

THE CONTRIBUTION OF GENERATIVE DESIGN TO EFFICIENCY IN STRUCTURAL ENGINEERING: A CASE STUDY

CONTRIBUCIÓN DEL DISEÑO GENERATIVO A LA EFICIENCIA EN LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL: UN ESTUDIO DE CASOS

Gino Giuseppe, Pannillo Majano¹; Juan Carlos, Vielma Pérez²

Recibido 29/11/2024; Aprobado: 13/04/2025

DOI: <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica271.2>

ABSTRACT

Generative design is a design approach that uses algorithms and computational techniques to generate and optimize shapes and patterns. This methodology has the potential to revolutionize the structural design process by emerging as a disruptive tool in structural engineering, driving optimization and innovation in design. The importance of generative design in structural engineering lies in its ability to efficiently and sustainably optimize structures, which can reduce costs and construction time. The objective of this article is to identify the generative design parameters that affect the efficiency of structural design. The procedure includes a search in academic databases and the selection of relevant documents exploring its applications in various structural engineering contexts. The search led to a total of 128 documents between 2020 and 2024; applying inclusion and exclusion criteria based on task automation, generation of more efficient designs, and exploration of multiple design options reduced this to ten cases, of which five were exemplified. Finally, it was found that the parameters time, cost, quality, weight, strength, and energy efficiency are identified as key factors within structural design efficiency.

Keywords: generative design; structural engineering; structural optimization; efficiency

RESUMEN

El diseño generativo es un enfoque que utiliza algoritmos y técnicas computacionales para generar formas y patrones. Esta metodología tiene el potencial de revolucionar el proceso de diseño al emerger como una herramienta disruptiva en la ingeniería estructural; su importancia radica en la capacidad para optimizar estructuras de manera eficiente y sostenible, esto puede reducir los costos y el tiempo de construcción. Se tiene como objetivo fundamental de la presente investigación, identificar los parámetros del diseño generativo en la eficiencia del diseño estructural. El procedimiento incluye una búsqueda en bases de datos académicas y la selección de documentos relevantes donde se exploran sus aplicaciones en diversos contextos de la ingeniería estructural. La búsqueda ha conducido a la obtención de un total de 128 documentos en un periodo comprendido entre 2020 a 2024, aplicando los criterios de inclusión y exclusión con base a automatización de tareas, generación de diseños más eficientes y exploración de múltiples opciones para el diseño, se redujo a diez casos de los cuales se ejemplificaron cinco de ellos. Finalmente, se obtuvo que los parámetros: tiempo, costo, calidad, peso, resistencia y eficiencia energética se identifican dentro de la eficiencia dentro del diseño estructural.

Palabras clave: diseño generativo; ingeniería estructural; optimización estructural; eficiencia

¹Gino Giuseppe, Pannillo Majano. Docente investigador de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado ([ROR:03ggg3111](https://ror.org/03ggg3111)), Decanato de ingeniería civil. Venezuela. Doctorando en Ciencias de la Ingeniería, mención: Productividad en la Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre Venezuela. Correo: gino.pannillo@ucla.edu.ve ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3539-0128>

²Juan Carlos, Vielma Pérez. Ingeniero Civil. Magister Scientiae en Ingeniería Estructural, Universidad de Los Andes, Venezuela. Doctor per la Universitat Politècnica de Catalunya, España. Docente Investigador de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso ([ROR: 02cafbr77](https://ror.org/02cafbr77)). Chile. Correo: juan.vielma@pucv.cl ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5426-2215>

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos de la industria de la arquitectura, ingeniería y construcción (AEC) es la necesidad constante de producir flujos de trabajo más eficientes, contribuyendo a aumentar la calidad del producto final y reduciendo costo [1]. Para conseguirlo, es inevitable el uso de las nuevas tecnologías que se han introducido en el sector, con el fin de facilitar la comunicación y evitar tareas repetitivas exhaustivas que provocan inconsistencias y pérdida de productividad. La industria de la construcción civil tiene un papel significativo en el desarrollo socioeconómico de un país y busca comprender las tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial, y aquellas que se insertan en los procesos de diseño, que influyen en la calidad de la construcción [2].

La productividad es un tema importante en cualquier organización, la misma ha sido analizada por diferentes sectores de la industria, siendo un tema que compete a las diferentes empresas para desarrollar un producto en cuanto a alcance, tiempo, costo y calidad [3]. Aunque ha recibido una atención limitada en los sectores de arquitectura e ingeniería, es de conocimiento dentro de la industria de la ingeniería civil que pocos investigadores se han planteado establecer puntos de referencia para evaluar la productividad en la ingeniería [4]. Matemáticamente la productividad se define como la cantidad producida sobre el trabajo realizado usando unos recursos y tiempo para su obtención [3]; mientras que la productividad puede definirse como la relación entre los resultados y el tiempo que lleva conseguirlos [5].

Así mismo, se podría establecer como la relación entre la cantidad de servicios producidos y la cantidad de recursos utilizados [4], lo cual da a entender que una persona es más productiva mientras utiliza menos recursos para producir un determinado servicio. Dentro del diseño estructural la productividad hace referencia a la relación entre entradas y salidas [6], la entrada es el

tiempo empleado en el ingreso de datos según las normas de construcción empleadas en el diseño estructural y todo el conocimiento del diseñador que esto conlleva, y la salida es el plano estructural, el tiempo es una variable que destaca la eficiencia del diseño. Existen 3 indicadores de medida que se han propuesto por distintos investigadores para evaluar la productividad de la ingeniería en función de horas [7], estos son: por cada dibujo [6], las por elemento diseñado [8] y por cantidad de elementos diseñados [9]. Cabe destacar, que el diseño estructural tiene un impacto significativo en el costo total de las estructuras, para reducirlo es importante apoyar la toma de decisiones de los diseñadores desde la fase inicial [10].

El proceso de diseño típico, a menudo denominado tradicional, requiere el conocimiento y la experiencia del diseñador para crear productos que satisfagan las necesidades del usuario final, esto suele ser laborioso y requiere que diseñadores e ingenieros comprendan meticulosamente varios principios y procesos para generar adecuadamente un esbozo conclusivo [11]. El proceso suele ser iterativo: se propone una solución, luego se analiza y se prueba hasta que satisface todas las restricciones y cumple mejor los criterios, normalmente un diseñador propone una solución basada en la intuición, la experiencia y el conocimiento [12].

Sin embargo, las soluciones pasadas no significan necesariamente que sea la forma más óptima de resolver el problema particular; en consecuencia, podría descuidarse la exploración de otras alternativas, posiblemente superiores, basándose únicamente en que ya se ha utilizado una solución considerada preferida [13]. Los diseños requieren variables multidimensionales; existen restricciones de costo, estética, construcción, sitio y otras, la intención es cumplir con las metas propuestas por los clientes y requerimientos donde se ubica el diseño [14].

Un enfoque alternativo es el diseño generativo, ya que se centra en definir iterativamente un problema con sus

restricciones y criterios en forma de modelo computacional paramétrico, y luego deja la búsqueda de la solución a los algoritmos y su capacidad para generar y probar rápidamente varias alternativas, el resultado de este enfoque no es sólo un conjunto de soluciones que incorporan implícitamente el conocimiento, sino también un modelo en el que el conocimiento que define el problema es bastante explícito [12]. El diseño generativo (GD) es una tendencia en auge que tiene gran presencia en sectores como el diseño de productos y la arquitectura [15], básicamente consiste en utilizar parámetros y reglas en algoritmos para ayudar a explorar las variantes de un diseño más allá de lo que actualmente es posible mediante el proceso de diseño tradicional con el objetivo de explorar rápidamente miles de variantes de diseño para encontrar la mejor solución [11].

Las herramientas de GD permiten a los usuarios crear diseños eficientes optimizando factores como el costo, peso, la eficiencia energética y el rendimiento [10], a su vez tienen implicaciones para el proceso de diseño, el comportamiento del diseñador y los resultados del propio diseño. Tiene el potencial de influir también en otros factores, como la mejora de la satisfacción del usuario [16] o la reducción de la huella ambiental de

los productos [17]. Más recientemente se ha demostrado que sus herramientas también son útiles en las primeras etapas del proceso de diseño, influye en cómo los diseñadores definen el problema de diseño y cómo utilizan la herramienta para iterar a través del proceso para lograr métricas tanto cuantitativas como cualitativas[18]. Considerando lo expuesto, se tiene como objetivo fundamental de la presente investigación es identificar los parámetros del diseño generativo en la eficiencia del diseño estructural.

2. DESARROLLO

2.1. Ingeniería Estructural y Diseño Generativo

El proceso de diseño estructural de un edificio se puede dividir en tres etapas principales: diseño conceptual o diseño esquemático, diseño detallado considerado el preliminar u de optimización, y diseño del plano de construcción. Entre estas, la de diseño conceptual tiene un impacto significativo en el resultado final del diseño y depende en gran medida de la experiencia y el conocimiento del mismo (ver Figura 1). Por tanto, en la etapa de diseño conceptual, la inteligencia artificial (IA) puede jugar un papel importante en el diseño estructural [19].

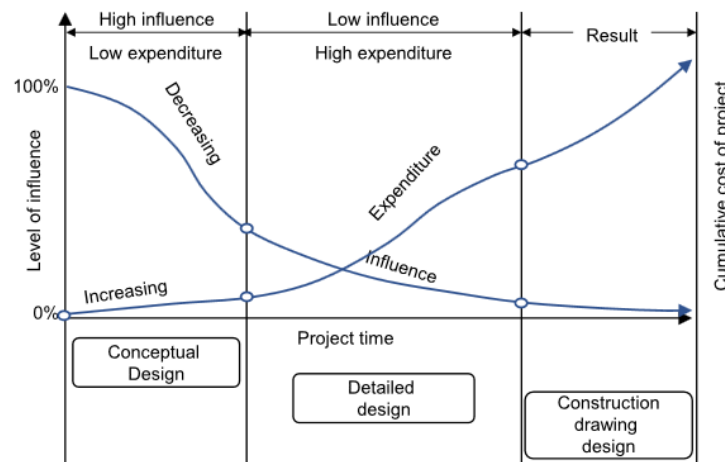


Figura 1. Influencia de la fase de diseño estructural del edificio en el costo del proyecto. Fuente: [19]

Los investigadores han estado explorando ampliamente el empleo de sistemas generativos para apoyar las prácticas de diseño en la industria de la arquitectura, la ingeniería

y la construcción (AEC) desde la década de 1970, pasó más de medio siglo desde que se desarrollaron los primeros sistemas generativos en el sector [20]. Los avances tecnológicos han convertido el "nivel de

automatización" en un factor fundamental en el éxito de los proyectos [21]. Hoy en día, abordar el cambio en el diseño requiere enormes esfuerzos, particularmente cuando el diseñador está explorando diferentes soluciones, o cuando es necesario adaptar el diseño a limitaciones cambiantes [22]. El GD tiene diferentes definiciones entre los investigadores, considerado uno de los pioneros en el área, el arquitecto italiano Celestino Soddu (1994) estableció que el arte generativo es una idea formada por un código genético, como en la naturaleza, pero de carácter "artificial" y que un proceso generativo es morfogenético, mientras que en

el caso de la construcción civil, los primeros trabajos en el área fueron los de Nigel Cross en 1977 [2]. Uno de los principales beneficios es la generación rápida de una amplia gama de soluciones, explorando diferentes enfoques implementando las restricciones y requisitos en constante cambio que caracterizan el proceso de diseño [22]. A su vez, integra la inteligencia artificial (IA) utilizando algoritmos de búsqueda metaheurística para descubrir resultados novedosos y de alto rendimiento a través de la configuración correcta del algoritmo propuesto para resolver un problema específico [23].

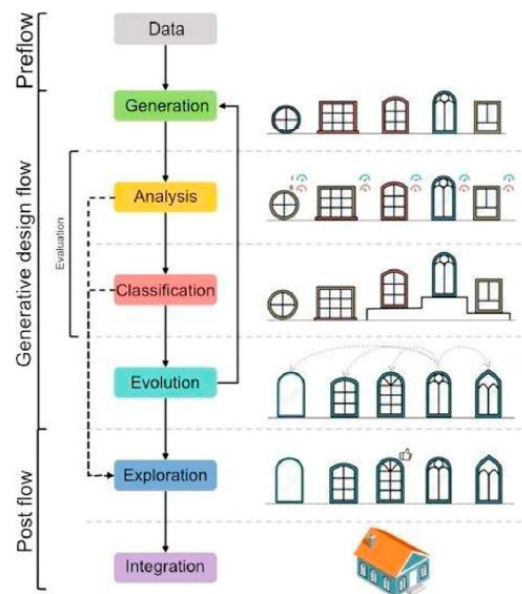


Figura 2. Flujo del diseño generativo. Fuente: [2]

El flujo de GD se basa en 3 etapas: generación, evolución y evaluación [2], como se indica en la Figura 2; la generación de opciones de diseño se basa en algoritmos y parámetros ingresados por el diseñador, y la evolución y evaluación es donde el sistema busca descubrir en qué dirección deben seguir o evolucionar. Para detallar la metodología, cada acción realizada en el flujo de GD y el post-flujo también se puede entender en tres fases: a) definición: bajo responsabilidad del diseñador, con reglas y restricciones; b) ejecución: aquí es cuando los algoritmos se ejecutan y se puede comenzar a crear varias alternativas de diseño; c) resultado: finalmente se obtienen los resultados generados luego de la ejecución y que servirán de insumo para las siguientes

etapas. En todo proceso de GD se pueden distinguir tres elementos esenciales: un diseño esquema o conjunto de parámetros y algoritmos que definen lo que se quiere diseñar, un medio de crear variaciones y un medio de seleccionar resultados deseables, hay numerosos medios para crear variaciones en un proceso de diseño generativo, lo que da lugar a distintas técnicas dentro de este tipo de diseño [15].

Como tal, es importante describir brevemente las técnicas generativas en la industria AEC (Figura 3) donde se pueden utilizar una o más según la naturaleza del problema y la experiencia de los desarrolladores [20]. Los métodos clásicos de IA representativos

incluyen sistemas basados en el conocimiento y algoritmos de inspiración biológica. Los métodos modernos de IA desde 2012, han experimentado un desarrollo integral impulsado por el aprendizaje profundo [19].

Los avances en IA están abriendo posibilidades para el desarrollo de herramientas de diseño más avanzadas, un ejemplo de estas innovaciones son las herramientas de diseño generativo, en las que

es posible generar productos complejos y de alto rendimiento [18]. La inteligencia artificial generativa ha marcado el comienzo de una era transformadora en la ingeniería estructural (Figura 4), ofreciendo soluciones innovadoras al tiempo que presenta desafíos únicos y amplias oportunidades [24]. La investigación IA en esta área puede explorar varias direcciones para mejorar la eficiencia, seguridad y rentabilidad de diseño estructural [25].

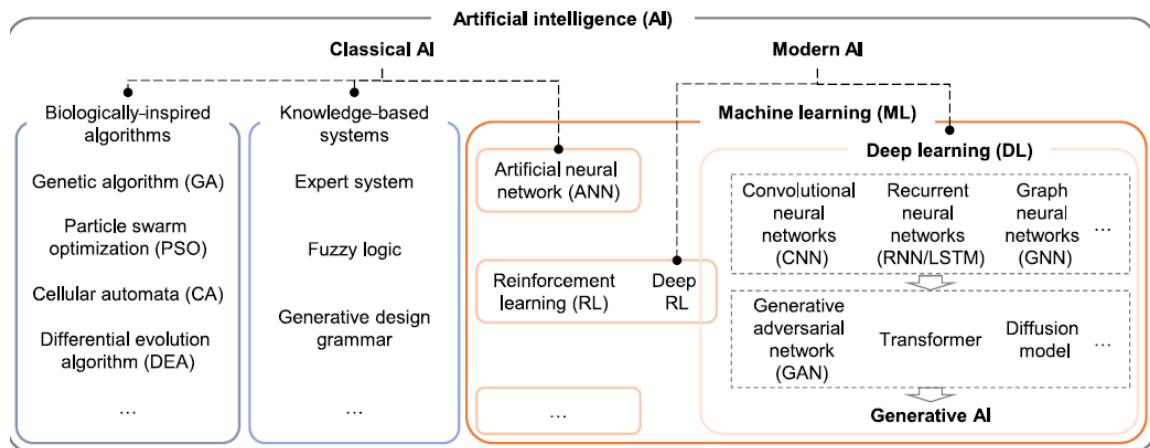


Figura 3. Métodos de inteligencia artificial (AI) ampliamente adoptados en el diseño estructural de la construcción. Fuente: [19]

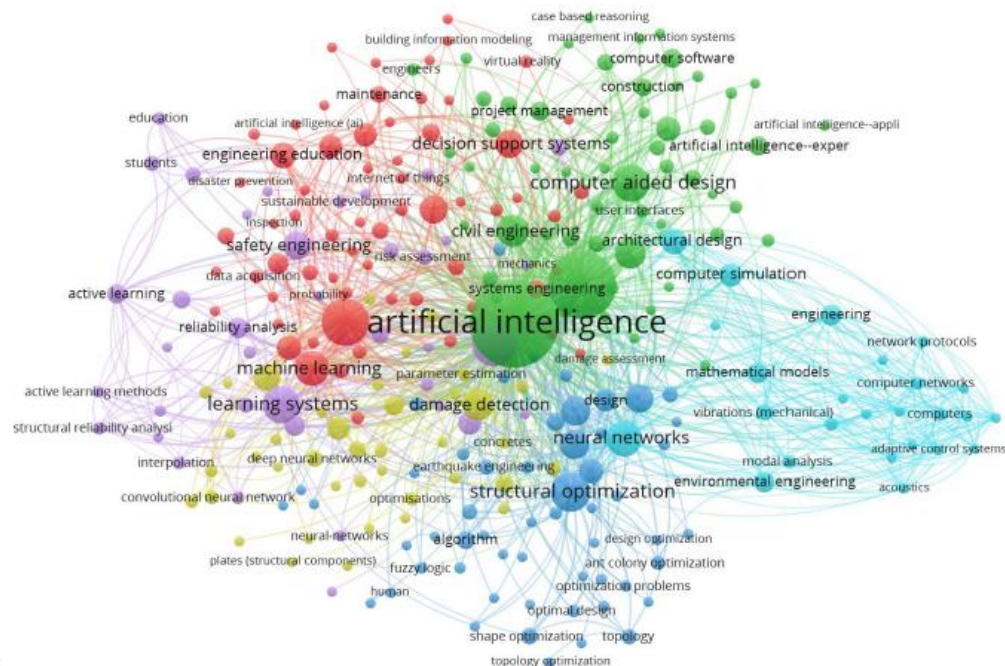


Figura 4. Análisis de coocurrencia de las palabras clave en la literatura. Fuente: [24]

La integración de algoritmos e IA en ingeniería permite la investigación de amplias posibilidades de diseño, con el objetivo de aumentar la productividad, la sostenibilidad ambiental y el atractivo estético de construcciones, e inclusive abordar problemas estructurales difíciles para generar soluciones creativas [19]. Los esfuerzos en la academia y la industria han buscado aprovechar el potencial del modelado de información BIM y los algoritmos en el diseño generativo para mejorar varios aspectos, incluida la calidad del diseño, la rentabilidad, la seguridad y la confiabilidad estructural [26]. Dentro del diseño generativo destacan los siguientes elementos [27]:

- Automatización de tareas: permite automatizar tareas que actualmente se realizan manualmente, como la generación de planos y secciones, la evaluación de la resistencia y la estabilidad de la estructura, y la selección de materiales. Esto puede liberar a los ingenieros estructurales para que se concentren en tareas de mayor valor añadido, como la resolución de problemas complejos y la toma de decisiones.
- Generación de diseños más eficientes: puede generar diseños más eficientes que los diseños tradicionales, con ello reducir los costos y el tiempo de construcción y ser más eficientes al explorar múltiples opciones.
- Exploración de una mayor cantidad de opciones: puede ayudar a los ingenieros estructurales a explorar una mayor cantidad

Tabla 1 y Tabla 2, con actualidad inferior a cinco años, expuestos en orden cronológico.

de opciones mediante las cuales es posible diseños más innovadores y sostenibles.

3. METODOLOGÍA

El presente estudio utiliza la revisión documental [28] y se desarrolló mayormente a través de revisión de literatura. La búsqueda se realizó en bases de datos relevantes [29], como Google Scholar, Sciencedirect y Scielo, utilizando los términos o palabras claves [30] asociadas a la investigación: "diseño generativo", "ingeniería estructural", "optimización estructural" y "eficiencia"; tanto en español como en inglés, en conjunto con los operadores booleanos and ("y"), or ("o") y not ("no") y los signos ortográficos, asteriscos (*) y comillas (") [31]. Es importante destacar que, la revisión bibliográfica de trabajos científicos publicados corresponde al periodo entre enero de 2020 y abril de 2024, para un total de 128 artículos, libros y tesis de investigación. Se seleccionaron los documentos relevantes que cumplían con los criterios de inclusión y exclusión en base a aquellos que abordan el diseño generativo en el contexto de la ingeniería estructural enfocando los hallazgos en tres pilares fundamentales: automatización de tareas, generación de diseños más eficientes y exploración de múltiples opciones para el diseño.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Seguidamente se ejemplifican cinco de los casos en estudio presentados en la

Tabla 1. Documentos Casos A-E Fuente: los autores

Caso	Documento	Tipo de documento y Procedencia	Hallazgo
A	Structural Optimization of Pile Foundation with the use of Generative Design and Machine Learning	Tesis de Maestría NTNU [34]	Optimización estructural de una cimentación de pilotes con el uso de un enfoque de diseño generativo (GD) y aprendizaje automático (ML) con el objetivo de hacer el proceso de diseño sea más eficiente
B	Application of generative design for structural optimization at the conceptual design phase	(Artículo) WIT Transactions on The Built Environment [13]	Esta investigación analiza dos casos ilustrativos para demostrar cómo se han aplicado las herramientas de GD a optimizar estructuras en la fase conceptual
C	Generative Design of Structural Steel Joints	(Artículo) Advances in Civil and Architectural Engineering [32]	Desarrollaron un software para el diseño óptimo de juntas mediante el método de diseño generativo (GDM) con el objetivo de disminuir los costos, peso total y de fabricación de la junta en la estructura

D	Method for Designing Prequalified Connections Using Generative Design	(Artículo) Buildings[35]	Esta investigación se centró en desarrollar un método para diseñar conexiones de acero, utilizando diseño generativo en un edificio bajo entorno de modelado de información (BIM)
E	A generative design-to-BIM workflow for minimum weight plane truss design	(Artículo) Revista de la construcción [10]	El objetivo de este estudio fue desarrollar un flujo de trabajo de optimización para encontrar y modelar el diseño de peso mínimo/costo mínimo como alternativa en la fase inicial de diseño, utilizando diseño generativo, análisis estructural y herramientas BIM de manera integrada

Tabla 2. Documentos Casos F-J Fuente: los autores

Caso	Documento	Tipo de documento y Procedencia	Hallazgo
F	Wind-resistant structural optimization of irregular tall building using CFD and improved genetic algorithm for sustainable and cost-effective design	(Artículo) Frontiers in Energy Research [36]	Este estudio tuvo como objetivo ampliar la investigación y el desarrollo de optimización estructural con enfoque en edificios altos irregulares sometido a los movimientos del viento. Esto se logra integrando el modelo paramétrico en el análisis computacional, que se combina con algoritmos de interacción fluido-estructura para producir fuerzas del viento. La optimización se desarrolla empleando algoritmos genéticos con función de restricción mejorada
G	Automation of Steel Shear Connection Design using Generative Design	Tesis de Maestría University of Alberta [37]	Se desarrollo una herramienta de optimización que agiliza el flujo de trabajo de diseño de conexiones y permita a los diseñadores aprovechar tecnologías emergentes como el diseño paramétrico y generativo para generar múltiples opciones en las primeras etapas del diseño
H	Generative design for more economical and environmentally sustainable reinforced concrete structures	(Artículo) Journal of Cleaner Production [38]	El estudio propuso un enfoque GD basado en conceptos de diseño generativo para optimizar la topología y el refuerzo de acero de vigas de hormigón armado. Su objetivo es proporcionar un método simplificado para diseñar vigas de hormigón y al mismo tiempo reducir el uso de materiales y las emisiones de CO2
I	A methodology to assess structural design efficiency	(Artículo) Structures [39]	Señalan que los pórticos se pre-diseñan utilizando reglas generales bien conocidas que conducen a casos realistas, verificados minuciosamente según EC3, y luego se aplican las métricas propuestas para evaluar la sensibilidad de la eficiencia del diseño
J	Generative AI design for building structures	(Artículo) Automation in Construction [19]	Revelaron el importante progreso que ha logrado la IA generativa en el diseño estructural de edificios, al tiempo que destaca los desafíos y perspectivas clave

3.1. Generative Design of Structural Steel Joints

El objetivo principal del estudio “Generative Design of Structural Steel Joints” [32], fue definir una metodología que pueda aplicarse para el diseño rápido y económico de juntas estructurales de acero y estructuras de marcos de acero. Para examinar un número significativo de configuraciones posibles y su efecto sobre el comportamiento estructural, se utiliza el método de GD, para evaluar un número significativo de configuraciones en un corto período de tiempo con restricciones definidas, permitiendo así a los diseñadores

tomar decisiones de forma rápida y racional. Cada configuración de junta se calcula en base a la norma EN 1993-1-8 [33], que especifica un método para el diseño de juntas de acero y constituye el proceso de evaluación GD. El trabajo general de los diseñadores de acero estructural se puede clasificar en múltiples pasos, es decir, desde el diseño conceptual hasta la selección de la configuración óptima de los miembros. Todos estos pasos están asociados entre sí; como tal, cada cambio en cualquiera de ellos alterará a los demás. Como ejemplo, se analizó una estructura de acero de dos pisos y dos tramos, la geometría del marco

con la sección transversal de los miembros

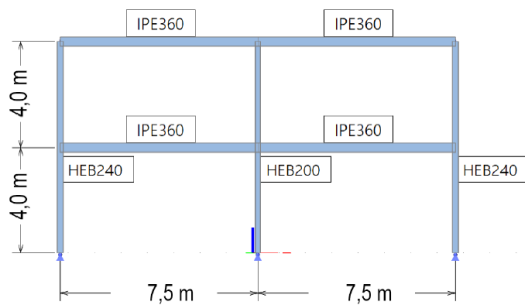


Figura 5. Geometría y sección transversal de miembros para marco principal. Fuente: [32]

Es beneficioso categorizar la optimización en diferentes niveles de modo que un diseñador estructural puede decidir el alcance de la misma, dichos niveles son el primer y segundo en función de las propiedades conjuntas a

como se muestra en la Figura 5.

determinar. La de primer nivel implica el uso de uniones nominalmente rígidas, en este caso, toda optimización está asociada con la utilización de los miembros y la de la configuración de la junta rígida, lo que implica obtener una rigidez rotacional de la junta cerca del límite rígido. La de segundo nivel se logra definiendo la unión rígida óptima a partir de la optimización de primer nivel. Con el objetivo principal de reducir los costos totales de fabricación, incluidos trabajos como el corte y la soldadura, a diferencia de la optimización de primer nivel, este segundo nivel requiere un análisis estructural iterativo y un diseño óptimo de miembros (Figura 6).

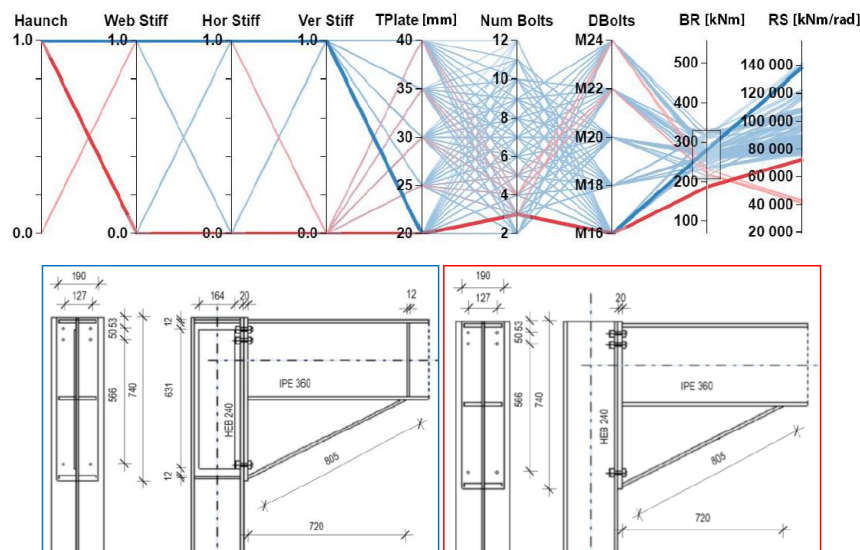


Figura 6. Configuraciones de filtrado para optimización. Fuente: [32]

Además, el costo de los miembros estructurales no cambió porque las secciones permanecieron sin cambios; por el contrario, el costo de la configuración de la junta se redujo significativamente. Para la configuración de optimización de primer nivel se utilizaron 54,1 kg de acero en refuerzos y soldaduras en filete de 11,93 m de longitud ($a=5$ mm). En comparación, para la optimización del segundo nivel se utilizaron 29,4 kg de acero para los refuerzos y soldaduras en ángulo de 5,82 m de longitud (5 mm). En consecuencia, se redujo

aproximadamente el 55 % del peso de los refuerzos de acero y aproximadamente el 51 % de la longitud de la soldadura. Una disminución significativa de la longitud de la soldadura da como resultado una reducción considerable de los costos totales de fabricación.

La implementación del GD basada en el ejemplo presentado contribuyó positivamente al proceso de diseño estructural y a la mejora de la eficiencia del diseño. Además de un diseño final más realista, redujo

significativamente el tiempo del proceso y proporcionó a los diseñadores estructurales una mejor comprensión de los efectos de los componentes de las juntas, como la resistencia a la flexión y la rigidez rotacional.

3.2. Automation of Steel Shear Connection Design using Generative Design

La investigación “Automation of Steel Shear Connection Design using Generative Design” [37] tiene como objetivo desarrollar una herramienta de optimización, que agilice el flujo de trabajo de diseño de conexiones y permita a los diseñadores aprovechar tecnologías emergentes como el diseño paramétrico y generativo, a fin de generar múltiples opciones en las primeras etapas del proceso. Este enfoque utiliza una estrategia de optimización de dos niveles, con el objetivo de minimizar el costo y el peso combinados de una estructura de acero y sus conexiones en un proyecto de construcción designado.

En la capa de optimización inicial, la atención se centra en diseñar y optimizar múltiples conexiones en cada unión necesaria, teniendo en cuenta la selección del tipo preferida del usuario. En la capa secundaria, se emplean metaheurísticas para identificar la combinación más óptima de conexiones en

toda la estructura, con el objetivo general de minimizar el costo y peso generales. Para evaluar la efectividad de la herramienta frente a diseños del mundo real, se realizaron dos estudios de caso en un edificio de acero de 2 y 5 pisos utilizando la herramienta de optimización. Además, se ejecutó una comparación exhaustiva entre los algoritmos NSGA-II, SPEA2 y SMPSO para identificar el algoritmo que proyectó los resultados más óptimos y evaluar su correspondiente tiempo de ejecución. El primer estudio de caso involucró un edificio de acero de dos pisos para un concesionario de automóviles, mientras que el segundo estudio de caso se centró en un edificio de almacenamiento de acero de cinco pisos.

El primer proyecto es una estructura de acero de 2 pisos diseñada en 2021; la estructura comprende 381 conexiones de corte que están diseñadas para el 60 % de la capacidad de momento plástico del miembro soportado. El proceso de optimización mostró una velocidad de ejecución constante en las tres metaheurísticas, con un tiempo de ejecución promedio de aproximadamente 6 minutos y 39 segundos.

Description	Quantity			
	Fabricator	NSGA-II	SPEA2	SMPSO
Bolted-Bolted Single Angle	0	0	1	22
Welded-Bolted Single Angle	123	92	102	51
Bolted-Bolted Double Angle	21	0	1	23
Welded-Bolted Double Angle	0	13	12	36
Shear Tab	237	276	265	249
Area of PL10 (m ²)	8.91 (2)	7.03 (2)	6.87 (2)	5.99 (2)
Area of PL13 (m ²)	0.48 (1)	0.19 (1)	0.19 (1)	0.15 (1)
Area of PL16 (m ²)	0.84 (1)	0	0	0
Length of L89x64x9.5 (m)	33.94 (3)	23.11 (2)	24.69 (3)	12.20 (2)
Length of L89x89x9.5 (m)	7.52 (1)	0	0.56 (1)	20.47 (2)
Length of L102x76x9.5 (m)	0.84 (1)	0	0	0
Number of Bolts	1658	1158	1165	1261
Total Weight (kg)	92,386	92,399	92,414	92,486
Cost of Shear Connections	\$29,267	\$27,695	\$27,545	\$37,664
Material and Steel Fabrication Cost	\$276,459	\$274,887	\$274,736	\$284,856
Execution Time	N/A	6m 26s	7m 9s	5m 57s

Figura 7. Resumen de la opción de menor costo para Grand Prairie Honda. Fuente: [37]

En este primer estudio de caso, el algoritmo

SPEA2 produjo la solución más rentable,

logrando un costo de material y fabricación de conexiones de corte un 5,9% menor que el diseño original. Asimismo, el algoritmo NSGA-II mostró una reducción de costos del 5,4%. Por el contrario, el algoritmo SMPSO resultó en un costo mayor del 28,7% en comparación con el diseño original (Figura 7).

El segundo proyecto de almacenamiento asequible de 5 pisos es una estructura de acero de 5 pisos diseñada en 2022. La estructura comprende 1415 conexiones de corte que están diseñadas para el 60 % de la capacidad de momento plástico del miembro soportado. El proceso de optimización también mantuvo una velocidad de ejecución constante en las tres metaheurísticas, con un tiempo de

ejecución promedio de aproximadamente 19 minutos y 8 segundos. El algoritmo NSGA-II surgió como el más efectivo para reducir los costos de material y fabricación de las conexiones de corte, logrando una reducción del 5,5 % en comparación con el diseño original. El algoritmo SPEA2 también resultó beneficioso, generando una reducción de costos del 4,5%. Por otro lado, el algoritmo SMPSO nuevamente resultó en un costo mayor en comparación con el diseño original resultando en un aumento del 21,4% (Figura 8). Es importante tener en cuenta que el tiempo de ejecución real puede variar según los recursos computacionales disponibles en la máquina que ejecuta el proceso.

Description	Quantity			
	Fabricator	NSGA-II	SPEA2	SMPSO
Bolted-Bolted Single Angle	303	0	20	48
Welded-Bolted Single Angle	0	69	86	66
Bolted-Bolted Double Angle	188	6	30	150
Welded-Bolted Double Angle	0	149	165	105
Shear Tab	924	1191	1114	1046
Area of PL10 (m ²)	28.14 (6)	33.63 (7)	32.63 (7)	26.18 (5)
Area of PL13 (m ²)	15.17 (3)	0.05 (1)	0.05 (1)	0.41 (1)
Area of PL16 (m ²)	5.97 (2)	0	0	0.96 (1)
Area of PL19 (m ²)	0	0	0	1.25 (1)
Length of L89x64x9.5 (m)	33.94 (3)	93.13 (8)	99.26 (9)	54.94 (5)
Length of L89x89x9.5 (m)	190.03 (16)	2.50 (1)	15.76 (2)	65.82 (6)
Number of Bolts	9571	3692	4099	4984
Total Weight (kg)	302,956	301,465	301,682	302,083
Cost of Shear Connections	\$118,301	\$111,808	\$112,999	\$143,562
Material and Steel Fabrication Cost	\$866,931	\$860,438	\$861,629	\$892,192
Execution Time	N/A	18m 20s	18m 59s	20m 4s

Figura 8. Resumen de la opción de menor costo para proyecto de almacenamiento asequible. Fuente: [37]

En resumen, el estado actual de la herramienta de optimización demuestra su capacidad para automatizar y optimizar las conexiones de corte en el diseño de edificios, lo que resulta en reducciones de costos en comparación con los métodos de diseño tradicionales. Si bien las reducciones de costos pueden no ser sustanciales, la notable velocidad de la herramienta para generar numerosas opciones de diseño, lo que permite ajustes por parte del usuario o implementación directa, significa su potencial para ahorros de costos significativos. Además, la herramienta de optimización presenta oportunidades para ahorros de costos

aún mayores al incorporar tipos de conexión adicionales y funciones objetivas más allá de la optimización de costos y peso.

3.3. Generative Design for more Economical and Environmentally Sustainable Reinforced Concrete Structures

El estudio “Generative design for more economical and environmentally sustainable reinforced concrete structures” [38] propuso un enfoque GD basado en conceptos de GD, algoritmos genéticos (GA) y el método del multiplicador Lagrangiano (LMM) para

optimizar la topología y el refuerzo de acero de vigas de hormigón armado. Su objetivo es proporcionar un método simplificado para diseñar vigas de hormigón y al mismo tiempo reducir el uso de materiales y las emisiones de CO₂. En este estudio, los diseños de vigas se optimizan para reducir el uso de hormigón y acero en vigas de hormigón armado. La eficacia del enfoque quedó demostrada a través de su implementación para diseñar una viga en voladizo (Figura 9) y una viga simplemente apoyada.



Figura 9. Configuración: a) Viga en voladizo de diseño tradicional; (b) Viga en voladizo optimizada. Fuente: [38]

Los resultados de ambas aplicaciones fueron muy prometedores, ya que todas las funciones objetivo produjeron volúmenes de hormigón y masas de refuerzo mucho menores que los obtenidos siguiendo el enfoque tradicional. Para la viga en voladizo, la reducción en el costo del material osciló entre \$23 y \$30 por viga, y la reducción en la huella de CO₂ osciló entre 196 y 257 kg por viga. Se observaron

resultados similares para la viga simplemente apoyada, para la cual la reducción de costos de material osciló entre \$24 y \$31, y la reducción de la huella de CO₂ osciló entre 179 kg y 228 kg.

En general, la reducción de los costos de materiales alcanzó el 63% y la de las emisiones de CO₂ el 57%, una razón para realizar esfuerzos para ampliar este trabajo a edificios enteros. Los resultados de este estudio contribuyen a encontrar medios para hacer la construcción más económica y ambientalmente sostenible. Como nota final, aunque los diseños optimizados aún no han sido validados experimentalmente, satisfacen todas las restricciones de diseño estructural basadas en la práctica común y el código de construcción ACI ampliamente utilizado.

3.2. A Methodology to Assess Structural Design Efficiency

La eficiencia estructural se considera un criterio importante para cualquier diseño sólido. Se trata, sin embargo, de una cualidad esquivada que actualmente carece de una definición rigurosa. Para hacer que el sector sea más eficiente, es necesario minimizar el uso de recursos en la construcción de nuevas estructuras, y el primer paso es reducir la cantidad de materiales necesarios para dichas estructuras. Por lo tanto, la optimización estructural juega un papel importante en el diseño estructural eficiente en el uso de recursos, cumpliendo así con los objetivos sostenibles para la industria de la construcción.

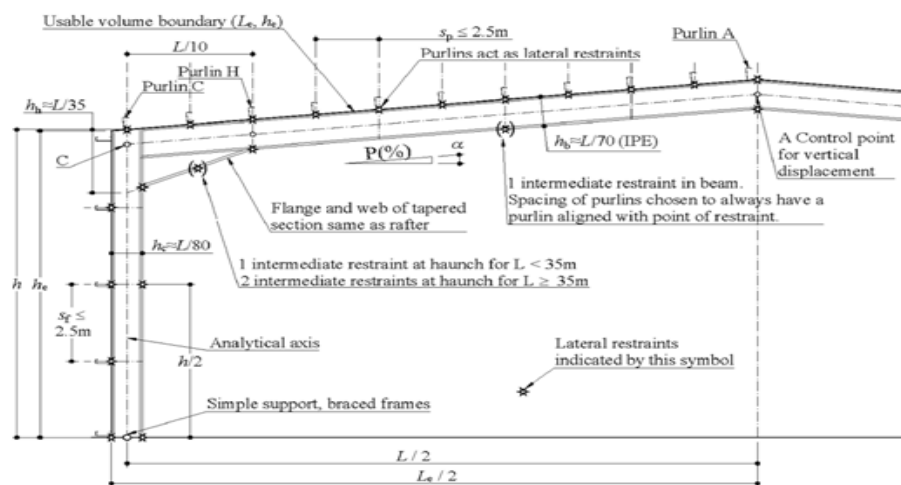


Figura 10. Geometría de los marcos del portal. Fuente: [39]

En el artículo “A Methodology to Assess Structural Design Efficiency” [39] se presenta un índice objetivo, destinado a medir la eficiencia estructural y la calidad del diseño. El índice se basa en factores de utilización derivados de las expresiones de diseño del Eurocódigo. Para mostrar la adecuación de las métricas propuestas, se utiliza como caso de estudio un conjunto de marcos de portal (Figura 10).

Se elige esta tipología porque puede describirse completamente con un número limitado de parámetros y su diseño está muy influenciado por la inestabilidad, que es específica de las estructuras de acero. Este Índice de Eficiencia de Diseño proporciona una métrica de diseño más sólida y holística que el estándar. Posteriormente, se establece dicho índice óptimo para este tipo de estructuras, mediante técnicas de diseño de optimización utilizando GA, implementado

para definir la mejor solución para cada portal estudiado. Por ello, en la siguiente sección se presenta un breve estado del arte relacionado con naves industriales y optimización mediante algoritmos genéticos.

El diseño de marcos de portal basado en una guía de diseño prescriptiva, para este la tipología estructural condujo a valores de IDE que varían de 0,36 a 0,56, con un valor medio de 0,465 y un COV de 11,3 %. Los datos para el conjunto modificado se presentan gráficamente en la Figura. Una comparación entre el coeficiente de variación de W e IDE indican que este último es muy estable y presenta una dependencia limitada del tamaño de la estructura. Como este conjunto de resultados ya está optimizado con reglas constructivas existentes, esto es indicativo de que IDE es un candidato razonable para ser utilizado como índice normalizado que refleje la eficiencia del diseño estructural.

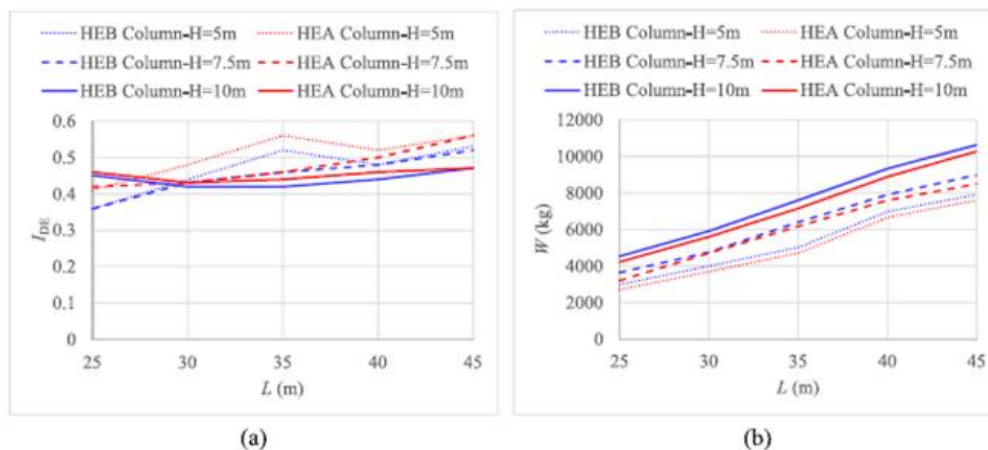


Figura 11. Resultados para el conjunto modificado: a) índice de eficiencia de diseño IDE; b) peso W.

Fuente: [39]

A continuación, el conjunto modificado de pórticos fue sometido a un proceso de optimización, utilizando el algoritmo genético validado, con la maximización de IDE como función objetivo. La media y el coeficiente de variación para W e IDE muestran una mejora en comparación con los diseños según la práctica de ingeniería, los valores promedio de IDE varían de 0,42 a 0,59, con un valor promedio de 0,500 y un COV de 11,1 %. Posteriormente, estos marcos optimizados se optimizan aún más mediante la variación de la longitud. Los resultados indican que en el 40

% de los casos con un aumento máximo de IDE de 8 %, con un valor medio de 0,515 y un COV del 10,6 %. Finalmente, para geometrías consideradas de marcos, con laminado en caliente uniforme, el índice máximo obtenido es IDE = 0,6. Los valores más altos de IDE indican un mayor uso eficiente del material.

Esta investigación propone un índice novedoso para la eficiencia del diseño estructural. El índice tiene las siguientes ventajas sobre otras posibilidades, como el peso estructural por unidad de área o volumen:

- Puede usarse para prácticamente cualquier estructura, de cualquier material y tipología
- Se puede utilizar con cualquier regla de verificación del "efecto de resistencia" formato, incluidos subconjuntos de verificaciones
- No depende de la dimensión física (tamaño) de la estructura
- Tiene un significado físico y puede cuantificarse con precisión mediante diferentes fiestas. El índice es adecuado para usarse como función objetivo para la optimización. Además, su implementación en técnicas de inteligencia artificial (como Generative Adversarial Network - GAN) es muy prometedor.

3.3. Generative AI Design for Building Structures

El diseño de estructuras de edificios es una tarea matizada que requiere la combinación de conocimientos empíricos y mecánicos. Los ingenieros han descubierto, desarrollado e implementado constantemente sofisticadas tecnologías de diseño asistido por computadora para agilizar el proceso y lograr diseños estructurales eficientes y confiables. El diseño de estructuras de edificios presenta varios desafíos, incluidos procesos de diseño ineficientes, reutilización limitada de datos y la subutilización de la experiencia de diseño previa. El objetivo de la investigación "Generative AI Design for Building Structures [19] se centra en cómo se representan los datos, y cómo se construyen los algoritmos de generación inteligentes, los métodos para

evaluar diseños y la integración de la generación y la optimización de la IA generativa en el diseño estructural de edificios. Adicionalmente proporcionar una referencia que pueda ayudar a guiar la transición hacia procesos de diseño más inteligentes.

En consecuencia, este estudio destaca el potencial de la IA generativa en el diseño estructural de edificios y la necesidad de realizar más investigaciones en este campo. El desarrollo y la aplicación de la IA generativa en el diseño estructural pueden mejorar significativamente la eficiencia y precisión del proceso de diseño, lo que conducirá a estructuras de construcción más sostenibles y seguras. La inteligencia artificial generativa se ha convertido en una poderosa herramienta para aprender y utilizar creativamente los datos existentes para generar nuevas ideas de diseño. Aprendiendo de experiencias pasadas, esta técnica puede analizar dibujos estructurales complejos, combinar textos de requisitos, integrar conocimientos mecánicos y empíricos y crear diseños nuevos.

Feng et al. [40] propusieron un método de diseño inteligente para esquemas de estructuras de muros de corte que cumplieran con los requisitos de la licitación del proyecto, incluido el diseño y la optimización del diseño de los muros de corte, el diseño de la sección transversal de los componentes y la construcción automatizada de modelos de análisis estructural. Este estudio logró un proceso inteligente y altamente automatizado, desde planos de diseño arquitectónico hasta estructuras, modelos de análisis estructural y estadísticas de consumo de materiales (Figura 12).

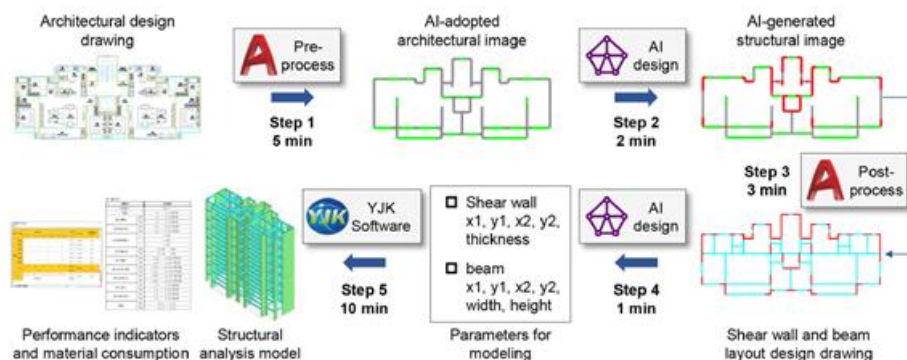


Figura 12. Aplicación del diseño generativo basado en IA para la estructura del edificio. Fuente: [19]

El método se aplicó a un proceso de licitación de proyectos y los resultados indicaron que, para un solo edificio, la eficiencia del diseño estructural generativo basado en IA era casi entre 10 y 15 veces mayor que la del diseño manual. Además, el método de diseño inteligente puede llevar a cabo simultáneamente múltiples diseños de proyectos, con el rendimiento mecánico estructural del diseño inteligente cumpliendo con los requisitos del código y el uso de materiales casi idéntico al de la estructura diseñada por el ingeniero.

Como se ilustra en la Figura 12, la IA generativa puede completar el diseño del esquema estructural correspondiente ingresando el esquema arquitectónico y las condiciones de diseño según sea necesario. Luego, el esquema estructural se puede importar a un software de análisis estructural y dibujo CAD (como Autodesk CAD, PKPM o YJK) utilizando un sistema de modelado

paramétrico. Esto permite completar eficientemente la verificación del esquema estructural y el diseño de la construcción. Por lo tanto, el proceso de diseño, desde el esquema arquitectónico hasta el dibujo de construcción preliminar, se puede realizar en 20 minutos, mejorando así significativamente la eficiencia del diseño.

Chang y Cheng [41] realizaron un estudio de caso centrado en el diseño de las dimensiones de la sección transversal de los componentes para diferentes estructuras de acero. Emplearon módulos basados en GNN propuestos en su investigación. En la Figura 13 se muestra múltiples opciones de diseño, con un tiempo de entrenamiento de aproximadamente 2,5 h. Sin embargo, una vez entrenado, el módulo puede generar un nuevo diseño en sólo 10,07 milisegundos, incorporando de manera efectiva las restricciones y demostrando la capacidad de generalización del algoritmo.

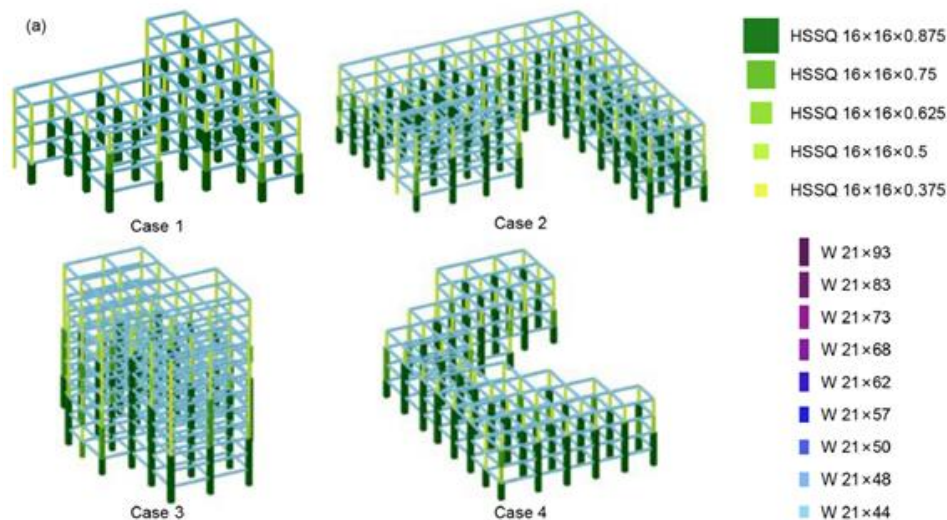


Figura 13. Casos típicos de diseño basado en IA generativa. a) caso de diseño de una estructura de estructura de acero. Fuente: [19]

Otro estudio digno de mención realizado por Jeong y Jo [42] utilizó el aprendizaje por refuerzo profundo para generar y optimizar el diseño de vigas. Aplicaron este método a una estructura de pórtico de concreto armado bidimensional, de tres pisos y tres tramos, como se muestra en la Figura 14. En comparación con los algoritmos genéticos

(GA) y el algoritmo BB-BC, el método propuesto por Jeong y Jo requiere una iteración mínima, aprende eficazmente de los datos de diseño existentes, mejora significativamente la eficiencia y logra un uso de material comparable a los resultados obtenidos a través de la optimización a largo plazo.



Figura 14. Casos típicos de diseño basado en IA generativa. b) caso de diseño de una estructura de marco de concreto. Fuente: [19]

Este artículo revela el importante progreso que ha logrado la IA generativa en el diseño estructural de edificios, al tiempo que destaca los desafíos y perspectivas clave. El diseño inteligente generativo basado en IA es un enfoque esencial para superar los desafíos que enfrenta la industria actual del diseño estructural, como la baja eficiencia del diseño, la reutilización insuficiente de datos y la dificultad para heredar la experiencia de diseño. En el futuro, las tecnologías de IA generativa en el campo del diseño estructural de edificios deberán ser más precisas y cumplir con reglas empíricas para garantizar su efectividad y practicidad.

4. DISCUSIÓN

Los resultados de la revisión de casos mostraron que el GD tiene el potencial de mejorar significativamente la eficiencia del proceso de diseño estructural (Tabla 3 y Tabla 4). La medición de la eficiencia dentro del GD aplicado en la ingeniería estructural puede ser un desafío, ya que existen múltiples factores que pueden afectarla. Sin embargo, existen algunos indicadores que pueden ser utilizados para evaluar el impacto del diseño generativo en la eficiencia de los procesos de diseño estructural. Sin embargo, algunas variables comunes que pueden ser de interés incluyen:

- Tiempo de diseño: reducir el tiempo de diseño mediante la automatización de tareas manuales y la generación de diseños más eficientes.

- Costo de diseño: reducir el costo de diseño mediante la automatización de tareas manuales y la generación de diseños más eficientes.
- Calidad del diseño: mejorar la calidad del diseño mediante la generación de diseños más eficientes y resistentes.
- Satisfacción del cliente: mejorar la satisfacción del cliente mediante la generación de diseños que cumplen con sus requisitos y expectativas.

Además de estas variables generales, también pueden ser de interés variables más específicas relacionadas con el diseño estructural, como:

- Peso de la estructura: reducir el peso de la estructura, lo que puede conducir a una reducción de los costos de construcción y de los costos de operación.
- Resistencia de la estructura: mejorar la resistencia de la estructura, lo que puede mejorar su seguridad y durabilidad.
- Eficiencia energética de la estructura: ayudar a mejorar la eficiencia energética de la estructura, lo que puede reducir los costos de operación y las emisiones de gases de efecto invernadero.

En general, la medición de la eficiencia dentro del GD aplicado en la ingeniería estructural debe ser un proceso holístico que considere todos los factores que pueden afectarla.

Tabla 3. Resumen Casos A-F Fuente: los autores

Parámetros del diseño generativo en la eficiencia del diseño estructural						
Casos	Tiempo	Costo	Calidad	Peso	Resistencia	Eficiencia energética
A	Numerosos métodos de optimización diferentes, para	Función de costos que Incluye variables relacionadas con la				

	disminuir el tiempo de cálculo	cimentación de pilotes. Las configuraciones que den el menor costo				
B			Rutinas de optimización para producir soluciones razonables	Optimización estructural de una armadura de acero de 65 m con respecto al peso propio	Optimización del perfil del tendón para una viga postensada de varios tramos	
C	Disminuir del tiempo diseño de juntas estructurales de acero y estructuras de marcos de acero.	Reducir los costos totales de fabricación, incluidos trabajos como el corte y la soldadura		Se redujo aproximadamente el 55 % del peso de los refuerzos de acero y aproximadamente el 51 % de la longitud de la soldadura.		
D	Automatizar el proceso y reducir el tiempo de diseño de la conexión.		Iteraciones manuales y verificaciones individuales son reemplazadas por múltiples soluciones, entre las que el usuario puede elegir el diseño de conexión que mejor se adapte sus necesidades			
E		El objetivo de la optimización se determinó como encontrar la estructura de peso mínimo (por lo tanto, costo mínimo), bajo ciertas condiciones materiales y de restricción entre los generados.		Según los optimizadores encontraron que el peso óptimo de la armadura fue de 1611 kg. La optimización fue realizada por Rhino, Grasshopper, Karamba y el algoritmo evolutivo Galápagos		
F		El ejemplo numérico demuestra su eficacia al alcanzar el 35,71% de reducción del volumen de concreto respecto al diseño del original				Reducir las emisiones de carbono incorporadas en 4,400 toneladas

Tabla 3. Resumen Casos G-J Fuente: los autores

Parámetros del diseño generativo en la eficiencia del diseño estructural						
Casos	Tiempo	Costo	Calidad	Peso	Resistencia	Eficiencia energética
G	En el estudio de caso de Grand Prairie Honda, tiempo de ejecución promedio de aproximadamente 6 minutos y 39 segundos. El proyecto de almacenamiento o asequible de 5 pisos, el tiempo de ejecución	En el estudio de caso de Grand Prairie Honda, la solución más rentable, a un costo de material y fabricación de conexiones de corte en un 5,9% menor que el diseño original. El proyecto de almacenamiento asequible de 5 pisos, se pudo reducir los costos de material y fabricación de las conexiones de corte, logrando una reducción del 5,5 % en				

	promedio de aproximadamente 19 minutos y 8 segundos.	comparación con el diseño original				
H		En general la reducción de los costos de materiales alcanzó el 63%, para una de las vigas en voladizo entre \$23 y \$30 y para la viga simplemente apoyada osciló entre \$24 y \$31				En general la reducción de las emisiones de CO2 alcanzó el 57%, la reducción en la huella de CO2 osciló entre 196 y 257 kg de CO2 por viga en voladizo y para la viga simplemente apoyada la reducción de la huella de CO2 osciló entre 179 kg y 228 kg
I			Se establece el Índice de Eficiencia de Diseño óptimo, en el caso de estudio el índice máximo obtenido es IDE = 0,6; los valores más altos de IDE indican un mayor uso eficiente del material. El índice tiene ventajas sobre otras posibilidades, como el peso estructural por unidad de área o volumen			
J	El proceso de diseño, desde el esquema arquitectónico hasta el dibujo de construcción preliminar, se puede realizar en 20 minutos, mejorando así significativamente la eficiencia del diseño.		Múltiples opciones de diseño, con un tiempo de entrenamiento de aproximadamente 2,5 h. Sin embargo, una vez entrenado, el módulo puede generar un nuevo diseño en sólo 10,07 milisegundos,		El aprendizaje por refuerzo profundo para generar y optimizar el diseño de vigas.	

4. CONCLUSIONES

La eficiencia dentro del GD aplicado en la ingeniería estructural se puede definir como la relación entre la cantidad de trabajo realizado y los recursos utilizados para realizarlo. En este caso, el trabajo realizado es el diseño de una estructura, y los recursos utilizados son los humanos, las máquinas y los materiales. El modelo o enfoque de eficiencia adoptado dentro del diseño generativo aplicado en la ingeniería estructural se basa en la idea de que el diseño generativo puede aumentar la

eficiencia al automatizar tareas, generar diseños más eficientes y ayudar a los ingenieros estructurales a explorar un mayor espacio de diseño. En este caso los parámetros identificados en la eficiencia destacan: tiempo, costo calidad, peso, resistencia y eficiencia energética.

La adopción del GD por parte de los ingenieros estructurales puede tener un impacto significativo en la industria de la construcción. Puede ayudar a reducir los costos, mejorar la calidad y acelerar el proceso

de diseño estructural, inclusive desempeñará un papel clave al permitir a los diseñadores abordar problemas mayores que de otro modo no habrían podido resolver. Este proceso a menudo da como resultado diseños que de otro modo no habrían sido posibles de crear utilizando el proceso de diseño tradicional. La optimización en las primeras etapas del proceso de diseño puede proporcionar una ventaja en términos de ahorro de material. La creación de estructuras ligeras mediante la reducción de peso puede ser una forma eficaz de combatir el alto costo de los materiales de alto rendimiento actuales. Sin embargo, también existen algunos desafíos que deben abordarse para lograr estos beneficios.

En conclusión, el GD tiene el potencial de revolucionar el proceso de diseño estructural, mejorando la productividad y la eficiencia. Las empresas de ingeniería estructural que adopten esta metodología pueden obtener una ventaja competitiva significativa. Sin embargo, aún está en sus primeras etapas de desarrollo, y hay muchas oportunidades para mejorar su productividad. Algunas de estas oportunidades incluyen: desarrollo de algoritmos de diseño generativo más eficientes, mejora de la integración del diseño generativo con otros procesos de diseño y desarrollo de estándares y directrices para el diseño generativo.

5. FINANCIAMIENTO

La investigación que ha dado origen a este artículo no ha recibido el aporte financiero de ninguna fuente.

6. CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

7. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, G.G.P.M.; metodología y investigación, G.G.P.M.; redacción y edición G.G.P.M.; revisión y supervisión, J.C.V.P.

8. REFERENCIAS

[1] G. F. Azevedo, «BIM methodology implementation in structural design: Adaptation of procedures and information management», *Journal of Civil*

Engineering and Environmental Sciences, vol. 8, n.º 1, pp. 093-099, oct. 2022, doi: <https://dx.doi.org/10.17352/2455-488X.000058>.

- [2] L. H. Oscar, L. C. Cerqueira, P. H. Cunha, y E. L. Qualharini, «Generative design in civil construction: a case study in Brazil», *Front. Built Environ.*, vol. 9, jun. 2023, doi: 10.3389/fbuil.2023.1150767.
- [3] P. N. Angarita-Uscategui, L. Ovallos-Manosalva, y B. Y. Carballo-Rincón, «Análisis de la productividad de mano de obra para la construcción de una vivienda unifamiliar en el municipio de Ocaña, Norte de Santander», *Revista Ingenio*, vol. 15, n.º 1, Art. n.º 1, dic. 2018, doi: 10.22463/2011642X.3123.
- [4] K. J. Angulo Benavides, «Evaluación de la productividad del diseño estructural de edificaciones de concreto armado mediante el uso de dos software», bachelorThesis, Universidad Nacional de Chimborazo, 2018, 2018. Accedido: 4 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/4756>
- [5] J. Prokopenko, *La gestión de la productividad: manual práctico*. Oficina Internacional del Trabajo, 1989.
- [6] H. R. Thomas, Q. C. Korte, V. E. Sanvido, y M. K. Parfitt, «Conceptual Model for Measuring Productivity of Design and Engineering», *Journal of Architectural Engineering*, vol. 5, n.º 1, pp. 1-7, mar. 1999, doi: 10.1061/(ASCE)1076-0431(1999)5:1(1).
- [7] Y. Ebrahimi y S. Rokni, «Validity of Industry Benchmarks and Metrics for Engineering Productivity», pp. 1057-1063, abr. 2012, doi: 10.1061/41109(373)106.
- [8] L. Song, M. Allouche, y S. AbouRizk, «Measuring and Estimating Steel Drafting Productivity», pp. 1-9, abr. 2012, doi: 10.1061/40671(2003)9.
- [9] I. Kim, «Development and implementation of an engineering

- productivity measurement system (EPMS) for benchmarking», 2007, Accedido: 13 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2152/3285>
- [10] B. Malgıt, Ü. Işıkdag, G. Bekdaş, y M. Yücel, «A generative design-to-BIM workflow for minimum weight plane truss design», *Revista de la construcción*, vol. 21, n.º 2, pp. 473-492, sep. 2022, doi: 10.7764/rdlc.21.2.473.
- [11] M. McKnight, «Generative Design: What it is? How is it being used? Why it's a game changer», *KnE Engineering*, pp. 176-181, feb. 2017, doi: 10.18502/keg.v2i2.612.
- [12] L. Gradišar, R. Klinc, Ž. Turk, y M. Dolenc, «Generative Design Methodology and Framework Exploiting Designer-Algorithm Synergies», *Buildings*, vol. 12, n.º 12, Art. n.º 12, dic. 2022, doi: 10.3390/buildings12122194.
- [13] A. S. Birkemo y S. M. K. Samarakoon, «Application of generative design for structural optimization at the conceptual design phase», *WIT Transactions on The Built Environment*, pp. 139-153, nov. 2021, doi: 10.2495/BIM210121.
- [14] J. L. Rodríguez, «Generative Design for Constructability improvements with BIM|Lean approach», Master thesis: Bologna Process Level II Master Dissertation, Univerza v Ljubljani Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://bimaplus.org/wp-content/uploads/2021/10/2021-JoseHernandez-Dissertation.pdf>
- [15] L. García, M. Domínguez, y M. del M. Espinosa, «Diseño generativo: el estado del arte», *Técnica Industrial*, n.º 327, pp. 44-49, nov. 2020, doi: 10.23800/10417.
- [16] J. Cui y M. X. Tang, «Towards generative systems for supporting product design», *International Journal of Design Engineering*, vol. 7, n.º 1, pp. 1-16, ene. 2017, doi: 10.1504/IJDE.2017.085639.
- [17] E. Gascón Alvarez, N. L. Stamler, C. T. Mueller, y L. K. Norford, «Shape optimization of chilled concrete ceilings – Reduced embodied carbon and enhanced operational performance», *Building and Environment*, vol. 221, p. 109330, ago. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109330.
- [18] J. Saadi y M. Yang, «Observations on the implications of generative design tools on design process and designer behaviour», *Proceedings of the Design Society*, vol. 3, pp. 2805-2814, jul. 2023, doi: 10.1017/pds.2023.281.
- [19] W. Liao, X. Lu, Y. Fei, Y. Gu, y Y. Huang, «Generative AI design for building structures», *Automation in Construction*, vol. 157, p. 105187, ene. 2024, doi: 10.1016/j.autcon.2023.105187.
- [20] S. BuHamdan, A. Alwisy, y A. Bouferguene, «Generative systems in the architecture, engineering and construction industry: A systematic review and analysis», *International Journal of Architectural Computing*, vol. 19, n.º 3, pp. 226-249, sep. 2021, doi: 10.1177/1478077120934126.
- [21] S. Abrishami, J. S. Goulding, F. P. Rahimian, y A. Ganah, «Integration of BIM and generative design to exploit AEC conceptual design innovation», *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, vol. 19, n.º 21, pp. 350-359, sep. 2014.
- [22] A. Leitão, R. Fernandes, y L. Santos, «Pushing the Envelope: Stretching the Limits of Generative Design», en *Blucher Design Proceedings*, Blucher Proceedings, ene. 2015, pp. 235-238. doi: 10.5151/despro-sigradi2013-0043.
- [23] J. H. Holland, «Genetic Algorithms and Adaptation», en *Adaptive Control of Ill-Defined Systems*, O. G. Selfridge, E. L. Rissland, y M. A. Arbib, Eds., Boston, MA: Springer US, 1984, pp. 317-333. doi: 10.1007/978-1-4684-8941-5_21.
- [24] N. Rane, «Transforming Structural Engineering through ChatGPT and

- Similar Generative Artificial Intelligence: Roles, Challenges, and Opportunities», SSRN, sep. 2023, doi: 10.2139/ssrn.4603242.
- [25] M. Soori y F. K. G. Jough, «Artificial Intelligent in Optimization of Steel Moment Frame Structures: A Review», *International Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 18, n.º 3, pp. 141-158, mar. 2024.
- [26] M. Afzal, R. Y. M. Li, M. F. Ayyub, M. Shoaib, y M. Bilal, «Towards BIM-Based Sustainable Structural Design Optimization: A Systematic Review and Industry Perspective», *Sustainability*, vol. 15, n.º 20, Art. n.º 20, ene. 2023, doi: 10.3390/su152015117.
- [27] G. Díaz *et al.*, «Aplicaciones del diseño generativo en la ingeniería estructural», *Revista ingeniería de construcción*, vol. 36, n.º 1, pp. 29-47, abr. 2021, doi: 10.4067/S0718-50732021000100029.
- [28] J. L. Pardal-Refoyo, «Los artículos de revisión. Orientaciones para los autores y revisores», *Revista ORL*, vol. 14, n.º 3, Art. n.º 3, sep. 2023, doi: 10.14201/orl.31646.
- [29] A. Vuotto, V. Di Césare, y N. Pallotta, «Fortalezas y debilidades de las principales bases de datos de información científica desde una perspectiva bibliométrica», *Palabra clave*, vol. 10, n.º 1, p. e101, oct. 2020, doi: 10.24215/18539912e101.
- [30] M. Amezcua, «La Búsqueda Bibliográfica en diez pasos», *Index de Enfermería*, vol. 24, n.º 1-2, pp. 14-14, jun. 2015, doi: 10.4321/S1132-12962015000100028.
- [31] G. A. S. Tajés, J. M. Salgado, F. A. N. D'agostino, y N. A. Vizioli, «Búsqueda de información científica en ciencias de la salud: conceptos, herramientas y valoración de los resultados.», *Revista ConCiencia*, vol. 8, n.º 2, Art. n.º 2, jul. 2023, doi: 10.32654/ConCiencia.8-2.1.
- [32] A. Kralj y D. Skejić, «Generative Design of Structural Steel Joints», *Advances in Civil and Architectural Engineering*, vol. 12, n.º 23, Art. n.º 23, 2021.
- [33] European Committee for Standardization (CEN) 2014, «Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-8: Design of Joints (EN 1993-1-8:2005+AC:2009)».
- [34] M. Wilhelmsen, «Structural Optimization of Pile Foundation with the use of Generative Design and Machine Learning.», Master thesis, NTNU, 2020. Accedido: 6 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2779991>
- [35] D. Henríquez, R. F. Herrera, y J. C. Vielma, «Method for Designing Prequalified Connections Using Generative Design», *Buildings*, vol. 12, n.º 10, Art. n.º 10, oct. 2022, doi: 10.3390/buildings12101579.
- [36] F. Alkhatib, N. Kasim, S. Qaidi, H. M. Najm, y M. M. Sabri Sabri, «Wind-resistant structural optimization of irregular tall building using CFD and improved genetic algorithm for sustainable and cost-effective design», *Front. Energy Res.*, vol. 10, oct. 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.1017813.
- [37] E. Duong, «Automation of Steel Shear Connection Design using Generative Design», Master of Science, University of Alberta, 2023. doi: 10.7939/r3-82y2-6e12.
- [38] F. Alsakka, A. Haddad, F. Ezzedine, G. Salami, M. Dabaghi, y F. Hamzeh, «Generative design for more economical and environmentally sustainable reinforced concrete structures», *Journal of Cleaner Production*, vol. 387, p. 135829, feb. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135829.
- [39] F. Ljubinković, J. Conde, H. Gervásio, y L. S. da Silva, «A methodology to assess structural design efficiency», *Structures*, vol. 58, p. 105366, dic. 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2023.105366.

- [40]Y. Feng, Y. Fei, Y. Lin, W. Liao, y X. Lu, «Intelligent Generative Design for Shear Wall Cross-Sectional Size Using Rule-Embedded Generative Adversarial Network», *Journal of Structural Engineering*, vol. 149, n.º 11, p. 04023161, nov. 2023, doi: 10.1061/JSENDH.STENG-12206.
- [41]K.-H. Chang y C.-Y. Cheng, «Learning to Simulate and Design for Structural Engineering».
- [42]J.-H. Jeong y H. Jo, «Deep reinforcement learning for automated design of reinforced concrete structures», *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 36, n.º 12, pp. 1508-1529, 2021, doi: 10.1111/mice.12773.

9. LICENCIA Y DERECHO DE AUTOR

Esta obra está licenciada bajo la Licencia Creative Commons Atribución Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Los autores conservan los derechos de autor de los artículos publicados y otorgan al editor el derecho a publicarlos, a ser citados como su editor original en caso de reutilización y a distribuirlos en todos los formatos y medios.

10. LICENSE & COPYRIGHT

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-NC-SA 4.0)

Authors retain copyright of the published papers and grant to the publisher the right to publish the article, to be cited as its original publisher in case of reuse, and to distribute it in all forms and media.