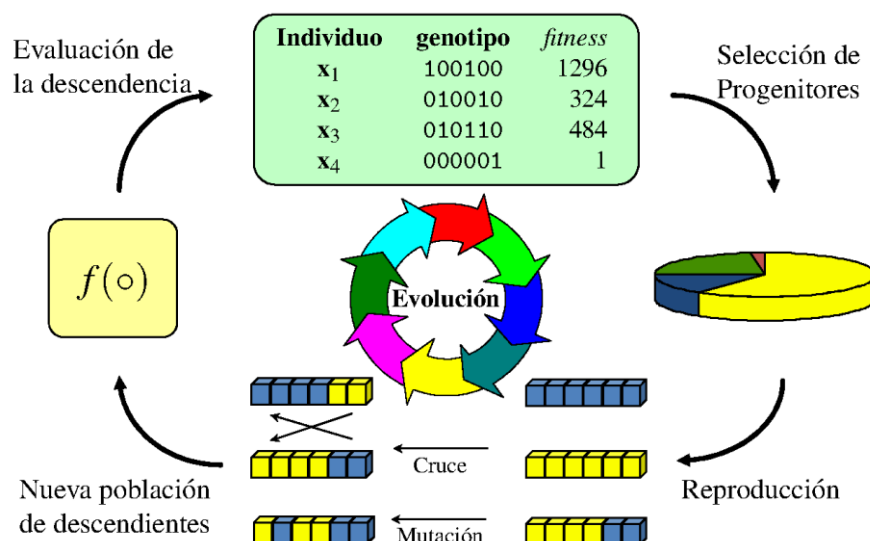
2.1.1 Algoritmos Genéticos (AG)

Los algoritmos genéticos (AG) son una de las técnicas más conocidas y usadas en el ámbito de la inteligencia artificial, especialmente en la optimización de estructuras. Fundamentados en los principios de la evolución natural formulados por Holland (1975) y ampliados por Goldberg (1989), estos algoritmos utilizan métodos de selección, cruce y mutación en poblaciones de soluciones posibles, con la finalidad de avanzar hacia configuraciones más óptimas.

En el diseño de estructuras metálicas, los algoritmos genéticos permiten investigar soluciones muy complejas, considerando diversas variables de diseño, normativas y funciones objetivos no lineales. Su habilidad para eludir soluciones locales y para manejar desafíos con múltiples objetivos en conflicto los convierte en instrumentos apropiados para abordar problemas estructurales complicados en situaciones prácticas (Goldberg, 1989; Arora, 2019).

A continuación, se explica cómo funcionan los algoritmos genéticos y cómo se utilizan específicamente para optimizar diseños de estructuras metálicas.

Figura 3. Esquema del funcionamiento de un algoritmo genético.



Nota. En esta imagen se puede observar el ciclo de evolución de un algoritmo genético. Este es un proceso iterativo el cual permite encontrar soluciones óptimas o cercanas al óptimo en problemas complejos de diseño estructural. Tomado de (DCCIA, 2025).

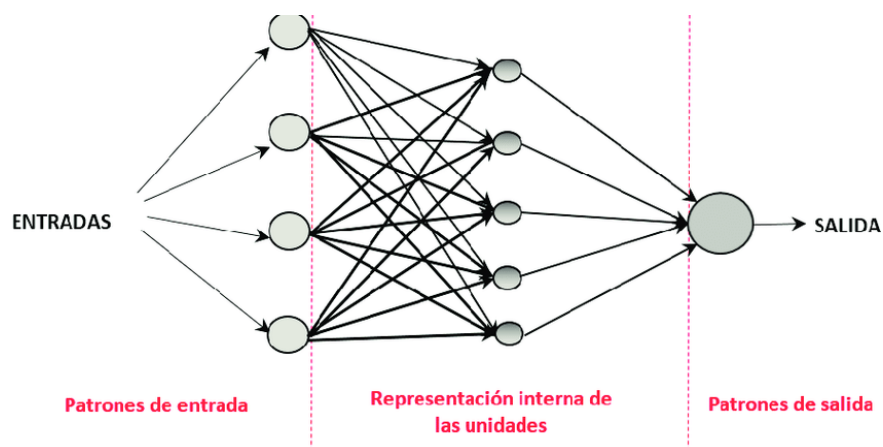
2.1.2. Redes neuronales artificiales

Las redes neuronales artificiales (RNA) son modelos de computación que se basan en la organización y el modo de operación del cerebro humano. Se distinguen por su habilidad para captar relaciones complejas y no lineales entre las variables de entrada y salida (Haykin, 2009). En el campo de la ingeniería estructural, las redes neuronales artificiales han mostrado una gran efectividad en la simulación del comportamiento de las estructuras, la anticipación de tensiones y deformaciones, así como en la evaluación ágil de diferentes opciones de diseño.

Una de sus características más importantes se encuentra en la habilidad para manejar grandes cantidades de datos, mejorando el tiempo de cálculo y facilitando la evaluación

de configuraciones estructurales de manera efectiva (Haykin, 2009; Proexacademy, 2025). Asimismo, las RNA pueden combinarse con algoritmos evolutivos, mejorando la exploración del espacio de soluciones y aumentando la exactitud de los resultados en procedimientos de optimización estructural compleja.

Figura 4. Red Neuronal Artificial (RNA).



Nota. Esquema de una Red Neuronal Artificial (RNA) de tres capas. Fuente: Adaptado de Isasi y Galván (2004).

2.1.3. Aprendizaje por refuerzo (AR)

El aprendizaje por refuerzo (AR) es una parte avanzada de la inteligencia artificial, donde un agente se relaciona de manera activa con su entorno y aprende a elegir las mejores decisiones a través de recompensas o castigos (Sutton & Barto, 2018). A diferencia del aprendizaje que tiene supervisión, el aprendizaje reforzado no necesita datos con etiquetas, lo que

lo convierte en una opción ideal para sistemas estructurales complejos que operan en condiciones variables.

En el ámbito del diseño estructural, la Realidad Aumentada (AR) facilita la mejora de los procesos de toma de decisiones durante las etapas de diseño, las fases de construcción o las adaptaciones frente a situaciones críticas, como terremotos o cargas inesperadas (Sutton & Barto, 2018). Su habilidad para aprender de manera continua permite ajustar el diseño estructural a factores cambiantes, lo que mejora la resistencia y el rendimiento de las estructuras metálicas.

Figura 5. Interacción entre el agente, el entorno y el humano en los modelos de aprendizaje por refuerzo.



Nota. Tomado de Jurado Martin (2024).

2.1.4. Integración de las técnicas

El algoritmo genético, las redes neuronales artificiales y el aprendizaje por refuerzo combinados e integrados se muestran en este documento como un procedimiento efectivo en el

diseño óptimo de estructuras metálicas. Cada enfoque proporciona beneficios complementarios: los algoritmos genéticos ofrecen la capacidad de manejar la exploración del espacio de soluciones de manera integral, las redes neuronales artificiales nos brindan una estrategia predictiva, así como una forma de disminuir los tiempos de cálculo, y el aprendizaje por refuerzo puede ofrecernos una toma de decisiones dinámica y adaptativa (Arora, 2019; Proexacademy, 2025).

La adopción de sistemas mixtos posibilita capitalizar estas ventajas, favoreciendo la creación de diseños estructurales que sean más eficaces, seguros y ecológicos. En esta investigación, se propone esta combinación como una estrategia principal para abordar los retos contemporáneos en la ingeniería estructural que utiliza inteligencia artificial.

En la Tabla 2. se presenta un resumen de las principales características y beneficios de estas técnicas en el contexto de la optimización estructural.

Tabla 2. Fortalezas de los métodos de inteligencia artificial en el diseño estructural.

Técnica	Función principal	Ventajas en el diseño estructural
Algoritmos Genéticos (AG)	Exploran eficientemente grandes espacios de soluciones, permitiendo encontrar óptimos globales o cercanos.	Encuentran soluciones optimas en espacios complejos y con múltiples variables.
Redes Neuronales Artificiales (RNA)	Evalúan rápidamente el desempeño estructural y predicen resultados a partir de grandes volúmenes de datos.	Aceleran el análisis estructural al predecir resultados con precisión.
Algoritmos Basados en Reglas (AR)	Aplican criterios expertos y normativos para validar soluciones, asegurando cumplimiento y coherencia.	Mejoran la adaptabilidad y eficiencia del proceso de toma de decisiones.

La interacción entre estas técnicas se implementa en sistemas híbridos, donde cada una cumple una función específica dentro del flujo de optimización. La Figura 2.1 ilustra la dinámica de esta integración:

Figura 6. Integración de algoritmos genéticos, redes neuronales y aprendizaje por refuerzo.



Como se aprecia en la figura referenciada, los Algoritmos Genéticos tienen la función de generar un conjunto amplio de configuraciones estructurales viables. Estas alternativas son evaluadas posteriormente por las Redes Neuronales Artificiales, las cuales estiman su comportamiento estructural de manera eficiente, sin requerir procesos de cálculo intensivos.

Finalmente, los Algoritmos Basados en Reglas se encargan de validar que las soluciones obtenidas cumplan con las normativas vigentes y con los criterios técnicos de diseño. La integración de estas técnicas contribuye no solo a una notable reducción en los tiempos de cálculo, sino también a una mejora sustancial en la calidad y precisión de los resultados, permitiendo el desarrollo de estructuras más seguras, rentables y con un desempeño optimizado frente a las diversas condiciones de carga y servicio (Arora, 2019; Proexacademy, 2025).

2.2. Criterios de optimización (peso resistencia, costo, etc.)

La optimización en el diseño estructural tiene como propósito fundamental la identificación de soluciones que ofrezcan el mejor equilibrio posible entre múltiples objetivos, considerando tanto el desempeño técnico como los aspectos económicos y ambientales. En el caso de las estructuras metálicas, este proceso implica la evaluación de diversas alternativas con el fin de lograr configuraciones que minimicen el uso de materiales y los costos asociados, al tiempo que garantizan altos niveles de seguridad, funcionalidad y sostenibilidad.

Para ello, es esencial definir criterios de optimización claros y coherentes que orienten la búsqueda de soluciones adecuadas. Estos criterios no solo deben responder a los requerimientos normativos y a las condiciones de carga específicas del proyecto, sino también incorporar aspectos como el comportamiento frente a condiciones extremas, el impacto ambiental, la durabilidad y la eficiencia global del sistema estructural.

En las secciones siguientes se describen en detalle los principales criterios de optimización considerados en este trabajo, así como su importancia y la forma en que son integrados en el proceso de diseño asistido por inteligencia artificial.

2.2.1. Minimización del peso estructural

El peso total de una estructura metálica es uno de los factores más críticos en su diseño, ya que impacta directamente en:

- Costos de materiales: El acero es un material costoso, por lo que reducir la cantidad necesaria disminuye significativamente el presupuesto.
- Costos de transporte y montaje: Una estructura más ligera es más fácil y económica de transportar y ensamblar en obra.
- Impacto ambiental: Menor uso de acero implica reducción en la extracción de materias primas, procesamiento y emisiones de carbono asociadas.

La minimización del peso se logra optimizando las dimensiones y secciones de los elementos estructurales, buscando que cumplan con los requisitos de resistencia y estabilidad sin sobredimensionamiento.

Para evaluar este criterio, se calcula el peso total sumando las masas de todos los componentes, considerando la densidad del acero y las dimensiones optimizadas (AISC, 2017). Es importante destacar que la minimización del peso no debe comprometer la seguridad ni el desempeño, por lo que se trata de un equilibrio entre eficiencia y robustez.

2.2.2. Seguridad estructural y cumplimiento normativo

La seguridad es el criterio fundamental en cualquier diseño estructural. La estructura debe garantizar la integridad y protección de las personas y bienes durante toda su vida útil, resistiendo adecuadamente las cargas y condiciones a las que estará sometida.

Este criterio implica:

- Cumplimiento de normativas: Se deben respetar las especificaciones de códigos técnicos como la NTC 5832 (2015), la NSR-10 (2010) y normas internacionales como el AISC (2017), que establecen límites máximos para esfuerzos, deformaciones, desplazamientos y factores de seguridad. En particular, la NSR-10 regula aspectos críticos relacionados con la resistencia sísmica, asegurando que las estructuras metálicas diseñadas para zonas con amenaza sísmica cumplan con requisitos específicos para garantizar su estabilidad y ductilidad durante eventos sísmicos.
- Evaluación de cargas: Se consideran cargas permanentes (peso propio, acabados), variables (uso, viento), accidentales (impactos, sismos) y combinaciones de estas según la normativa aplicable. La NSR-10 enfatiza la correcta combinación y magnificación de cargas sísmicas para evaluar el comportamiento estructural bajo condiciones extremas.
- Análisis estructural riguroso: Se verifica que cada elemento estructural soporte las cargas sin fallar por pandeo, fatiga, fractura u otros modos de falla, siguiendo los criterios y procedimientos definidos en las normativas mencionadas.

La seguridad se evalúa mediante el cálculo de factores de seguridad y el cumplimiento de límites permisibles. En la función objetivo, se pueden incorporar penalizaciones para diseños que no cumplan con estos requisitos, asegurando que solo soluciones seguras sean consideradas óptimas (NTC 5832, 2015; NSR-10, 2010; AISC, 2017).

2.2.3. *Minimización de costos*

El costo total de una estructura incluye no solo el precio del material, sino también: •
Fabricación: Procesos de corte, soldadura, mecanizado y tratamiento.

- Transporte: Movilización de elementos desde fábrica hasta obra.
- Montaje: Mano de obra y equipos necesarios para la instalación.
- Mantenimiento: Costos futuros para conservar la estructura en condiciones óptimas.

La optimización busca minimizar estos costos globales, lo que requiere un análisis integral que considere todas las etapas del ciclo de vida de la estructura. Por ejemplo, un diseño con perfiles más complejos puede reducir peso, pero incrementar costos de fabricación, por lo que se debe encontrar un balance adecuado.

En la práctica, se modela el costo como una función que suma los distintos componentes, ponderados según su impacto económico, y se utiliza como parte de la función objetivo para la optimización (AISC, 2017; Arora, 2019).

2.2.4. *Desempeño ante condiciones extremas*

Las estructuras metálicas deben ser capaces de resistir eventos extremos que, aunque poco frecuentes, pueden causar daños severos o colapsos. Entre estos eventos destacan:

- Sismos: Movimientos sísmicos generan cargas dinámicas que requieren diseños con capacidad de disipar energía y deformarse sin fallar.
- Vientos fuertes: Pueden inducir cargas horizontales significativas, especialmente en estructuras altas o expuestas.
- Impactos y cargas accidentales: Golpes o cargas inesperadas que deben ser consideradas para garantizar la integridad.

Este criterio se evalúa mediante análisis dinámicos y no lineales que simulan estas condiciones, verificando que la estructura mantenga su estabilidad y funcionalidad. La optimización busca maximizar la resiliencia, es decir, la capacidad de la estructura para recuperar su estado tras un evento extremo (NTC 5832, 2015).

2.2.5. Sostenibilidad y reducción de la huella ambiental

En la ingeniería moderna, la sostenibilidad es un criterio cada vez más relevante. La optimización debe considerar:

- Uso eficiente de materiales: Minimizar desperdicios y favorecer el reciclaje.
- Selección de materiales con menor impacto ambiental: Por ejemplo, aceros reciclados o procesos de fabricación más limpios.
- Reducción de emisiones de CO₂: Asociadas a la producción, transporte y montaje.

La IA facilita la integración de estos aspectos en la función objetivo, permitiendo diseñar estructuras que no solo sean eficientes y seguras, sino también responsables con el medio ambiente (Toolify, 2024).

2.2.6. Formulación matemática de la función objetivo y restricciones

Para que los algoritmos de IA puedan operar, los criterios anteriores se traducen en una función matemática que evalúa cada alternativa de diseño. Esta función puede ser:

- De un solo objetivo: Por ejemplo, minimizar peso o costo.
- Multiobjetivo: Balancear simultáneamente peso, costo, seguridad y sostenibilidad. Además, se establecen restricciones que limitan el espacio de soluciones, tales como:

- Límites en dimensiones mínimas y máximas.
- Cumplimiento de normas técnicas.
- Restricciones geométricas y funcionales.

La función objetivo y las restricciones se integran en el algoritmo de optimización, que busca soluciones factibles que maximicen o minimicen los objetivos definidos (Arora, 2019).

2.2.7. Resumen de criterios de optimización estructural considerados

Tabla 3. Resumen de criterios de optimización estructural considerados en el modelo.

Criterio	Descripción	Método de evaluación	Justifica
Peso estructural	Masa total de la estructura	Suma de secciones x densidad	Reducción de costos y cargas
Cumplimiento normativo	Seguridad y estabilidad	NSR10 / NTC5832 / AISC	Requisito legal y técnico
Costo	Materiales, transporte y montaje	Función de costos	Minimizar gasto total
Desempeño sísmico	Capacidad frente a sismos	Análisis dinámico	Seguridad frente a eventos extremos
Sostenibilidad	Huella de carbono y reciclaje	Factores ambientales ponderados	Alineación don diseños verdes

2.3. Procedimiento para la aplicación y evaluación

El enfoque metodológico es el núcleo de la investigación, ya que describe las fases, métodos e instrumentos aplicados en el uso de la inteligencia artificial para la optimización del diseño de estructuras metálicas.

A continuación, se describen en detalle las diferentes etapas que componen este proceso, desde la formulación del problema hasta la última validación de los resultados.

2.3.1. Definición del problema estructural

La primera etapa consiste en delimitar con precisión el problema a resolver, lo que incluye seleccionar el tipo de estructura, como lo son los pórticos, cerchas, marcos o combinaciones de

estos; determinar las cargas permanentes, variables, accidentales y sus combinaciones respetando las normativas para garantizar la seguridad estructural; se establecen las restricciones geométricas, funcionales y normativas para terminar con la definición de las variables que se buscan optimizar en el diseño.

Esta etapa es crucial para garantizar que los modelos y los algoritmos de inteligencia artificial trabajen con información precisa y relevante, evitando resultados erróneos. Además, el cumplimiento de la NSR-10 asegura que el diseño estructural considere adecuadamente la amenaza sísmica, integrando criterios de ductilidad, resistencia y estabilidad que son indispensables para la seguridad y durabilidad de las estructuras metálicas en zonas sísmicas (AISC, 2017; NSR-10, 2010).

2.3.2. Modelo computacional

Después de la definición del problema, se crea una representación digital de elementos finitos de la estructura, que muestra los límites del volumen, las asignaciones de propiedades del material, la carga y las condiciones de contorno, así como las definiciones y límites de los parámetros. Este modelo se desarrolla en un software dedicado, compatible con metodologías de inteligencia artificial, capaz de ser utilizado de manera automática en la simulación y evaluación estructural (Proexacademy, 2025).

2.3.3. Implementación y entrenamiento de algoritmos de IA

En esta fase se desarrollan y configuran los algoritmos seleccionados:

- Algoritmos genéticos: Se diseñan para crear poblaciones iniciales, implementar operadores genéticos y valorar soluciones basándose en el objetivo del diseño.
- Redes neuronales artificiales: Se entrenan con datos de simulaciones o situaciones reales para predecir eficazmente el desempeño estructural, reduciendo la necesidad de cálculos repetitivos.
- Aprendizaje por refuerzo: Se configura el agente para que interactúe con el entorno simulado, aprendiendo a tomar decisiones óptimas en función de las recompensas obtenidas.

El entrenamiento y ajuste de parámetros son fundamentales para garantizar la convergencia y calidad de los resultados (Haykin, 2009; Sutton & Barto, 2018).

2.3.4. Ejecución del proceso de optimización

La implementación del proceso de optimización inicia con la creación de un conjunto inicial de configuraciones estructurales, generado por algoritmos genéticos (Goldberg, 1989). Estas opciones son analizadas utilizando redes neuronales artificiales previamente entrenadas, lo que facilita la predicción del comportamiento estructural de manera muy eficaz y reduce considerablemente los tiempos de análisis (Haykin, 2009).

En cada ciclo, los algoritmos desarrollan las soluciones utilizando métodos de selección, recombinación y mutación, mientras que el aprendizaje por refuerzo modifica las estrategias de decisión basado en los resultados obtenidos. El proceso de optimización sigue hasta que se obtiene un criterio de convergencia previamente establecido, asegurando que las configuraciones logradas cumplen con los objetivos de seguridad, eficacia y sostenibilidad (Casado Bravo, 2022).

2.3.5. Evaluación y selección de soluciones optimas

Finalizada la etapa de optimización, se procede a la evaluación detallada de las configuraciones obtenidas. Este proceso implica verificar que las soluciones cumplan con los requisitos normativos de seguridad, estabilidad y desempeño estructural, conforme a las especificaciones establecidas en normativas como la NSR-10 (2010), la NTC 5832 (2015) y los estándares internacionales del AISC (2017).

Además del cumplimiento normativo, se analizan criterios de eficiencia estructural, uso de materiales, sostenibilidad ambiental y costos asociados. Las soluciones se comparan con los diseños tradicionales para evaluar los beneficios alcanzados en términos de reducción de peso, mejora del desempeño ante cargas extremas y optimización económica. Finalmente, se seleccionan aquellas configuraciones que logran un equilibrio óptimo entre todos los criterios, garantizando su viabilidad técnica y su aplicabilidad práctica en el contexto de la ingeniería estructural actual (Arora, 2019).

2.3.6. Validación y ajustes finales

La última fase de la metodología busca garantizar la calidad, seguridad y robustez de los diseños optimizados. Para ello, los resultados de las soluciones obtenidas se someten a un análisis detallado por expertos estructurales, donde se evalúan en términos de coherencia técnica, viabilidad constructiva y cumplimiento con las directrices establecidas por normas como la NSR-10 (2010), la NTC 5832 (2015) y la AISC-C (2017).

Además, se han realizado simulaciones compatibles y estudios de sensibilidad para confirmar la prioridad de la configuración frente a desviaciones de las condiciones reales. Cuando es necesario, se ajustan los criterios de optimización y restricciones para optimizar los resultados (Goldberg, 1989; Casado Bravo, 2022). La rutina iterativa garantiza que las soluciones finales sean técnica y normativamente sólidas y estén listas para su aplicación práctica en la práctica de la ingeniería estructural.

2.3.7. Incorporación de herramientas avanzadas y automatización

Finalmente, se integran tecnologías complementarias para potenciar el proceso con plataformas en la nube que, facilitan el acceso a la información y la colaboración remota, los asistentes inteligentes porque automatizan tareas repetitivas, consultas normativas y generan reportes; y los sistemas de gestión de datos ya que permiten organizar y almacenar la información para futuros análisis. Estas herramientas contribuyen a mejorar la eficiencia, precisión y sostenibilidad del proceso de diseño estructural asistido por IA (Biblus , 2025).

Capítulo 3. Análisis y resultados

La optimización estructural es un área fundamental en la ingeniería civil y estructural, enfocada en crear estructuras que satisfagan requerimientos de seguridad, funcionalidad y economía, reduciendo al mínimo el uso de materiales y gastos. En los años recientes, la combinación de algoritmos computacionales basados en la naturaleza y métodos de inteligencia artificial (IA) ha transformado este ámbito, posibilitando la solución de problemas intrincados con diversas variables y limitaciones al mismo tiempo.

Este capítulo ofrece ejemplos de estudios reales que ilustran cómo se aplican estas metodologías en estructuras metálicas, abarcando desde problemas simples hasta sistemas complejos, resaltando tanto las ventajas como los desafíos de su puesta en práctica.

3.1. Casos de estudio o ejemplos prácticos

3.1.1. Caso de estudio 1: Optimización de un voladizo mediante algoritmos inspirados en la naturaleza

Un ejemplo destacado en el uso de métodos de inteligencia artificial en el diseño estructural es la mejora de un voladizo a través de algoritmos basados en principios de la naturaleza. En esta situación, Casado Bravo (2022) estudió la aplicación de tres algoritmos bioinspirados: el Algoritmo Genético (GA), el Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO) y el Algoritmo de

Búsqueda Gravitacional (GSA), utilizados en el rediseño de la sección transversal de un voladizo, considerando limitaciones en la deformación.

El propósito fue reducir el peso de la estructura sin poner en peligro la seguridad ni la firmeza del sistema. El proceso de mejora se realizó en un entorno de diseño y análisis paramétrico, donde cada algoritmo generaba y evaluaba diferentes configuraciones, ajustando gradualmente los parámetros estructurales para cumplir con los requisitos normativos y funcionales.

Los resultados indicaron que todos los algoritmos lograron disminuir el peso de la estructura de forma notable, siendo el PSO el que más se destacó por su rápida convergencia y menor necesidad de recursos computacionales. Este caso demuestra la capacidad de los algoritmos basados en la naturaleza para abordar problemas estructurales que son relativamente simples de manera efectiva, lo que permite el avance de soluciones mejoradas en las etapas iniciales del diseño (Casado Bravo, 2022).

3.1.2. Caso de estudio 2: Optimización seccional y geométrica de una cubierta laminar de acero y vidrio

En un contexto más complejo, Casado Bravo (2022) trabajó en la optimización de la estructura de soporte de un techo laminado de acero y vidrio. En este ejemplo, el protocolo de optimización no solo tuvo en cuenta los tamaños óptimos de los miembros estructurales, sino también la geometría completa de todo el techo (forma del techo) bajo un conjunto más general de restricciones, combinando restricciones limitadas de deformación y estrés.

La metodología utilizada incorporó herramientas paramétricas avanzadas, tal como Grasshopper para la modelación geométrica y Karamba para el análisis estructural, junto con algoritmos bioinspirados (GA, PSO y GSA), que investigaron diversas configuraciones posibles. El propósito era identificar un diseño estructural que alcanzara un balance ideal entre un peso mínimo, una eficiencia estructural adecuada y el cumplimiento de las regulaciones.

Se demostró que la optimización combinada de la sección y la forma, y el apoyo del proceso de diseño mediante algoritmos evolutivos, condujeron a una disminución considerable de la masa estructural y a una distribución de tensiones más ventajosa, ajustada para soportar cargas combinadas. Este caso presenta una demostración exitosa de la aplicabilidad de un algoritmo de biomimetismo en el desarrollo de un diseño de estructura metálica intrincada con patrones, donde los procesos típicos de optimización de diseño no serían factibles (Casado Bravo, 2022).

3.1.3. Caso de estudio 3: Optimización de forma y geometría en la estructura de soporte de un estadio

El tercer estudio de caso en Casado Bravo (2022) abordó la optimización de la forma y geometría de la estructura de soporte de un techo laminar en un estadio, como un problema estructural con alta dimensionalidad, gran número de variables mutuamente dependientes y múltiples restricciones. En el estudio se utilizaron Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) y Algoritmos Genéticos (GA), desarrollados en una rutina de diseño paramétrico que permitiría la formación y evaluación de formas estructurales complejas. Los objetivos eran optimizar

simultáneamente la geometría global y las secciones estructurales para minimizar el peso estructural, mejorar el rendimiento dinámico y satisfacer las restricciones normativas y de rendimiento.

Los resultados indicaron que el enfoque basado en la optimización resultó en diseños novedosos que eran más ligeros y tenían una concentración de estrés óptima, lo cual era difícil de interpretar por los enfoques clásicos. Además, el proceso PSO fue notable por su rápida convergencia y su capacidad para buscar soluciones más allá del espacio de diseño regular.

Este caso evidencia cómo el uso de algoritmos inspirados en la naturaleza permite abordar con eficacia problemas de diseño estructural altamente complejos, potenciando la creatividad del ingeniero y optimizando simultáneamente los criterios estructurales y geométricos (Casado Bravo, 2022).

3.1.4. Caso de estudio 4: Optimización paramétrica de estructuras de acero en entorno BIM

En el trabajo de Cisneros (2020), se implementan algoritmos de optimización evolutiva en Modelos de Información de Construcción (BIM) para optimizar el diseño paramétrico de estructuras de acero. En este estudio, se adoptaron algoritmos genéticos (GA) para optimizar parámetros clave de diseño arquitectónico, incluyendo el tamaño de la sección del perfil, el tipo de conexión y la disposición de los elementos a través de BIM.

La optimización permitió derivar soluciones que optimizaron criterios estructurales, costos y tiempos de fabricación al mismo tiempo que garantizaban la trazabilidad de los datos y la conexión con otras disciplinas. Los algoritmos incorporados dentro del software BIM permitieron la

detección temprana de conflictos y realizar más análisis sobre la estructura del edificio en las fases iniciales del proyecto.

Este caso de uso demuestra claramente cómo las tecnologías de inteligencia artificial podrían ser utilizadas de manera novedosa, dentro y a través de los campos del diseño estructural y la ingeniería civil en general, para mejorar la eficiencia del proceso, la coordinación y la sostenibilidad (Cisneros, 2020).

3.1.5. Caso de estudio 5: Hibridación de algoritmos genéticos con métodos clásicos para la optimización topológica

El estudio realizado por Arora (2019) aborda la hibridación de algoritmos genéticos (GA) con métodos clásicos de optimización topológica para mejorar el diseño de estructuras metálicas. El enfoque consistió en combinar la capacidad exploratoria de los GA con la rigurosidad de los métodos deterministas, como el método de densidad de material (SIMP), para generar configuraciones estructurales innovadoras.

Aplicado a modelos de vigas y pórticos de acero, este enfoque híbrido permitió optimizar simultáneamente la topología, la distribución del material y las secciones transversales, obteniendo diseños más ligeros y con una mejor respuesta estructural. Los resultados mostraron que la combinación de técnicas evolutivas y métodos clásicos supera las limitaciones de cada enfoque por separado, mejorando la eficiencia y la calidad de las soluciones generadas (Arora, 2019).

Este caso destaca la importancia de los enfoques híbridos en la ingeniería estructural actual, permitiendo aprovechar las fortalezas de diversas metodologías para lograr diseños más eficientes, robustos y adaptados a los requerimientos del proyecto.

Desde una perspectiva crítica, la selección de algoritmos genéticos, redes neuronales artificiales y enfoques híbridos responde a la necesidad de abordar problemas de optimización con múltiples variables, restricciones no lineales y objetivos conflictivos, donde los métodos tradicionales resultan insuficientes o ineficientes. Los algoritmos genéticos destacan por su capacidad de explorar grandes espacios de soluciones y evitar óptimos locales, mientras que las redes neuronales artificiales sobresalen en el modelado y la predicción de comportamientos estructurales complejos a partir de grandes volúmenes de datos. La combinación de estas técnicas, junto con algoritmos basados en reglas, permite aprovechar la exploración global, la capacidad de aprendizaje y la incorporación de conocimiento experto, generando soluciones más adaptables.

La elección de estos métodos se justifica por su eficacia comprobada en estudios recientes, donde han logrado reducir tiempos de cálculo, mejorar la precisión de los resultados y facilitar la adaptación a nuevas condiciones de diseño. Por ejemplo, el OGA de Rastegaran et al. (2022) demostró una reducción significativa en el costo computacional respecto a métodos clásicos, mientras que las redes neuronales han permitido predecir el comportamiento sísmico de estructuras con alta fiabilidad (Negrin y otros, 2019).

A partir de los casos de estudio revisados, se puede establecer una comparación entre los diferentes algoritmos y técnicas aplicadas en el diseño estructural. En la Tabla 3 se resumen los

aspectos clave de cada caso, destacando el tipo de estructura, el enfoque metodológico utilizado y los principales resultados obtenidos.

Tabla 4. Comparación de casos de estudio de optimización estructural con IA

Caso	Tipo de estructura	Algoritmo / técnica	Resultados clave	Referencias
1	Viga en voladizo	AG, PSO y GSA	Reducción de peso, PSO con mayor rapidez de convergencia	(Casado Bravo, 2022)
2	Cubierta laminar de acero y vidrio	AG, PSO, GSA + Grasshopper/Karamba	Reducción de peso y mejora la distribución de esfuerzos	(Casado Bravo, 2022)
3	Cubierta de estadio	PSO y AG	Formas innovadoras, estructura más ligera y eficiente	(Casado Bravo, 2022)
4	Viga, viga armada y celosía metálica	AG + entorno BIM	Cumplimiento normativo, diseño más rápido y eficiente	(Cisneros, 2020)
5	Pórtico plano de hormigón	AG + Nelder-Mead (hibridación)	Convergencia mas rápida, soluciones de mayor calidad	(Negrin y otros, 2019)
5	Marco de acero en diseño sísmico	OGA (Algoritmo Genético Orientado)	Reducción de costo computacional y menor número de evaluaciones	(Rastagaran y otros, 2021)

3.2. Comparación con los métodos tradicionales

La optimización estructural mediante algoritmos inspirados en la naturaleza (NIA) y técnicas computacionales avanzadas presenta claras ventajas frente a los métodos tradicionales de diseño estructural, que generalmente se basan en procedimientos iterativos manuales o semiautomatizados, apoyados en normas y tablas preestablecidas. A continuación, se profundiza

en esta comparación, apoyándose en los casos de estudio y análisis presentes en la literatura reciente.

3.2.1. Limitaciones de los métodos tradicionales

Los métodos tradicionales de diseño y optimización de estructuras metálicas suelen apoyarse en:

- Diseño basado en experiencia y reglas empíricas: Los ingenieros utilizan normas de diseño (como el Eurocódigo 3) y tablas de perfiles comerciales para seleccionar secciones estructurales, con ajustes iterativos para cumplir con requisitos de resistencia y deformación.
- Análisis secuencial y manual: El proceso de diseño es frecuentemente lineal y secuencial, donde cada cambio requiere un nuevo análisis estructural, lo que incrementa el tiempo y la carga de trabajo.
- Exploración limitada del espacio de diseño: La búsqueda de soluciones óptimas está restringida a configuraciones conocidas o intuitivas, lo que puede llevar a diseños subóptimos en términos de peso, costo o desempeño.
- Dificultad para manejar múltiples variables y restricciones simultáneamente: Los métodos tradicionales no siempre permiten integrar fácilmente restricciones complejas o múltiples objetivos, como minimizar peso mientras se controla la deformación y la tensión.

Estas limitaciones pueden traducirse en diseños menos eficientes, mayor consumo de materiales y tiempos prolongados de desarrollo.

3.2.2. Ventajas de los algoritmos inspirados en la naturaleza y optimización computacional

Según Casado Bravo (2022), la aplicación de algoritmos bioinspirados como el Algoritmo Genético (GA), Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO) y Algoritmo de Búsqueda Gravitacional (GSA) en el diseño paramétrico y análisis estructural permite superar muchas de las limitaciones mencionadas.

- Automatización y rapidez: Los algoritmos exploran simultáneamente múltiples variables y configuraciones, reduciendo el tiempo necesario para encontrar soluciones óptimas o cercanas a óptimas.
- Capacidad para problemas complejos: Pueden manejar problemas con gran cantidad de variables y restricciones no lineales, como deformaciones máximas, tensiones, estabilidad y criterios geométricos.
- Exploración amplia del espacio de diseño: Los algoritmos bioinspirados pueden descubrir soluciones innovadoras y no intuitivas, optimizando el uso de materiales y mejorando la eficiencia estructural.
- Integración con herramientas paramétricas y BIM: Permiten trabajar en entornos digitales avanzados, facilitando la iteración rápida y la visualización de resultados en modelos 3D (Casado Bravo, 2022; Cisneros, 2020).

3.2.3. Evidencias en casos de estudio

En los tres casos de estudio de Casado Bravo (2022), se observó que los algoritmos bioinspirados lograron optimizar estructuras metálicas con un desempeño superior al diseño tradicional:

- En el caso del voladizo, el PSO alcanzó soluciones óptimas en pocas iteraciones, reduciendo significativamente el peso sin exceder las deformaciones permitidas.
- Para la cubierta laminar pequeña, la optimización seccional y geométrica permitió una reducción considerable del peso y una mejor distribución de esfuerzos, algo difícil de lograr con métodos manuales.
- En la estructura del estadio, la optimización de forma y geometría generó diseños innovadores y eficientes, que no habrían sido evidentes con el diseño tradicional (Casado Bravo, 2022).

Asimismo, Cisneros (2020) demostró que la combinación de diseño paramétrico con algoritmos genéticos en un entorno BIM permite obtener estructuras de acero que cumplen rigurosamente con el Eurocódigo 3, optimizando el uso del material y reduciendo costos, lo que es más laborioso y menos preciso con métodos convencionales.

3.2.4. Consideraciones económicas y sostenibles

La optimización computacional no solo mejora el desempeño estructural, sino que también contribuye a:

- Reducción de costos: Al minimizar el peso de la estructura, se reduce el consumo de acero y otros materiales, disminuyendo los costos de fabricación y transporte.

- Impacto ambiental: Menor uso de materiales implica menor extracción de recursos y menor huella de carbono, alineándose con criterios de sostenibilidad.
- Eficiencia en tiempos de diseño: La automatización acelera el proceso, permitiendo responder con mayor agilidad a cambios en requisitos o condiciones del proyecto (Casado Bravo, 2022; Cisneros, 2020).

3.2.5. Limitaciones y desafíos de la optimización computacional

Aunque la optimización mediante algoritmos bioinspirados presenta claras ventajas, también enfrenta retos:

- Validación y confianza: Es necesario validar los resultados con análisis detallados y pruebas experimentales para garantizar la seguridad.
- Complejidad computacional: Problemas muy grandes o con muchas variables pueden requerir recursos computacionales significativos.
- Curva de aprendizaje: Requiere formación especializada para implementar y entender los algoritmos y su integración en entornos paramétricos y BIM.
- Transparencia: La naturaleza heurística de los algoritmos puede dificultar la interpretación del proceso de decisión, lo que exige un control riguroso (Casado Bravo, 2022).

3.3. Discusión de resultados y ventajas de la IA en la optimización

Los casos de estudio y la literatura revisada evidencian que la inteligencia artificial (IA) aporta beneficios significativos a la optimización estructural, transformando la manera en que se diseñan, analizan y gestionan las estructuras metálicas. Entre las principales ventajas destacan la capacidad para explorar grandes espacios de diseño, acelerar la convergencia hacia soluciones óptimas, y mejorar la eficiencia en términos de costos, peso y desempeño estructural (Biblus , 2025; DigitalBricks, 2025; Rios, 2025).

3.3.1. *Ventajas principales de la IA en optimización estructural*

- Mejora de la eficiencia y reducción de tiempos: Algoritmos como los genéticos, enjambres de partículas y métodos híbridos permiten realizar evaluaciones rápidas y precisas, reduciendo considerablemente el tiempo de diseño y análisis en comparación con métodos tradicionales (Maldonado, 2025). Esta eficiencia se traduce en procesos más ágiles y en la posibilidad de explorar múltiples alternativas de diseño en menor tiempo.
- Optimización multidimensional y manejo de incertidumbre: La IA puede manejar múltiples variables y restricciones simultáneamente, incluyendo aspectos geométricos, materiales y normativos. Además, permite abordar problemas asociados a la incertidumbre en cargas y propiedades de materiales, facilitando diseños más resilientes y adaptados a condiciones reales (Pizarro, 2021).

- Integración con tecnologías digitales: La combinación de IA con entornos BIM y sistemas IoT facilita la recopilación y análisis de datos en tiempo real, mejorando la planificación, ejecución y mantenimiento de proyectos (DigitalBricks, 2025). Esto favorece la detección temprana de riesgos, la optimización de recursos humanos y materiales, y la automatización de tareas repetitivas, liberando tiempo para actividades creativas y estratégicas (Rios, 2025; Maldonado, 2025)
- Mejora en la sostenibilidad y reducción de costos: La IA permite minimizar el desperdicio de materiales y optimizar el uso de recursos, contribuyendo a estructuras más ligeras y sostenibles sin comprometer la seguridad (Rios, 2025). Esto es especialmente relevante en contextos donde la eficiencia económica y ambiental son prioridades.

3.3.2. Limitaciones y desafíos

No obstante, la aplicación práctica de la IA en la optimización estructural enfrenta desafíos importantes. La mayoría de los estudios se realizan en modelos simplificados o de pequeña escala, lo que limita la extrapolación a proyectos complejos y reales. Además, la necesidad de grandes volúmenes de datos confiables para entrenar los modelos, la dependencia de la calidad de la información y la capacitación especializada del personal son barreras a superar (Toolify, 2024)

El aumento de la dimensionalidad y complejidad del problema puede incrementar exponencialmente los recursos computacionales requeridos, afectando la velocidad y viabilidad de la optimización en estructuras grandes o con múltiples restricciones (Maldonado, 2025).

3.3.3. Perspectivas y aplicación en Colombia

En el contexto colombiano, la IA tiene un gran potencial para revolucionar el diseño estructural, especialmente en zonas con alta amenaza sísmica, donde la normativa NSR-10 exige criterios estrictos de seguridad y ductilidad. La incorporación de IA puede facilitar el cumplimiento normativo, mejorar la precisión en el cálculo de cargas y desplazamientos, y optimizar el uso de materiales (NSR-10, 2010; NTC 5832, 2015)

Sin embargo, la adopción masiva requiere inversión en infraestructura digital, capacitación técnica y generación de bases de datos locales confiables. La colaboración entre academia, industria y entidades regulatorias será clave para desarrollar proyectos piloto que validen los beneficios y adapten las tecnologías a las condiciones locales (DigitalBricks, 2025; Pizarro, 2021).

En conclusión, la inteligencia artificial se presenta como una herramienta transformadora en la optimización estructural, capaz de superar las limitaciones de los métodos tradicionales mediante su capacidad para manejar problemas complejos, multidimensionales y con múltiples restricciones. Sus ventajas en términos de eficiencia, precisión, sostenibilidad y reducción de costos son evidentes en los casos de estudio y la literatura especializada. Sin embargo, para que estas tecnologías alcancen su máximo potencial en la práctica profesional, es fundamental abordar los desafíos asociados a la calidad de los datos, la capacitación técnica y la infraestructura digital.

En el contexto colombiano, la integración de la IA en el diseño estructural no solo facilitará el cumplimiento riguroso de normativas como la NSR-10, sino que también impulsará la innovación y la competitividad del sector de la construcción. La colaboración estrecha entre academia,

industria y entidades regulatorias será clave para desarrollar soluciones adaptadas a las condiciones locales y validar su eficacia en proyectos reales. De esta manera, la adopción de la inteligencia artificial contribuirá significativamente a la construcción de estructuras metálicas más seguras, eficientes y sostenibles, alineadas con las exigencias actuales y futuras del mercado y la sociedad.

Capítulo 4. Conclusiones

El anterior escrito demuestra que la aplicación de técnicas de inteligencia artificial en el diseño y optimización de estructuras metálicas representa un avance significativo en el campo de la ingeniería civil, descifrando los paradigmas tradicionales del diseño estructural permitiendo de esta manera abrir nuevas posibilidades para el desarrollo de infraestructuras mas eficientes, sostenibles y adaptables a las nuevas demandas contemporáneas de la construcción.

4.1. Hallazgos principales y relevancia del estudio

El presente estudio permitió identificar y consolidar diversas aportaciones significativas en el campo de la optimización del diseño de estructuras metálicas mediante técnicas de inteligencia artificial. Los resultados obtenidos, a partir de la revisión de literatura especializada y de la simulación de casos básicos, evidencian que los algoritmos genéticos, las redes neuronales artificiales y el aprendizaje por refuerzo constituyen herramientas altamente efectivas para abordar problemas de diseño estructural con múltiples variables y restricciones.

Entre los hallazgos más relevantes se destaca la capacidad de estos algoritmos para optimizar el uso de materiales, reducir el peso estructural, minimizar los costos asociados y mejorar la eficiencia en los procesos de diseño. Asimismo, se constató que la integración de estas técnicas permite acelerar significativamente los tiempos de cálculo y facilita la exploración de soluciones innovadoras que, en muchos casos, superan los enfoques tradicionales tanto en rendimiento como en sostenibilidad.

El estudio también resalta la relevancia creciente de la inteligencia artificial como complemento a los métodos convencionales en la ingeniería estructural, abriendo nuevas posibilidades para el diseño de estructuras más seguras, resilientes y adaptadas a las exigencias actuales de eficiencia energética y sostenibilidad ambiental. Estos hallazgos refuerzan la pertinencia de continuar investigando e implementando técnicas de inteligencia artificial en la práctica profesional de la ingeniería civil.

4.2. Relación entre casos de estudio y objetivos planteados

Los casos de estudio analizados en el presente trabajo han permitido establecer una relación directa con los objetivos planteados en la monografía. El propósito central, orientado a evaluar el potencial de las técnicas de inteligencia artificial para optimizar el diseño de estructuras metálicas, se ve ampliamente respaldado por los resultados observados en los ejemplos prácticos revisados.

Los casos presentados (voladizos optimizados, cubiertas laminares, estructuras de soporte para estadios, entre otros) evidencian que la aplicación de algoritmos genéticos, redes neuronales artificiales y aprendizaje por refuerzo conduce a soluciones estructurales más eficientes, ligeras y sostenibles. Dichos resultados están alineados con los objetivos específicos del estudio, que contemplaban la reducción de peso estructural, la optimización del uso de materiales, la mejora del desempeño frente a cargas extremas y la integración de criterios de sostenibilidad en el proceso de diseño.

Adicionalmente, la capacidad demostrada por estas técnicas para acelerar los tiempos de desarrollo y permitir una exploración más amplia del espacio de soluciones contribuye de manera

significativa al logro del objetivo de impulsar metodologías de diseño más innovadoras y tecnológicamente avanzadas en el ámbito de la ingeniería estructural.

En conclusión, los casos de estudio analizados confirman la pertinencia y el cumplimiento de los objetivos planteados, validando el enfoque teórico propuesto y destacando el valor añadido que aporta la inteligencia artificial en la optimización del diseño de estructuras metálicas.

4.3. Limitaciones del estudio y consideraciones metodológicas

Si bien los hallazgos obtenidos en este estudio aportan una visión valiosa sobre la aplicación de técnicas de inteligencia artificial en la optimización de estructuras metálicas, es importante reconocer ciertas limitaciones que condicionan el alcance de los resultados presentados.

En primer lugar, la naturaleza teórica de la investigación, basada principalmente en la revisión de literatura especializada y en la simulación de casos básicos, no contempla una validación experimental a gran escala ni la implementación directa en proyectos de ingeniería estructural reales. Por lo tanto, los resultados deben considerarse como una referencia conceptual que requiere de estudios complementarios y aplicaciones prácticas para su completa validación.

Asimismo, el enfoque metodológico adoptado privilegió el análisis de técnicas específicas (algoritmos genéticos, redes neuronales artificiales y aprendizaje por refuerzo), lo que deja fuera otras herramientas emergentes dentro del campo de la inteligencia artificial que podrían enriquecer el proceso de optimización, tales como las redes neuronales profundas, los modelos de aprendizaje por transferencia o las técnicas de optimización multiobjetivo más avanzadas.

Por otro lado, la calidad y representatividad de los resultados dependen en gran medida de la disponibilidad de datos adecuados para el entrenamiento de las redes neuronales y de los parámetros utilizados en la configuración de los algoritmos evolutivos, lo cual podría limitar su aplicabilidad en contextos con datos insuficientes o de baja calidad.

Finalmente, cabe señalar que la adopción de estas metodologías en la práctica profesional requiere superar barreras relacionadas con la formación técnica del personal, la disponibilidad de recursos computacionales y la aceptación normativa en los entornos de diseño estructural.

Estas consideraciones metodológicas refuerzan la necesidad de continuar desarrollando investigaciones aplicadas y estudios de caso en contextos reales, que permitan validar, complementar y consolidar el marco teórico propuesto en esta monografía.

4.4. Contribución al conocimiento y perspectivas futuras

El desarrollo de este estudio aporta una contribución significativa al conocimiento en el ámbito de la ingeniería estructural, al ofrecer un marco teórico actualizado sobre la aplicación de técnicas de inteligencia artificial en la optimización del diseño de estructuras metálicas. Al sistematizar los principales enfoques, algoritmos y casos de éxito documentados en la literatura, la presente monografía proporciona una referencia útil tanto para la comunidad académica como para los profesionales del sector.

Entre los aportes más relevantes se destaca la integración conceptual de algoritmos genéticos, redes neuronales artificiales y aprendizaje por refuerzo en un enfoque metodológico coherente y aplicable, que facilita la comprensión de su potencial y sus limitaciones en el contexto

del diseño estructural. Además, el análisis crítico de los casos de estudio permite identificar tendencias emergentes, buenas prácticas y oportunidades de mejora en la aplicación de estas tecnologías.

Desde una perspectiva futura, se abre un campo amplio de investigación orientado a profundizar en la validación experimental de las soluciones optimizadas, a explorar la integración de técnicas híbridas más avanzadas (por ejemplo, aprendizaje profundo y modelos generativos) y a fomentar la adopción de inteligencia artificial en plataformas BIM y sistemas de diseño colaborativo. Asimismo, será fundamental promover el desarrollo de normativas y estándares técnicos que regulen y orienten el uso de estas herramientas en la práctica profesional.

En conclusión, este estudio sienta una base sólida para futuras investigaciones, contribuyendo a la consolidación de metodologías de diseño más inteligentes, eficientes y sostenibles en la ingeniería estructural contemporánea

4.5. Reflexiones finales

La aplicación de técnicas de inteligencia artificial en el diseño y optimización de estructuras metálicas constituye, sin duda, un avance relevante en el campo de la ingeniería estructural. Los resultados de este estudio confirman que herramientas como los algoritmos genéticos, las redes neuronales artificiales y el aprendizaje por refuerzo poseen un enorme potencial para transformar los procesos tradicionales de diseño, permitiendo soluciones más eficientes, sostenibles y adaptadas a los crecientes desafíos de la construcción moderna.

Sin embargo, para que estas tecnologías alcancen una adopción plena en la práctica profesional, será necesario superar ciertos retos asociados a su integración en los entornos normativos y a la capacitación de los profesionales del sector. Además, el fortalecimiento de la investigación aplicada y la validación en escenarios reales serán aspectos clave para consolidar la confianza en estas metodologías.

En definitiva, el camino hacia una ingeniería estructural más inteligente y automatizada está en plena evolución. La convergencia entre la inteligencia artificial, los sistemas de modelado paramétrico y las plataformas digitales ofrece una oportunidad única para redefinir los estándares del diseño estructural, promoviendo edificaciones más seguras, sostenibles y alineadas con las demandas de las sociedades contemporáneas.

Referencias Bibliográficas

AISC. (2017). *Steel Construction Manual* (16th ed.). American Institute of Steel Construction .

Arora, J. S. (2019). *Introduction to Optimum Design* (Cuarta ed.). Academic Press.

Biblus . (25 de Febrero de 2025). *El impacto transformativo de la Inteligencia Artificial en el análisis estructural*. Biblus ACCA Software:
<https://biblus.accasoftware.com/es/inteligencia-artificial-analisis-estructural/>

Casado Bravo, F. (2022). *OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL MEDIANTE ALGORITMOS*. Universidad Politécnica de Madrid.

Cisneros, M. A. (2020). *Optimización de estructuras de acero utilizando diseño paramétrico y algoritmos genéticos en un entorno BIM*. Universitat Politècnica de Catalunya.

DCCIA. (10 de Junio de 2025). *Algoritmos Geneticos* . Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial - Universidad de Sevilla:
https://www.cs.us.es/~fsancho/Blog/posts/Algoritmos_Geneticos.md

DigitalBricks. (19 de Febrero de 2025). *Inteligencia artificial en construcción: definición, beneficios y soluciones*. Digital Bricks: <https://digitalbricks.com.pe/inteligencia-artificial-en-construccion/>

Dye construcciones. (18 de Marzo de 2023). *¿Cuál norma rige la construcción de las estructuras metálicas en Colombia?* D&E Construcciones y Diseños S.A.S:
<https://dyeconstrucciones.com.co/norma-estructuras-metalicas-colombia/>

EEG . (18 de Agosto de 2023). *Todo lo que necesita saber acerca del análisis estructural*. Eastern Engineering Group: <https://www.easternengineeringgroup.com/es/todo-lo-que-necesita-saber-acerca-del-analisis-estructural/>

ESSS. (15 de Diciembre de 2023). *Métodos y técnicas para la optimización estructural de proyectos*. Engineering Simulation And Scientific Software: <https://www.esss.com/es/blog/metodos-y-tecnicas-para-la-optimizacion-estructural-de-proyectos/>

EVI SAS. (28 de Febrero de 2025). *Normas para Montaje de Estructuras MEtálicas, como Implementarlas*. Estructuras verticales e Ingenieros SAS: <https://www.estructurasverticales.com/blog/normas-montaje-estructuras-metalicas>

Formlabs. (s.f.). *Nociones básicas de optimización topológica: Cómo usar modelos algorítmicos para crear un diseño ligero*. Formlabs: <https://formlabs.com/latam/blog/optimizacion-topologica/>

Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley.

Havit Steel. (25 de Septiembre de 2023). *Principios De Diseño De Estructuras De Acero*. Havit Steel Structure: <https://havitsteelstructure.com/es/disenio-de-estructura-de-acero/>

Haykin, S. (2009). *Neural Networks and Learning Machines*. Person.

Ingetecho. (12 de Agosto de 2024). *Estructuras Metálicas livianas y pesadas NSR-10*. Estructura Metálica NSR10 - Usos y Ventajas: <https://www.ingetecho.com/estructura-metalica/>

- Initube. (Julio de 2023). *Cómo ahorrar tiempo y recursos en la producción de estructuras metálicas*. Initube specialist in 3D tubes & profiles cutting: https://initube.es/wp-content/uploads/2023/07/Guia-de-optimizacion-de-procesos-en-la-fabricacion-de-estructuras-metalicas_compressed.pdf
- Kepler, H. (30 de Septiembre de 2024). *La Integración de Inteligencia Artificial y Machine Learning en la Optimización y Automatización del Diseño Estructural de un Edificio de 5 pisos*. <https://es.linkedin.com/pulse/la-integración-de-inteligencia-artificial-y-machine-5-kepler-dwyte>
- Maldonado, L. (25 de Marzo de 2025). *Impacto de la Automatización en el Diseño Estructural: El Futuro de la Ingeniería*. Inesa-Tech: <https://www.inesa-tech.com/blog/automatizacion-ingenieria-estuctural/>
- Mares Carreño, J., Abarca Jiménez, G., & Becerra Montero, R. (2021). *La optimización estructural y sus aplicaciones*. (IPN-UPIIH).
- Negrin, I. A., Negrin, A., & Chagoyén, E. L. (2019). Optimización de pórticos planos de hormigón armado utilizando una hibridación de algoritmos genéticos y el algoritmo Nelder-Mead. *Obras y Proyectos Revista de Ingeniería Civil* , 26, 74-86. <https://doi.org/https://www.scielo.cl/pdf/oyp/n26/0718-2813-oyp-26-0074.pdf>
- NSR-10. (2010). Título F. En V. y. Ministerio de Ambiente, *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Asociacion Colombiana de Ingeniería Sismica.
- NTC 5832. (2015). *Prácticas normalizadas para la fabricación y montaje de estructuras en acero*. Icontec International.

- PEB Steel. (2 de Febrero de 2025). *Diseño de estructuras de acero: principios, procesos, métodos y más*. STEEL PEB: <https://peb.steelprogroup.com/es/estructura-de-acero/diseno/design-principles/>
- Pino, J., Villavicencio, E., & Gallegos, C. (2022). Fundamentos del diseño en acero estructural. *Mawil*, 104. <https://doi.org/10.26820/978-9942-602-24-4>
- Pizarro, P. (30 de Marzo de 2021). *Inteligencia Artificial en el diseño estructural, avances en su desarrollo y futuras aplicaciones*. Universidad de Chile: <https://ingcivil.uchile.cl/noticias/174023/inteligencia-artificial-en-el-diseno-estructural>
- Proexacademy. (1 de Febrero de 2025). *La Inteligencia Artificial en el Diseño Estructural*. <https://www.proexacademy.com/blog/inteligencia-artificial-en-diseno-estructural>
- Rastagaran, M., Beheshti Aval, S. B., Noroozinejad Farsangi, E., & Faryabi, I. (2021). Proposing a Novel Oriented Genetic Algorithm for Optimum Seismic Design of Steel Moment Resisting Frames. *Arabian Journal for Science and Engineering*(4), 5003-5015. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06338-4>
- Rios, S. (13 de Mayo de 2025). *Blog Coomeva*. Cómo la inteligencia artificial está revolucionando el diseño estructural: <https://blog.coomewa.com.co/post/ia-en-diseno-estructural-innovacion-y-eficiencia-en-la-ingenieria-moderna/3657>
- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). *Reinforcement Learning: An Introduction* (Segunda ed.). MIT Press.
- Taesmet. (1 de Enero de 2024). *Diseño de estructuras metálicas*. <https://www.taesmet.com/blog/112-diseno-de-estructuras-metalicas>

Toolify. (3 de Marzo de 2024). *Diseño estructural con IA: optimización y eficacia.*

<https://www.toolify.ai/es/ai-news-es/diseo-estructural-con-ia-optimizacin-y-eficacia-2190402>

Toolify. (02 de Marzo de 2024). *Las mejores herramientas de IA para diseño y ingeniería*

estructural (AEC). <https://www.toolify.ai/es/ai-news-es/las-mejores-herramientas-de-ia-para-diseo-y-ingeniera-estructural-aec-1991526>