



APLICACIÓN DEL MÉTODO DE DISEÑO GENERATIVO EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN EN EL MARCO DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

APPLICATION OF THE GENERATIVE DESIGN METHOD IN THE CONSTRUCTION SECTOR WITHIN THE FRAMEWORK OF THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

Gino Giuseppe, Pannillo Majano¹

Recibido 29/07/2024; Aprobado: 14/11/2024

DOI: <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica261.5>

RESUMEN

Las Organización de las Naciones Unidas desde el 2015, se propone para el manejo a nivel mundial los Objetivos de Desarrollo Sostenible, y específicamente en el sector construcción correspondiendo al objetivo 11, los profesionales del sector arquitectura, ingeniería y de la construcción tienen un papel crucial en este contexto, dado que es responsable del diseño, construcción y mantenimiento del entorno construido, lo que implica un impacto significativo en varios indicadores de sostenibilidad. Sin embargo, enfrenta desafíos complejos, especialmente en países como Venezuela, donde problemas multidiscplinarios dificultan el avance hacia estos objetivos. Pero es de observar, que el avance en el uso de la digitalización e implementación de tecnologías innovadoras son vistas como soluciones clave para mejorar la sostenibilidad en dichas áreas. El uso de herramientas como el Modelado de Información de Construcción, y el Diseño Generativo se presenta como una estrategia para optimizar el diseño arquitectónico y estructural, permitiendo una mejor integración de la sostenibilidad desde las etapas iniciales de los proyectos. En este documento abordado como una investigación de tipo documental, se concluye que la combinación de Building Information Modeling y el Diseño Generativo puede facilitar la creación de soluciones de diseño más eficientes y sostenibles, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, promoviendo así un entorno construido más responsable y resiliente.

Palabras clave: *objetivos de desarrollo sostenible; ODS; arquitectura ingeniería y construcción; AEC; sostenibilidad, modelado de información de construcción; BIM; diseño generativo*

¹Gino Giuseppe, Pannillo Majano. Docente investigador de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. 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/0000-0003-0464-7170>

ABSTRACT

The United Nations Organization since 2015, the Sustainable Development Goals have been proposed for global management, and specifically in the construction sector corresponding to objective 11, professionals in the architecture, engineering and construction sector have a crucial role in this context, given that it is responsible for the design, construction and maintenance of the built environment, which implies a significant impact on several sustainability indicators. However, it faces complex challenges, especially in countries like Venezuela, where multidisciplinary problems make it hard to gain progress towards these objectives. But it should be noted that progress in the use of digitalization and implementation of innovative technologies are seen as key solutions to improve sustainability in these areas. The use of tools such as Building Information Modeling and Generative Design is presented as a strategy to optimize architectural and structural design, allowing better integration of sustainability from the initial stages of projects. In this document, approached as a documentary-type investigation, it is concluded that the combination of BIM and DG can facilitate the creation of more efficient and sustainable design solutions, aligned with the Sustainable Development Goals, thus promoting a more responsible and sustainable built environment.

Keywords: *sustainable development goals; SDG; architecture engineering and construction; AEC; sustainability, building information modeling; BIM; generative design*

1. INTRODUCCIÓN

En 2015, los 193 estados miembros de las Naciones Unidas acordaron los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), respaldados por 169 metas y 231 indicadores globales [1]; donde la arquitectura, ingeniería y construcción (AEC) son sectores que tienen un papel preponderante para el logro de dichos objetivos [2]. En el 2021, se reúnen los líderes mundiales en la 26ª Conferencia de las Naciones Unidas y el punto clave sobre el cual trabajaron fue sobre el cambio climático para establecer una visión de construcción para un entorno con cero emisiones y resilientes [3].

La sostenibilidad de la infraestructura civil es fundamental para los profesionales y propietarios de proyectos reguladores, e inherentemente a la AEC, responsable del diseño, planificación, construcción y mantenimiento del entorno construido, desempeñando así un papel fundamental en el apoyo y liderando estos esfuerzos [3,4]. Ahora bien, con el propósito de digitalizar la industria AEC mediante la implementación e integrando tecnologías innovadoras en las principales prácticas de la industria, todos los sectores se han visto afectados por las transiciones digitales, económicas y demográficas [5]; ha promovido el cambio en los paradigmas de la industria de la construcción, permitiendo implementar soluciones estratégicas con el fin de mitigar el impacto ambiental [6]. Por lo que, un número cada vez mayor de investigadores y profesionales abogan por una comprensión sistémica de la sostenibilidad [7]. En lo que respecta a este estudio, la revisión de la literatura reveló que la investigación está centrada en vincular las prácticas actuales, incluidas las prácticas de

construcción sostenible, con los ODS [8].

2. DESARROLLO

La Agenda 2030 desarrollada en la Organización de las Naciones Unidas (ONU) correspondiente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (ver Figura 1), esbozan nuevas oportunidades para que el sector de la construcción amplíe su enfoque [9]; considerando que dicho sector tiene gran responsabilidad en la consecución de varios de los objetivos de dicho desarrollo sostenible [1].



Figura 1. Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU. Fuente: [9]

Ahora bien, en los últimos tiempos se ha creado un contexto de mucha presión sobre el mantenimiento del ambiental donde el sector de la construcción tiene mayor impacto en varios indicadores [10]. Es de observar, que el 17 % de las metas de los ODS dependen directamente del sector de la construcción e inmobiliario, y el 27 % dependen indirectamente de las actividades de estos sectores; específicamente los objetivos con las mayores contribuciones a los ODS son el 11, 6 y 7 [9] (ver Figura 2). En el caso de Venezuela el sector construcción enfrenta problemas complejos por diversas causas, y las consecuencias derivadas obligan al país a alejarse de los objetivos de desarrollo sostenible establecidos por la ONU para 2030 [11].

Analizando la literatura, se aprecia que existe un vínculo que obliga a incorporar las metas de impacto de los ODS en la etapa de diseño de un proyecto de infraestructura, fuertemente ligado a seguir desligando la sostenibilidad de la digitalización, aspecto visto como problema de los proyectos de construcción actuales es que, con demasiada frecuencia, la sostenibilidad y la digitalización todavía se ven como dos temas separados. Por lo que, se requiere instrumentos que sean capaces de modelar digitalmente varios escenarios de dicho desarrollo sostenible [3, 4].

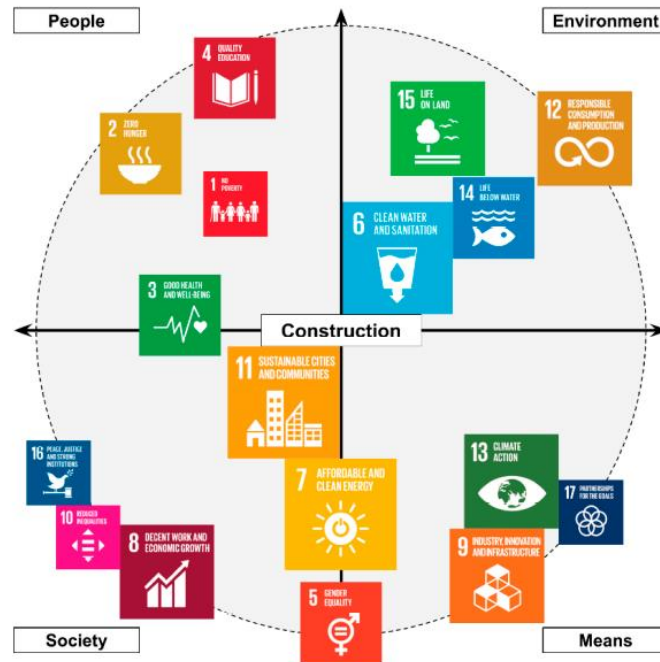


Figura 2. Mapa ilustrativo de la dependencia de los ODS de las actividades de construcción e inmobiliaria.
Fuente: [9]

La sustentabilidad hablando en el área de la ingeniería ha sido uno tema presente en el tapete económico y social en los últimos años, se espera que las propuestas que surjan de las investigaciones y aplicaciones de los ODS, permitan encaminarse hacia nuevas soluciones en arquitectura e ingeniería enfocados hacia el beneficio ambiental [12]. El argumento del diseño se ha centrado tradicionalmente en el de ingeniería, contemplando cambios profundos y tendencias emergentes en cuanto a la transformación digital, teniendo en consecuencia que los diseñadores de ingeniería se enfrenten a desafíos nuevos y complejos [13]. El avance en herramientas digitales ha liderado el camino en la construcción de unidades más limpias y eficientes energéticamente; tales herramientas servicios digitales son cada vez más difundidos y se están afianzando en diferentes etapas del proceso de diseño de estructuras [14, 15].

Es de destacar, que el desarrollo de infraestructura basándose en una demanda de servicios en el sector AEC ha provocado numerosas implicaciones ambientales desfavorables, por lo que, considerar el Modelado de Información de Construcción (BIM) favorece como tecnología emergente mejorar el diseño de dichas infraestructuras [16]. La sostenibilidad del entorno construido se ha convertido en una preocupación crítica a nivel mundial, sin embargo, un desafío central considerar en el proceso la variedad de objetivos y compensaciones. Por ende, el objetivo fundamental del diseño sostenible para el entorno construido es optimizar el rendimiento de los edificios para minimizar su impacto en el medio ambiente [17].

[illegible]

Es de observar, que los conceptos de sustentabilidad y eficiencia en la AEC están comenzando a afianzarse, destacando una profunda preocupación en las últimas décadas; actualmente, los edificios son responsables del 40% del consumo de energía en Europa y, por lo tanto, hay un creciente interés en reducir su uso. Por lo que, el desarrollo de herramientas

computacionales y el enfoque de optimización estructural combinados en el diseño son prioridad en el proceso, los nuevos avances tecnológicos han llevado el “nivel de automatización” a un nivel clave como factor fundamental en el éxito de los proyectos [23, 24]. Cabe destacar, que el diseño tradicional en papel ha sido reemplazado por el CAD a finales del siglo XX, facilitando la edición y revisión del proceso, pero ahora con la introducción del enfoque BIM supone una revolución en el proceso de diseño, considerando que permite manejar cambios e integración de toda la información de diseño [25].

2.1. Modelado de Información de Construcción

El Modelado de Información de Construcción (BIM) es el primer paso, tal como refirió Bastos et al. [24], hacia la implementación de la revolución industrial 4.0. Las soluciones que aporta BIM permite proporcionar plataformas para el diseño computacional y enfoques novedosos en la industria AEC. La fase de concepción y diseño de los proyectos se desarrollan de forma tradicional utilizando softwares como el CAD para la elaboración de planos, o BIM para el diseño y/o modelado de estructuras, realizando tareas manuales ya sea para la extracción de mediciones, intercambio de información o modelado, esto implica una falta de eficiencia en muchos porque a pesar de contar con modernas herramientas computacionales, no se aprovecha todo el potencial que ofrecen [26].

En el diseño computacional se utilizan procedimientos paramétricos, generativos o algorítmicos para apoyar, optimizar, o reemplazar los procesos manuales, por lo que, la combinación de BIM y formas de DG, conforman un híbrido que pretende combinar las ventajas de ambos conceptos, permitiendo procesos de DG con la creación de objetos BIM que contienen metadatos. Se busca tener a disposición métodos computacionales que puedan generar automáticamente múltiples soluciones, o alternativas a los problemas de diseño [27, 28].

Sin embargo, a pesar de los muchos enfoques de diseño que ya se han propuesto, son todos lentos y tediosos para cumplir con un conjunto de soluciones propuestas para abordar este problema, es donde entra en juego el enfoque de DG. Varios campos han estado utilizando este rumbo para abordar el problema en el proceso de diseño [29], por lo que, los avances en DG ofrecen un gran potencial para mejorar la experiencia de diseño en la búsqueda de mitigar este desafío [30]. Cabe destacar, que el uso del DG se introduce como novedoso brindándole a los diseñadores la oportunidad de aprovechar las capacidades computacionales en la exploración de alternativas [31].

El diseño paramétrico que ha surgido en los últimos tiempos, se ha hecho popular entre los arquitectos y otros diseñadores [32], permitiendo el software disponible la creación de soluciones basadas en algoritmos visuales o líneas de códigos [33]. Por su lado, el DG se presenta como el proceso que se basa en la utilización de algoritmos para la creación de formas que respetan la arquitectura y estructura, así como, los códigos de diseño definidos por el diseñador [20]; aspecto que ha llevado a los investigadores a explorar el empleo de sistemas generativos para apoyar las prácticas de diseño en la industria de la AEC [34]. El DG se introduce en el proceso como un enfoque disruptivo que maneja de manera eficiente el cambio y la complejidad de los datos, con esto se pretende es estudiar los cambios que van surgiendo en el proceso de diseño, proponiéndose a su vez nuevos métodos que aprovechen el enfoque DG [25].

En los últimos años, la industria AEC ha comenzado a enfrentarse con varias técnicas nuevas y tecnologías pertenecientes a este campo, como algoritmos inteligentes, análisis de big data; constituyendo una forma diferente de hacer a un lado bloqueos creativos al dejar que la computadora genere alternativas. El diseñador puede explorar una gama más amplia de posibles diseños de productos en un tiempo comparativamente menor [35, 36]. Por otro lado, a través de BIM la información relevante se puede encapsular y organizar, es aquí donde los enfoques de diseño computacional pueden aprovechar la capacidad computacional para generar, representar y evaluar soluciones [37]. Por tanto, la aplicación de BIM en la AEC puede adoptar plenamente nuevos métodos como el DG. Actualmente, los diseñadores adoptan el soporte computacional en una etapa mucho más avanzada en el proceso de diseño, por lo que, la aplicación del DG dentro de las herramientas existentes podría ayudar al diseñador a resolver problemas complejos de diseño multicriterio [38].

3. APLICACIONES DE DISEÑOS OPTIMIZADOS

3.1. Diseño Impulsado por la Optimización en la Industria de la AEC

El estudio que se presenta a continuación, recopila la integración de algoritmos de DG a los existentes, considerando que la plataforma BIM podría cerrar esta brecha generando soluciones de diseño y transformándolas en las próximas etapas de desarrollo, detallado y diseño, además, de las múltiples contribuciones en este campo para establecer una visión amplia de su rol en el marco de los ODS. La era digital ha contribuido a una transición entre la forma en que se diseña y construye para la industria AEC, sin embargo, a pesar de diversos grupos de investigación del ámbito académico que han trabajado en el campo del diseño basado en computadora, la informática y los enfoques digitalizados asociados, es sólo

Revista Gaceta Técnica. Artículo de Divulgación. 26(1), 72-88, enero-junio, 2025

ISSN: 2477-9539



recientemente que son un gran punto de apoyo para generar arquitectura y diseños de ingeniería estructural de manera automática.

Los métodos de optimización que están integrados mediante el uso de algoritmos para problemas combinatorios y numéricos, simultáneamente, proporcionan soluciones óptimas diversificadas, por lo que las principales empresas de arquitectura han adoptado este tipo de diseño automatizado. Los beneficios proporcionados por el diseño paramétrico se pueden ver en varias obras contemporáneas, por ejemplo, en el campo del diseño estructural optimizado (SDO) un proyecto reciente fue llevado a cabo por la empresa OptiStructure Service (<http://www.optistrucre.eu/>), presentándose con el objetivo de los desafíos y beneficios del diseño paramétrico enfocado en la optimización en el proceso de la ingeniería estructural.

Otro proyecto, referido al Parque empresarial Oxygen – Fase II, Noida, India, impulsado por Inference Oxygen Business Park Private Limited Company (<https://property.jll.co.in/listings/oxygen-business-park-phase-2-tower-2-plot-no-7-sector-144>), cuenta actualmente con ocho edificios. La fase II se destinó a estar compuesta de edificios de oficinas con una superficie aproximadamente de 78038 m², y la superficie bruta total del nuevo edificio es igual a 5800 m² y se refiere a un edificio de 15 plantas. El sistema estructural está compuesto por armaduras elementos estructurales de concreto armado, con columnas, vigas, muros de corte y losas; cuyas dimensiones de referencia fueron proporcionadas por el diseño del modelo original, donde la mayoría de las dimensiones se consideraron optimizables (ver Figura 4).

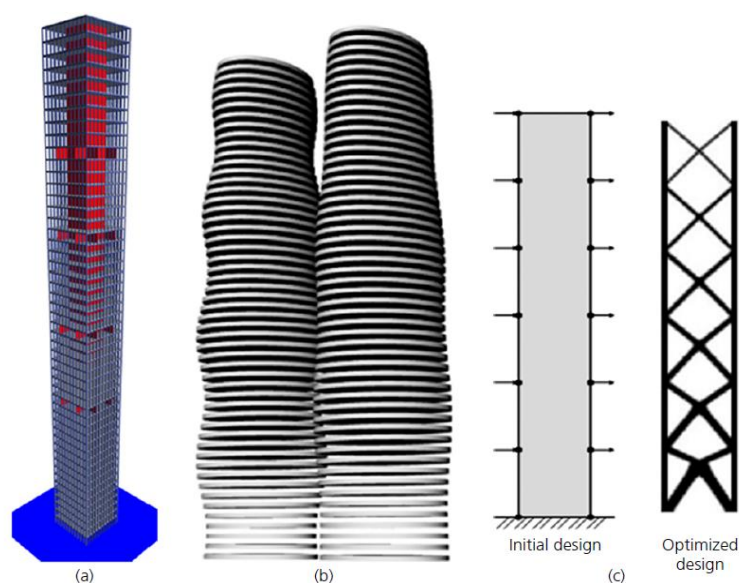


Figura 4. Las tres clases de optimización estructural: (a) dimensionamiento, (b) forma, topología. Fuente: [15]

El edificio ha sido diseñado de manera óptima para cumplir con los requisitos de ANSI/AISC

360-10 [39]. Para formular la optimización problema, los miembros se dividieron en grupos, y el costo del material se consideró como el criterio a minimizar, los requisitos de energía y los gases de efecto invernadero [15]. Se establecieron tres clases de optimización estructural:

- Dimensionamiento: elementos estructurales del sistema estructural del rascacielos
- Forma: diseño paramétrico de una torre
- Topología: diseño inicial en oposición a optimizado)

Este estudio ha analizado direcciones potenciales para el uso de enfoques digitalizados paramétricos y basados en la optimización, además, el poder de los procedimientos de diseño basados en algoritmos (ver Tabla 1). Ahora bien, comparando los dos diseños antes y después de ser mejorado con herramientas de diseño, se puede observar que resolviendo el problema de optimización condujo a un beneficio ambiental de más del 7,0% con respecto tanto al consumo energético como al efecto invernadero emisiones de dióxido de carbono; mientras tanto, el costo la reducción alcanzada fue igual al 7,45%. De la breve revisión presentada sobre el diseño basado en el desempeño integrado con modelado paramétrico, simulación y numérica optimización, se han implementado en los flujos de trabajo de la industria AEC [15].

Tabla 1. Proyecto de edificio de quince plantas Oxygen Business Park – fase II: diseños de referencia y optimizados. Fuente: adaptado por el autor de [15]

	Diseño inicial	Diseño optimizado	Reducción (%)
Costo de materiales (millones euros)	5,50	5,09	7,45
Volumen de concreto (m ³)	22090,20	20281,11	8,19
Masa reforzada (t)	5649,33	5250,63	7,08
Emisiones de gases de efecto invernadero (millones kg)	16,29	15,08	7,43
Consumo de energía (billones BTU)	556,67	515,95	7,32

3.2. Sistemas de Certificación de Sostenibilidad como Metas en un Sistema de Diseño Generativo

Se han desarrollado una multitud de sistemas de certificación de sostenibilidad como la LEED 4.0. [40], pero quedan dudas sobre la aplicación de éstos en la práctica y cuán efectivos serán a lo largo del ciclo de vida del edificio, tanto en términos de reducción de energía como de economía. Estos sistemas de certificación han evolucionado durante las últimas tres décadas y ahora tienden a incluir más aspectos de los tres pilares de la sostenibilidad: factores ambientales, sociales y económicos. Ahora bien, en el trabajo que se presenta a continuación ha sido cubierto por varios de los sistemas de certificación, se centra en la luz del día y el rendimiento energético como categorías seleccionadas para el estudio debido a su posible

conflicto. Corresponde a un sistema de diseño hospitalario generativo complejo, con análisis integrado para respaldar la puntuación automatizada de las certificaciones de sostenibilidad. [17] (ver Figura 5)

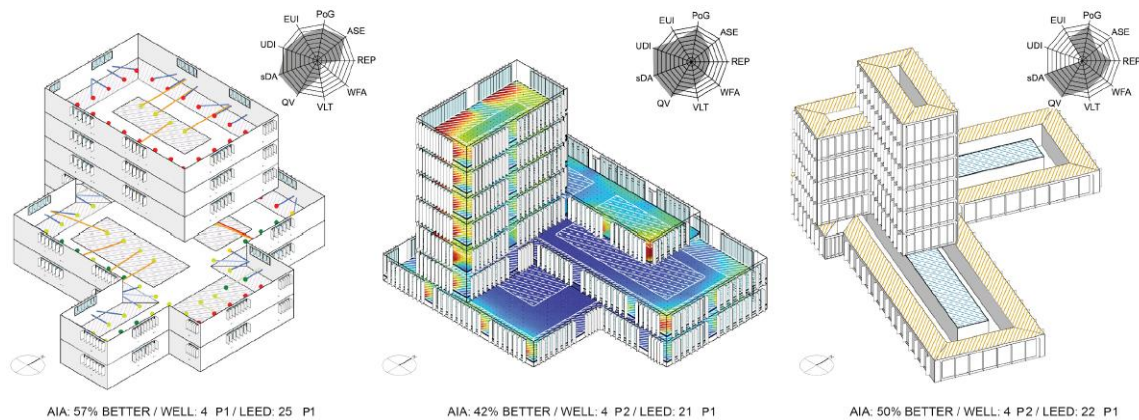


Figura 5. Sistema de diseño hospitalario generativo complejo. Fuente: [17]

Tanto la luz del día como el rendimiento energético requieren simulaciones que sirvan como documentación para la acreditación, estas categorías están alineadas con la automatización y optimización. Se utilizó ClimateStudio con EnergyPlus (<https://climatestudiodocs.com/docs/energyPlus.html>) como simulador dentro de la herramienta de programación visual Grasshopper (<https://www.grasshopper3d.com/>). Adicionalmente se empleó Wallacei X (<https://www.wallacei.com/>) como sistema de optimización que implementa el algoritmo genético NSGA-II [41], en este trabajo el objetivo era la certificación LEED 4.0 [40]. Hay que considerar que aplicar estrategias para lograr las metas del desarrollo sostenible, requiere agilidad para adaptarse a objetivos cambiantes pudiéndose convertir en una complejidad cada vez mayor. Por tanto, la automatización de gran parte del proceso, especialmente en las primeras etapas de la fase de diseño, puede mitigar potencialmente el costo de la aplicación de tales estrategias, además, la automatización puede eliminar la duplicación de esfuerzos, aumentar la legibilidad de los objetivos y la eficacia de los indicadores de sostenibilidad.

El resultado de aplicar la simulación ha dado lugar a confrontaciones implícitas entre las métricas, lo que evidencia que es requerido que los indicadores de sostenibilidad funcionen en conjunto durante todo el proceso de diseño. Al crear sistemas de diseño que pueden generar las variaciones necesarias para explorar las interacciones entre las ventajas y desventajas, estos sistemas computacionales pueden ayudar a encontrar diseños que mejoren la sustentabilidad según lo verificado por las certificaciones.

3.3. Marco Basado en BIM y Banco de Datos para Reutilizar Elementos Estructurales de Carga

La reutilización de elementos en el sector de la construcción es el más prometedor para evitar la producción de residuos, así como, la preservación de los recursos naturales y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero mediante disminución de la energía incorporada. A través del estudio que se expone a continuación, se propone una metodología basada en una cadena de herramientas para permitir ingenieros estructurales anticipar la futura reutilización. Esta metodología describe el diseño de sistemas de ensamblaje reversible, la adición de BIM, trazabilidad reforzada, y el desarrollo de un banco de materiales (ver Figura 6). Al mismo tiempo, controlar los impactos ambientales de la reutilización mediante la evaluación del ciclo de vida en todas las etapas del proyecto [10].

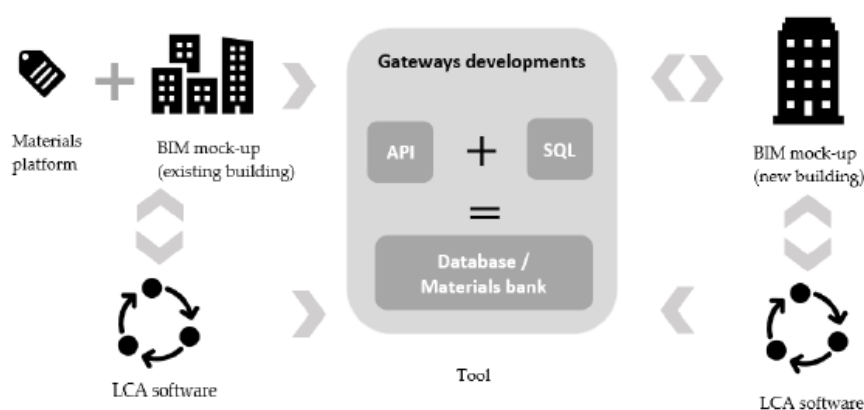


Figura 6. Cadena de herramientas utilizada para implementar el banco de materiales, a partir de modelos BIM, plataformas de materiales y datos ambientales Fuente: [10]

En este estudio se analiza dos escenarios de diseño para el diseño de reutilización: un escenario de "A", que conduce a la reutilización del 100% de los elementos, utilizando solo elementos del inventario y un escenario "B", que busca integrar la mayor cantidad de elementos reutilizados disponibles como sea posible. Primero se diseñó un edificio reutilizable (edificio A) para alimentar un banco de materiales para reutilización futura, el edificio tipo elegido (A) es un HRB de 41 pisos en estructura de columnas de acero, dicho escenario hizo posible reconstituir varios tipos de edificios, por ejemplo, A1, o A2 o A3, utilizando todos los elementos (ver Figura 7). Para el segundo escenario se desarrolló un nuevo edificio (edificio B) intentando incorporar la mayor cantidad de elementos reutilizables del banco de materiales. El edificio de acero con elementos reutilizado es un edificio de 18 pisos de altura media-alta. En este estudio, se escogieron y utilizaron un software BIM y una herramienta de base de datos (ver Figura 8).

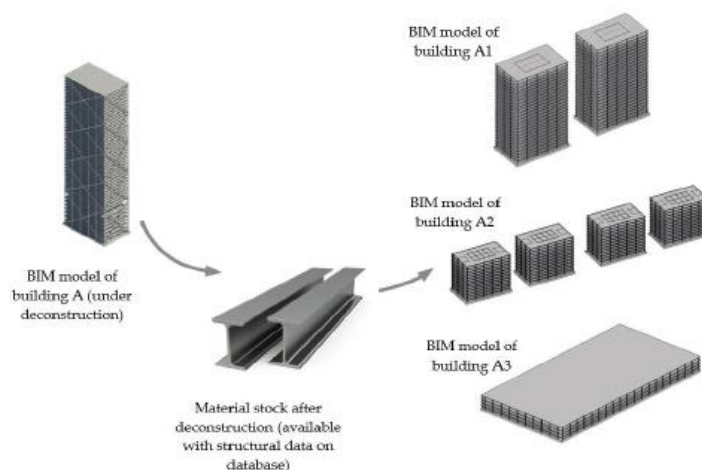


Figura 7. Escenario “A” con reconstrucción aplicada a partir de un stock inicial de elementos de edificios de gran altura (HRB). Fuente: [10]

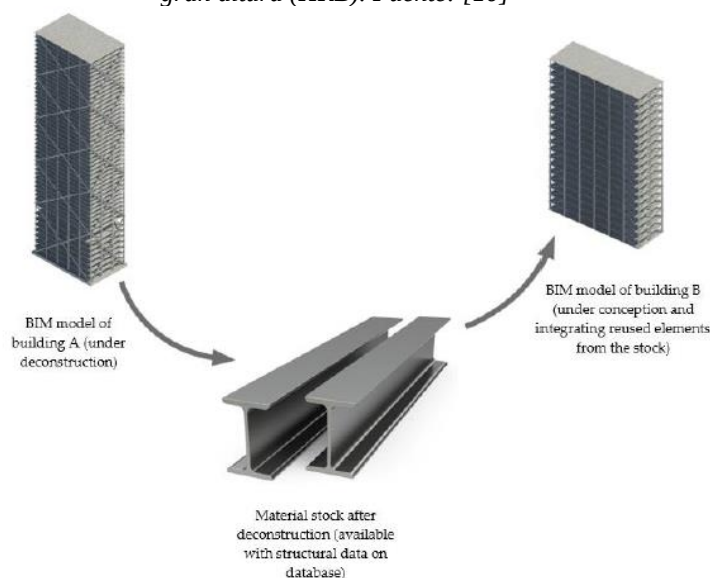


Figura 8. Escenario “B” con reconstrucción aplicada desde un HRB inicial hacia un nuevo edificio de media altura. Fuente: [10]

Este estudio ha demostrado la aplicación práctica de la reutilización a través de estudios de casos aplicados con un conjunto de herramientas y constituyen directrices para los profesionales. Los arreglos constructivos y la estructura, tipología alimentan el concepto de diseño para reutilización, que también se basa en un marco BIM y trazabilidad completa definida.

4. DISCUSIÓN

Este documento presenta los avances en el desarrollo de proyectos de investigación que se enfocan en cómo los ODS pueden ser implementado con éxito en proyectos de edificación sostenible, donde los sectores inmobiliarios y de la construcción son uno de los principales contribuyentes a la economía mundial y al mercado laboral. Los resultados preliminares de

este estudio exploratorio muestran que para seguir la Agenda 2030, los diferentes actores involucrados en proyectos de construcción sostenible deben pensar de manera diferente para garantizar la implementación exitosa de los ODS a lo largo de las diferentes fases de un proyecto de construcción.

Con la metodología de procesos desarrollada, y el uso temprano de BIM, la elección sostenible de productos y el ahorro de recursos el uso de productos de construcción podría recibir un apoyo significativo. La interfaz entre la sostenibilidad y la ingeniería, especialmente la arquitectura es multidimensional, por lo tanto, los problemas de investigación y el diseño cobra especial importancia. En cuanto a la tecnología BIM, su implementación se ha fortalecido en el último plan Estratégico de Construcción 4.0 bajo Agrupación de Tecnología - Simulación y Modelado [42], destacando que la adopción de nuevas tecnologías con nuevos métodos innovadores como BIM en la industria de la construcción. Además, el estudio destaca varias barreras actuales para la implementación de los ODS, y es un primer paso hacia el desarrollo de soluciones innovadoras, bajo el impulso de la sostenibilidad ambiental, se deben desarrollar herramientas de calificación para promover el desarrollo sostenible en la industria de la construcción. En el futuro, esto permitirá llevar a cabo la inspección y optimización de los distintos aspectos de sostenibilidad como parte del certificado de planificación de forma escalonada con la ayuda de herramientas de gestión de flujo de trabajo basadas en BIM.

En un proceso continuo de mejora de la productividad, tecnologías que permiten la automatización y los procesos se están probando y adoptando cada vez más en AEC, este estudio proporcionó una visión general del estado de investigación sobre automatización en el área. Por otro lado, el DG propone como un marco para realizar la generación automatizada de formas bajo reglas y restricciones de diseño específicas, actuando como una herramienta de apoyo para ingenieros y diseñadores. Los resultados observados en esta búsqueda mostraron la distinción de tres temas: Diseño sostenible y Modelado liderado por BIM, evaluación de la sostenibilidad del ciclo de vida, y construcción sustentable y performance. El trabajo futuro mapeará la influencia de las tecnologías de construcción 4.0 en los ODS y cuantificar la dirección de la influencia hacia el logro de cada meta.

5. FINANCIAMIENTO

Propio de los autores.

6. CONFLICTO DE INTERÉS

El autor declara no tener ningún conflicto de interés.

7. REFERENCIAS

- [1] A. Gade y M. Madsen, “Early prioritization of the United Nation's goals for sustainable development in construction projects” IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 588. doi:10.1088/1755-1315/588/5/052054, 2020
- [2] R. Horry, C.A. et al., “Environmental management systems in the architectural, engineering and construction sectors: a roadmap to aid the delivery of the sustainable development goals”, *Environ Dev Sustain* 24, 10585–10615, doi:10.1007/s10668-021-01874-3, 2022
- [3] J Bernegger, et al., “A new method combining BIM and GIS data to optimise the sustainability of new construction projects in Switzerland” IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1122 012052, doi:10.1088/1755-1315/1122/1/012052, 2022
- [4] P. Mansell, S. Philbin, T. Broyd y I. Nicholson, “Assessing the Impact of Infrastructure Projects on Global Sustainable Development Goals”, LONDON SOUTH BANK UNIVERSITY ICE Publishing. doi:10.1680/jensu.19.00044, 2019
- [5] A. Ammar, M. Hatoum, H. Nassereddine, y G. Dadi, “Synergies Between Construction 4.0 Technologies and Sustainable Construction: A Bibliometric Analysis” Conference: Creative Construction e-Conference, 365-370, doi:10.3311/CCC2022-046, 2022
- [6] C. Fagone, M. Santamicone, y V. Villa, “Architecture Engineering and Construction Industrial Framework for Circular Economy: Development of a Circular Construction Site Methodology”, *Sustainability*, 15, 1-23. doi:10.3390/su15031813, 2023
- [7] L. Ospina, et al., “Estimating networks of sustainable development goals” *Information & Management*, 59, 1-15. doi:10.1016/j.im.2020.103342, 2022
- [8] S. Goubran, y C. Cucuzzella, “Integrating the Sustainable Development Goals in Building Projects”. *Journal of Sustainability Research*, 1, 1-43, doi:10.20900/jsr20190010, 2019
- [9] S. Goubran, “On the Role of Construction in Achieving the SDGs”, *Journal of Sustainability Research*, 1, 1-52. doi:10.20900/jsr20190020, 2019
- [10] I. Bertin, et al. “A BIM-Based Framework and Databank for Reusing Load-Bearing Structural Elements”, *Sustainability*, 12, 1-24. doi:10.3390/su12083147, 2020
- [11] L. Pietrosemoli, C. Rodríguez, y Y. Nuñez, “Venezuela: Construction problems and sustainable construction. Collecting data to put the puzzle together. Part 1”, *AdvBuildEdu*, vol. 6, no. 1, pp. 63–79, doi:10.20868/abe.2022.1.4815, 2022
- [12] O. Kaplinski, “Architectural, Civil, and Infrastructure Engineering in View of Sustainability: Editor’s Comment”, *Sustainability*, 15, 1-7. doi:10.3390/su15075967, 2023
- [13] R. Jiao, J. Luo, J. Malmqvist, y J. Summers, “New design: opportunities for engineering

- design in an era of digital transformation”, *Journal of engineering design*, 33(10), 685–690. doi:10.1080/09544828.2022.2147270, 2022
- [14] Z. Alwan, et al., “Framework for parametric assessment of operational and embodied energy impacts utilizing BIM”, *Journal of Building Engineering*, 42, 1-15. doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102768, 2022
- [15] E. Frangedaki, et al., “Optimisation-driven design in the architectural, engineering and construction industry”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*, 1-12. doi:10.1680/jstbu.22.00032, 2022
- [16] R. Rooshdi, N. Ismail, S. Sahamir, y M. Marhani, “Integrative Assessment Framework of Building Information Modelling (BIM) and Sustainable Design for Green Highway Construction: A Review”, *Chemical Engineering Transactions*, 55-60. doi:10.3303/CET2189010, 2021
- [17] N. McGlashan, et al., “Sustainability Certification Systems as Goals in a Generative Design System”, *Society for Modeling & Simulation International (SCS)* (págs. 1-10). April 15-17: SimAUD, 2021
- [18] R. Yu, N. Gu, y M. Ostwald, “Architects’ Perceptions about Sustainable Design Practice and the Support Provided for This by Digital Tools: A Study in Australia”, *Sustainability*, 14, 1-18. doi:10.3390/su142113849, 2022
- [19] K. Patel, y R. Ruparathna, “Life cycle sustainability assessment of road infrastructure: a building information modeling-(BIM) based approach”, *International Journal Of Construction Management*, 1-10. doi:10.1080/15623599.2021.2017113, 2021
- [20] N. Kallioras y N. Lagaros, “MLGen: Generative Design Framework Based on Machine Learning and Topology Optimization” *Appl. Sci*, 11, 1-17. doi:10.3390/app112412044, 2021
- [21] UNESCO, “UNESCO Publications”, UNESCO Publications, Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380063>, 2021
- [22] A. Klarin y Q. Xiao, “Automation in architecture, engineering and construction: a scientometric analysis and implications for management”, *Engineering, Construction and Architectural Management*, doi:10.1108/ECAM-08-2022-0770, 2023
- [23] V. Tomei, et al., “Generative design of mega-structures: A structural grammar approach”, *Structures and Architecture*, 1169-1179. doi:10.1201/9781003023555-140, 2022
- [24] G. Bastos, et al., “Interoperability between Building Information Modelling (BIM) and Building Energy Model (BEM)” *Appl. Sci*, 11, 1-20. doi:10.3390/app11052167, 2021
- [25] N. Korqa, “Generative design for BIM Its Influence in the Design Process”, *Tecnico Lisboa*, Disponible en <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090414087/ExtendedAbstract.pdf>, 2015
- [26] L. Quispe, “Application of BIM Tools in Parametric and Generative Design for the Conception of Complex Structures”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1-11. doi:10.1088/1757-899X/1203/2/022070, 2021

- [27] S. Pibal, K. Khoss, y I. Kovacic, “Framework of an algorithm-aided BIM approach for modular residential building information models”, *International Journal of Architectural Computing*, 20(4), 777–800. doi:10.1177/14780771221138320, 2022
- [28] C. Sydora y E. Stroulia, “Poster Abstract: Generative Interior Design using BIM”, *Proceedings of The 6th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation*, New York, 354-355. doi:10.1145/3360322.3360997, 2019
- [29] P. Shrestha, et al., “Generative Design Approach For Product Development”, *The 7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology*, 1-9. doi:10.1063/5.0065031, 2021
- [30] S. Abrishami, et al., “Generative BIM workspace for AEC conceptual design automation: prototype development” *Engineering, Construction and Architectural Management*, doi:10.1108/ECAM-04-2020-0256, 2020
- [31] J. Mikkavaara y M. Sandberg, “Architectural Design Exploration Using Generative Design: Framework Development and Case Study of a Residential Block”, *Buildings*, 10, 1-17. doi:10.3390/buildings10110201, 2020
- [32] I. Caetano, L. Santos, y A. Leitao, “Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design”, *Frontiers of Architectural Research*, 9, 287-300. doi: 10.1016/j.foar.2019.12.008, 2019
- [33] D. Sedzicki, et al., “Computer-Aided Automated Greenery Design—Towards a Green BIM”, *Sustainability*, 14, 1-20. doi:10.3390/su14148927, 2022
- [34] S. BuHamdan, A. Alwisy, y A. Bouferguene, “Generative systems in the architecture, engineering and construction industry: A systematic review and análisis”, *International Journal of Architectural Computing*, 1-24. doi:10.1177/147807712093412, 2020
- [35] I. Paduano, A. Mileto, y E. Lofrano, “A Perspective on AI-Based Image Analysis and Utilization Technologies in Building Engineering: Recent Developments and New Directions”, *Buildings*, 13, 1-15. doi:10.3390/buildings13051198, 2023
- [36] G. Acosta, J. Alcaide, y J. Diego, “Evolution and future trends in generative product design”, *Proceedings of DARCH 2022 2nd International Conference on Architecture & Design*, 74-85, Disponible en: https://www.ocrints.org/darch22_e-publication/papers/Gonzalo%20Acosta%20Zazueta2.pdf, 2022
- [37] J. Mikkavaara, Exploration and Optimization of Building Design Solutions using Computational Design, Luleå: Luleå University of Technology, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Disponible en: <http://www.ltu.se/shb>, 2021
- [38] S. Abrishami, et al., “Virtual Generative BIM Workspace for Maximising AEC Conceptual Design Innovation: A Paradigm of Future Opportunities” *Construction Innovation*, 15(1), doi:10.1108/CI-07-2014-0036, 2015
- [39] ANSI/AISC 360-10, “Especificación ANSI/AISC 360-10 para Construcciones de Acero”, Basado en “Specification for Structural Steel Buildings” (estándar nacional estadounidense ANSI/AISC 360-10), American Institute of Steel Construction (AISC),

Chile, 2010

- [40] Green Building Council, “*LEED Reference Guide for Building Design and Construction*”, V4 Textbook Binding, U.S. Green Building Council, 2013
- [41] K. Deb et al., “*A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*”, Technical report, Indian Institute of Technology, Kanpur: Kanpur Genetic Algorithms Laboratory (KanGAL), Vol 15, 2000
- [42] R. Pérez, “Construcción 4.0 y sus cuatro pilares tecnológicos fundamentales”, Blog de Hiberus, Disponible en: <https://www.hiberus.com/crecemos-contigo/construccion-4-0-y-sus-cuatro-pilares-tecnologicos-fundamentales/>, 2020