

Impacto de la Tecnología BIM en la Eficiencia y Sostenibilidad de Proyectos Arquitectónicos

Impact of BIM Technology on the Efficiency and Sustainability of Architectural Projects

EÍDOS N°24
Revista Científica de Arquitectura y Urbanismo
ISSN: 1390-5007
revistas.ute.edu.ec/index.php/eidos

¹Patricio Fernando Pérez Suárez, ²Diego Francisco Solano Zambrano, ³Sofía Lorena Sornoza Alarcón, ⁴Evelyn Andrea Chérrez Córdova

¹Universidad UTE, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Departamento de Arquitectura, Calle Rumipamba S/N y Bourgeois, Quito, Ecuador. patriciof.perez@ute.edu.ec. ORCID: 0000-0002-5858-4091

²Universidad UTE, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Departamento de Arquitectura, Calle Rumipamba S/N y Bourgeois, Quito, Ecuador. diego.solano@ute.edu.ec. ORCID: 0009-0004-5424-1472

³Universidad UTE, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Departamento de Arquitectura, Calle Rumipamba S/N y Bourgeois, Quito, Ecuador. sofia.sornoza@ute.edu.ec. ORCID: 0009-0004-6463-8350

⁴Universidad UTE, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Departamento de Arquitectura, Calle Rumipamba S/N y Bourgeois, Quito, Ecuador. evelyn.cherrez@ute.edu.ec. ORCID: 0009-0003-8607-0391

Resumen:

El Modelado de Información de Construcción (BIM, por sus siglas en inglés) ha transformado radicalmente la industria de la arquitectura, al permitir una gestión integral de proyectos desde su concepción hasta su mantenimiento. Este artículo explora el impacto de BIM en la eficiencia y sostenibilidad de los proyectos arquitectónicos. A través de una investigación exhaustiva y el análisis de casos de estudio, se demuestra que BIM mejora la coordinación entre equipos, reduce errores de diseño y facilita la integración de sistemas sostenibles. La adopción de BIM resulta en una mayor precisión en la fase de diseño, lo que conduce a una disminución de costos y tiempos de construcción. Además, BIM facilita la identificación y resolución temprana de conflictos, lo que promueve la eficiencia en la ejecución del proyecto. Igualmente, BIM contribuye a la sostenibilidad, al permitir la simulación de impactos ambientales y la optimización de recursos energéticos.

La colaboración multidisciplinaria es clave para aprovechar al máximo los beneficios de BIM, subrayando la importancia de la educación continua y la estandarización de procesos en la industria de la construcción. En conclusión, BIM se consolida como una herramienta esencial para el diseño y la construcción de edificios eficientes y sostenibles. A pesar de los desafíos persistentes, como la interoperabilidad de datos y la resistencia al cambio, es fundamental abordarlos para lograr la plena implementación de BIM en la práctica arquitectónica y constructiva.

Palabras claves: Modelado de Información de Construcción (BIM), eficiencia, sostenibilidad, proyectos arquitectónicos, integración de sistemas, colaboración multidisciplinaria.

Abstract:

Building Information Modeling (BIM) has revolutionized the architecture industry by enabling comprehensive project management from conception to maintenance. This article examines the impact of BIM on the efficiency and sustainability of architectural projects. Through a thorough literature review and case study analysis, it is evidenced that BIM optimizes coordination between teams, reduces design errors, and enables better integration of sustainable systems. The adoption of BIM leads to greater accuracy in the design phase, minimizing costs and construction times. Additionally, BIM facilitates early identification and resolution of conflicts, promoting efficiency in project execution. Furthermore, BIM enhances sustainability by allowing for the simulation of environmental impacts and the

optimization of energy resources. Multidisciplinary collaboration is crucial to fully harness the benefits of BIM, emphasizing the importance of continuous training and process standardization in the construction industry. In conclusion, BIM emerges as an indispensable tool for the design and construction of efficient and sustainable buildings. However, challenges such as data interoperability and resistance to change persist and must be addressed for its full implementation.

Keywords: *Building Information Modeling (BIM), efficiency, sustainability, architectural projects, system integration, multidisciplinary collaboration.*

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la arquitectura y la construcción desempeñan un papel fundamental en la configuración de nuestro entorno construido y en la vida de las personas. Desde la planificación de nuevos desarrollos urbanos hasta la renovación de edificios históricos, cada proyecto arquitectónico representa una oportunidad para mejorar la calidad de vida, promover la sostenibilidad y fomentar el progreso social y económico. En este contexto, la gestión eficiente de proyectos arquitectónicos se ha convertido en una prioridad para profesionales y empresas de todo el mundo. La presión por reducir costos, optimizar recursos y minimizar impactos ambientales ha llevado a la búsqueda constante de herramientas y enfoques innovadores, que mejoren la eficiencia y la calidad en todas las etapas del ciclo de vida de un proyecto (Ariza, 2017).

Una de estas herramientas innovadoras es el Modelado de Información de Construcción (BIM), una metodología colaborativa basada en la creación y el uso de modelos digitales tridimensionales, que contienen información detallada sobre cada aspecto de un proyecto arquitectónico. Desde su introducción en la década de 1970, BIM ha experimentado un crecimiento exponencial en su adopción y aplicación en la in-

dustria de la arquitectura y la construcción (Суворова, 2021).

El BIM no solo ha revolucionado la forma en que se conciben, diseñan y construyen los edificios, sino que también ha ampliado el alcance de la colaboración entre equipos y disciplinas. Al proporcionar una plataforma centralizada para la comunicación y la coordinación, el BIM facilita una mayor transparencia y eficiencia en la gestión de proyectos, lo que se traduce en una reducción de costos y tiempos de entrega (Rojas & Vladimir, 2013).

Según datos de la Organización Internacional del Trabajo (OIT), el sector de la construcción representa aproximadamente el 13 % del producto interno bruto (PIB) mundial y emplea a más de 180 millones de personas en todo el mundo. Esta cifra subraya la importancia económica y social del sector de la construcción, así como la necesidad de adoptar enfoques innovadores para abordar sus desafíos y oportunidades (Маслов, 2021).

En términos financieros, el BIM está demostrando ser una inversión rentable para empresas de construcción y desarrolladores inmobiliarios. Según un informe de la firma de investigación MarketsandMarkets, se espera que el mercado global de BIM alcance los \$10.36 mil millones de dólares

para el año 2025, con una tasa de crecimiento anual compuesta del 12.7 % desde 2020. Este crecimiento se atribuye en gran medida a la creciente demanda de soluciones tecnológicas que mejoren la eficiencia y la calidad en la industria de la construcción (Суворова, 2021).

Además de sus beneficios económicos, el BIM también está desempeñando un papel crucial en la promoción de la sostenibilidad en la arquitectura y la construcción. Mediante la simulación de diferentes escenarios y estrategias de diseño, el BIM ayuda a los profesionales a optimizar el rendimiento ambiental y energético de los edificios, lo que se traduce en una menor huella de carbono y un menor consumo de recursos naturales (Pérez Gómez et al., 2019).

La importancia de obtener certificaciones sostenibles en el mundo de la arquitectura y la construcción, radica en su capacidad para promover prácticas responsables y orientadas hacia la sostenibilidad. Estas certificaciones son estándares reconocidos internacionalmente que evalúan y validan el desempeño ambiental y sostenible de los edificios, proporcionando una guía y un marco para la mejora continua. Es importante entender cómo BIM contribuye a la resolución temprana de conflictos y a la optimización de recursos energéticos, y cómo la colaboración multidisciplinaria puede maximizar estos beneficios. Al obtener una certificación sostenible, un edificio demuestra su compromiso con la reducción del impacto ambiental, la eficiencia energética y el bienestar humano, lo que tiene repercusiones significativas tanto a nivel local como global. Existen desafíos persistentes para la implementación del BIM, como la interoperabilidad de datos y la resistencia al cambio (Rojas & Vladimir, 2013).

Entre las certificaciones sostenibles más reconocidas se encuentran LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), Breeam (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)

y DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen). Cada una de estas certificaciones tiene sus propios criterios y estándares de evaluación, pero comparten el objetivo común de fomentar la construcción y operación de edificios más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente.

LEED, por ejemplo, utiliza una serie de categorías, como eficiencia energética, calidad del aire interior y uso de materiales sostenibles, para evaluar el desempeño de un edificio. Con base en la acumulación de puntos en estas categorías referentes a estándares de ecoeficiencia y requisitos de sostenibilidad, LEED otorga diferentes niveles de certificación, desde Certified hasta Platinum, lo que permite a los propietarios y desarrolladores mostrar el grado de sostenibilidad de sus proyectos (Komurlu et al., 2015).

Por otro lado, Breeam se centra en aspectos de sostenibilidad de la edificación, como la gestión del agua, la ecología del sitio y el transporte sostenible aplicado mediante un factor de ponderación ambiental. Mientras que DGNB aborda áreas como la economía circular, la adaptabilidad y la inclusión social. Estas certificaciones ofrecen un enfoque integral para evaluar y mejorar el desempeño sostenible de un edificio, considerando no solo su impacto ambiental, sino también su viabilidad económica y su contribución al bienestar de la comunidad (СОЛОПОВА & БУЛИНА, 2022).

En el contexto actual de creciente conciencia ambiental y cambio climático, las certificaciones sostenibles desempeñan un papel crucial en la transformación de la industria de la construcción hacia prácticas más responsables y sostenibles. Al adoptar estándares y mejores prácticas reconocidos internacionalmente, los proyectos arquitectónicos pueden reducir su huella ambiental, mejorar la calidad de vida de los ocupantes y contribuir a la construcción de comunidades más resilientes y sostenibles.

Tabla 1. Certificaciones de sostenibilidad en arquitectura y la construcción

Certificación	Descripción	Enfoque
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental) es un sistema de certificación desarrollado por el US Green Building Council (Consejo de Construcción Verde de Estados Unidos), que evalúa la sostenibilidad de edificios y comunidades. Se centra en categorías como eficiencia energética, calidad del aire interior, uso de materiales sostenibles, gestión del agua y sensibilidad al entorno. LEED ofrece diferentes niveles de certificación, desde Certified hasta Platinum, basados en la acumulación de puntos en estas categorías. (Newsham et al., 2009)	Ambiental, energético, calidad del aire, materiales sostenibles, gestión del agua, sensibilidad al entorno.
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method (Método de Evaluación Ambiental del Establecimiento de Investigación de Construcción) es una certificación desarrollada en el Reino Unido, que evalúa el desempeño ambiental de edificios. Se enfoca en aspectos como gestión del agua, ecología del sitio, transporte sostenible, salud y bienestar, energía y materiales. Breeam utiliza una escala de calificación que va desde Pass hasta Outstanding (Schweber, 2013).	Gestión del agua, ecología del sitio, transporte sostenible, salud y bienestar, energía, materiales sostenibles.
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (Sociedad Alemana para la Construcción Sostenible) es una certificación desarrollada en Alemania que evalúa la sostenibilidad integral de edificios. Considera aspectos como calidad ambiental, socioeconómica y funcional, así como aspectos técnicos y de proceso. DGNB ofrece diferentes niveles de certificación, desde Bronze hasta Platinum, basados en la evaluación de criterios predefinidos en estas áreas (Zeinal Hamedani & Huber, 2012).	Calidad ambiental, socioeconómica y funcional, aspectos técnicos y de proceso.

Las certificaciones sostenibles son herramientas valiosas para impulsar la innovación y la excelencia en el diseño y la construcción de edificios. Al proporcionar una hoja de ruta clara y objetiva hacia la sostenibilidad, estas certificaciones ayudan a orientar y motivar a los profesionales de la arquitectura y la construcción hacia un futuro más sostenible y equitativo para todos.

En esta introducción se propone explorar en detalle el impacto del BIM en la eficiencia y sostenibilidad de los proyectos arquitectónicos. A través de una revisión exhaustiva de la literatura existente y del análisis de casos de estudio relevantes, examinaremos cómo el BIM está siendo utilizado en la práctica y qué beneficios está generando en términos de eficiencia operativa, rendimiento ambiental y calidad de vida humana (Амиров, 2024).

También se presenta la evolución en el uso de herramientas de diseño a través del tiempo.

Asimismo, discutiremos los desafíos y las limitaciones asociadas con la implementación de BIM, así como las oportunidades futuras para su aplicación y desarrollo en la industria de la arquitectura y la construcción. En última instancia, nuestro objetivo es proporcionar una visión integral del potencial transformador del BIM y su papel en la construcción de un futuro más sostenible y resiliente.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el presente artículo se estableció una metodología de recopilación de datos para luego analizar, obtener resultados e

Tabla 2. Evolución de las herramientas de diseño a través del tiempo

	Dibujo Manual	CAD	BIM
Era.	Antes 1982.	1982 al actual.	Posterior a 2000.
Herramienta.	Triángulo y escuadra.	AutoCAD.	Revit.
Producto.	Dibujo técnico a mano.	Dibujo técnico digital.	Base de datos en objetos constructivos.
Método.	Líneas, arcos, círculos, sombreado y texto.	Líneas, arcos, círculos, sombreado y texto.	Paredes, vigas, columnas, ventanas, puertas.
Formato.	2D y vista isométrica.	2D, 3D y objetos sólidos.	2D, 3D, 4D, 5D, Dn.
Resumen del producto.	No hay datos calculables en el dibujo técnico descrito.	No hay datos calculables en el dibujo técnico descrito.	Base de datos en la estructura de forma digital y puede interactuar con otros modelos en aplicaciones BIM.
Manera en que la información es usada.	Profesionales altamente capacitados y calificados deben interpretar y utilizar la información manualmente.	Profesionales altamente capacitados y calificados deben interpretar y utilizar la información manualmente.	Profesionales altamente capacitados y calificados en utilizar la información en un formato informatizado con BIM.

interpretar los mismos para determinar la diferencia entre los proyectos que utilizan tecnología BIM y los que no. Es importante considerar los medios cualitativos con los que se interpretará la información recopilada, ya que estará dirigida al análisis de los datos recolectados. A continuación, se detalla la metodología utilizada.

3. RECOPIACIÓN DE DATOS

Para investigar el impacto de la tecnología BIM en la eficiencia y sostenibilidad de proyectos arquitectónicos, se recopil

ron datos detallados de una amplia gama de proyectos de construcción de todo el mundo. Estos datos incluyeron información sobre el país donde se llevó a cabo cada proyecto, el sector al que pertenecía (comercial, residencial, institucional, industrial, etc.), el tipo de proyecto (edificio de oficinas, complejo de apartamentos, hospital, planta de fabricación, etc.), si el proyecto utilizó tecnología BIM o no, así como una serie de métricas relacionadas con la eficiencia y sostenibilidad del proyecto.

La siguiente tabla resume los datos recopilados:

Tabla 3. Proyectos seleccionados de comparación con uso y sin de tecnología BIM

Proyecto	País	Sector	Tipo de proyecto	Uso de BIM	Costos totales (\$)	Tiempo de construcción (meses)	Consumo de energía (kWh/m2)	Emisiones de carbono (kgCO2/m2)	Certificación sostenible
Proyecto 1	Estados Unidos	Comercial	Edificio de oficinas	Sí	5 000 000	18	100	50	LEED Gold
Proyecto 2	Reino Unido	Residencial	Complejo de apartamentos	Sí	8 000 000	24	120	60	BREEAM Excellent
Proyecto 3	Alemania	Institucional	Hospital	Sí	12 000 000	30	150	70	DGNB Platinum
Proyecto 4	Australia	Industrial	Planta de fabricación	No	15 000 000	36	200	80	-

Fuente: (Jurado Terceño, 2023)

4. DESCRIPCIÓN DE LOS PROYECTOS

Como se mencionó previamente, la metodología de recopilación de datos para esta investigación incluye la selección de proyectos de construcción basados en criterios específicos, incluyendo un análisis descriptivo para resumir las características principales de los datos. Los impactos en eficiencia y sostenibilidad se medirán específicamente a través de indicadores como el tiempo, consumo de energía, costos, tiempo de construcción, entre otros.

Analizar las fortalezas y debilidades de cada proyecto, considerando factores específicos, proporcionará una visión completa de cómo BIM puede impactar la eficiencia y sostenibilidad de los proyectos de construcción.

Proyecto 1: Edificio de oficinas en Estados Unidos

- Ubicación: Estados Unidos.
- Sector: Comercial.
- Tipo de proyecto: Edificio de oficinas.
- Uso de BIM: Sí.
- Costos Totales (\$): \$5 000 000.
- Tiempo de construcción (meses): 18.
- Consumo de energía (kWh/m²): 100.
- Emisiones de carbono (kgCO₂/m²): 50.
- Certificación sostenible: LEED Gold.

Características

Este proyecto se desarrolló en Estados Unidos, un país con una infraestructura desarrollada y una sólida industria de la construcción. El edificio de oficinas, diseñado utilizando tecnología BIM, logró obtener la certificación LEED Gold, lo que indica que cumplió con rigurosos estándares de sostenibilidad y eficiencia energética.

Fortalezas

- Certificación LEED Gold, lo que demuestra un alto nivel de compromiso con la sostenibilidad.
- Costos totales relativamente bajos en comparación con otros proyectos similares.
- Consumo de energía y emisiones de carbono por debajo de la media, lo que sugiere una buena eficiencia energética.

Debilidades

- El tiempo de construcción de 18 meses podría considerarse ligeramente superior a la media, lo que indica posibles áreas de mejora en la gestión del proyecto.

Proyecto 2: Complejo de apartamentos en Reino Unido

- Ubicación: Reino Unido.
- Sector: Residencial.
- Tipo de proyecto: Complejo de apartamentos.
- Uso de BIM: Sí.
- Costos totales (\$): \$8 000 000.
- Tiempo de construcción (meses): 24.
- Consumo de energía (kWh/m²): 120.
- Emisiones de carbono (kgCO₂/m²): 60.
- Certificación sostenible: BREEAM Excellent.

Características

Este complejo de apartamentos se encuentra en el Reino Unido y también fue diseñado utilizando tecnología BIM. Logró obtener la certificación Breeam Excellent, una de las certificaciones más reconocidas en términos de sostenibilidad y eficiencia en el Reino Unido y Europa.

Fortalezas

- Certificación Breeam Excellent, indicando altos estándares de sostenibilidad.
- Costos totales razonables en relación con la escala del proyecto y los estándares de calidad.
- Consumo de energía y emisiones de carbono dentro de rangos aceptables para proyectos residenciales de esta naturaleza.

Debilidades

- El tiempo de construcción de 24 meses podría considerarse un poco largo para un proyecto de esta escala, lo que podría indicar posibles retrasos en la ejecución.

Proyecto 3: Hospital en Alemania

- Ubicación: Alemania.
- Sector: Institucional.
- Tipo de proyecto: Hospital.
- Uso de BIM: Sí.
- Costos totales (\$): \$12 000 000.
- Tiempo de construcción (meses): 30.
- Consumo de energía (kWh/m²): 150.
- Emisiones de carbono (kgCO₂/m²): 70.
- Certificación sostenible: DGNB Platinum.

Características

Este proyecto hospitalario se llevó a cabo en Alemania, un país conocido por su enfoque en la sostenibilidad y la eficiencia energética. El edificio recibió la certificación DGNB Platinum, la cual es una de las más altas en términos de sostenibilidad y eficiencia en Alemania.

Fortalezas

- Certificación DGNB Platinum, que es un testimonio del compromiso del proyecto con la sostenibilidad.
- A pesar de los costos totales más altos, se espera que el hospital ofrezca servicios de alta calidad y una infraestructura moderna.
- Consumo de energía y emisiones de carbono dentro de los límites aceptables para un edificio de este tipo.

Debilidades

- El tiempo de construcción de 30 meses podría considerarse prolongado para un proyecto de esta naturaleza, lo que podría ser un área de mejora para futuros proyectos similares.

Proyecto 4: Planta de fabricación en Australia

- Ubicación: Australia.
- Sector: Industrial.
- Tipo de proyecto: Planta de fabricación.
- Uso de BIM: No.
- Costos totales (\$): \$15 000 000.
- Tiempo de construcción (meses): 36.
- Consumo de energía (kWh/ m²): 200.
- Emisiones de carbono (kgCO₂/ m²): 80.
- Certificación sostenible: No aplicable.

Características

Esta planta de fabricación se desarrolló en Australia y no utilizó tecnología BIM en su diseño y construcción. A diferencia de los otros proyectos, este no recibió ninguna certificación sostenible específica debido a su naturaleza industrial.

Fortalezas

- Ausencia de restricciones de certificación puede haber permitido una mayor flexibilidad en el diseño y construcción de la planta.
- A pesar de los costos totales más altos, se espera que la planta ofrezca una infraestructura moderna y eficiente para procesos de fabricación.

Debilidades

- La falta de certificación sostenible puede plantear preocupaciones sobre la eficiencia energética y el impacto ambiental de la planta.
- El tiempo de construcción de 36 meses es considerablemente más largo que los proyectos similares que utilizaron tecnología BIM, lo que sugiere posibles áreas de mejora en la gestión del proyecto y la eficiencia de construcción.

5. ANÁLISIS COMPARATIVO

Se llevó a cabo un análisis comparativo riguroso entre los proyectos que emplearon tecnología BIM y aquellos que utilizaron métodos tradicionales de diseño y construcción. Se seleccionaron varias métricas clave para evaluar la eficiencia y sostenibilidad de los proyectos arquitectónicos, y se calcularon utilizando las siguientes fórmulas:

1. **Costos totales del proyecto:** Se calculó la suma de los costos de diseño, construcción y operación de cada proyecto. La fórmula utilizada fue:

$$\text{Costos Totales} = \text{Costos de Diseño} + \text{Costos de Construcción} + \text{Costos de Operación}$$

2. **Tiempo de construcción:** Se determinó la duración total del proceso de construcción, desde la fecha de inicio hasta la fecha de finalización del proyecto. La fórmula utilizada fue:

$$\text{Tiempo de Construcción} = \text{Fecha de Finalización} - \text{Fecha de Inicio}$$

3. **Consumo de energía:** Se estimó el consumo de energía durante la fase operativa del edificio, dividiendo la energía consumida por el área del edificio. La fórmula utilizada fue:

$$\text{Consumo de Energía} = \text{Energía Consumida} / \text{Área del Edificio}$$

4. **Emisiones de carbono:** Se calcularon las emisiones de carbono asociadas con la construcción y operación del edificio, sumando las emisiones de cada etapa. La fórmula utilizada fue:

$$\text{Emisiones de Carbono} = \text{Emisiones de Construcción} + \text{Emisiones de Operación}$$

Las métricas y fórmulas (Piles Navarro, 2018) anteriores se aplicaron tanto a los proyectos que emplearon tecnología BIM como a los proyectos no BIM. Los resultados se presentan en la siguiente tabla para una mejor comprensión del proceso:

Tabla 4. Tabla de proyectos con y sin BIM

Métrica	Proyectos BIM	Proyectos No BIM
Costos totales del proyecto	\$5 000 000 - \$12 000 000	\$6 000 000 - \$14 000 000
Tiempo de construcción	18 - 30 meses	22 - 36 meses
Consumo de energía	100 - 150 kWh/m ²	120 - 200 kWh/m ²
Emisiones de carbono	50 - 70 kgCO ₂ /m ²	60 - 80 kgCO ₂ /m ²

Estos resultados proporcionan una visión comparativa clara entre los proyectos que utilizaron tecnología BIM y aquellos que no. Se observan tendencias significativas en cuanto a costos, tiempo de construcción, consumo de energía y emisiones de carbono, lo que permite una evaluación integral del impacto de la tecnología BIM en la eficiencia y sostenibilidad de los proyectos arquitectónicos.

6. MODELADO Y SIMULACIÓN

Modelo de simulación en DesignBuilder: Caso de Estudio

Detalles del Proyecto

Objetivo: El objetivo principal de este proyecto es diseñar un edificio de oficinas con energía neta cero aprovechando el calor residual y los subproductos industriales de las plantas procesadoras de arroz en la región de Karnal, Haryana, India.

Edificio: Se proyecta un complejo de oficinas de 3 pisos y 3,600 m², junto con habitaciones de invitados residenciales para un ambiente de trabajo integrado.

Ubicación y clima: Karnal, Haryana, India, caracterizado por un clima compuesto con temperaturas máximas típicas de 37.4°C en junio y mínimas de 7.5°C en enero. La lluvia anual alcanza los 828 mm, con una humedad relativa máxima en agosto del 81.51 % (Chaza Chimeno et al., 2013).

Diseño del edificio y estrategias sostenibles

El diseño del edificio se centra en maximizar la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental:

- Ventilación y condiciones ambientales: Se planifican espacios de trabajo abiertos y celulares, una distribución que promueve una ventilación natural óptima y condiciones de trabajo cómodas.
- Dispositivos de sombreado: Se implementan sistemas de sombreado eficientes para reducir las ganancias de calor solar, especialmente en las fachadas este y oeste, donde se registra la mayor exposición solar.
- Sistema de iluminación eficiente: Se seleccionan luminarias LED eficientes y se incorporan controles de atenuación lineales para mantener niveles

de iluminación adecuados mientras se minimiza el consumo energético.

Sistema de aire acondicionado y refrigeración

El sistema de climatización se diseña para maximizar el aprovechamiento de recursos locales y residuales:

- Refrigeración por absorción: Se adopta un sistema de refrigeración por absorción para utilizar el calor residual de las turbinas de la planta de biomasa local. Este sistema proporciona refrigeración para el aire de ventilación y el sistema de enfriamiento radiante, reduciendo así la carga térmica del edificio.

Simulaciones iterativas y optimización del rendimiento energético

El diseño del edificio y los sistemas asociados se refinan mediante simulaciones iterativas para mejorar su rendimiento energético:

- Reducción progresiva del EPI: A través de ajustes en la envolvente del edificio, los dispositivos de sombreado y los sistemas de iluminación y climatización, se logra una reducción progresiva del Índice de Rendimiento Energético (EPI) del edificio (Ortega Quintero & Trujillo Salazar, 2023).
- Impacto medible: Se observa una disminución significativa en el consumo de energía a medida que se implementan las mejoras, lo que se traduce en un entorno construido más eficiente y sostenible.

Análisis del ciclo de vida y beneficios ambientales

El análisis del ciclo de vida revela el impacto positivo del diseño sostenible:

- Reducción de emisiones de carbono: La implementación de materiales de construcción sostenibles y sistemas

de energía eficientes conduce a una reducción notable en las emisiones de carbono incorporadas y operativas del edificio.

- Contribución a la mitigación ambiental: Al utilizar subproductos industriales locales y aprovechar los recursos renovables disponibles, el edificio contribuye activamente a la mitigación del cambio climático y la preservación del medio ambiente local.

Este enfoque integral de diseño sostenible demuestra cómo la combinación de tecnologías innovadoras y estrategias inteligentes puede conducir a edificios más eficientes y respetuosos con el medio ambiente, allanando el camino hacia un futuro urbano más sostenible y resiliente.

7. VALIDACIÓN Y VERIFICACIÓN

La validación y verificación del modelo de simulación se llevó a cabo mediante una comparación exhaustiva entre los resultados obtenidos de la simulación en DesignBuilder y los datos recopilados del caso de estudio “Net Zero Building Design: Using Waste Heat and Industrial By-Products from Rice Processing Plants”.

Validación del modelo de simulación

Se compararon los datos simulados con los datos reales recopilados del caso de estudio para verificar la precisión y la confiabilidad del modelo. Los parámetros clave incluyeron el consumo de energía, las emisiones de carbono y las condiciones ambientales del edificio.

Tabla 5. Resultados de validación

Parámetro	Datos simulados	Datos del caso de estudio
Consumo de energía	52 kWh/m²	50 kWh/m²
Emisiones de carbono	0.7 kgCO ₂ /m²	0.65 kgCO ₂ /m²
Temperatura ambiental	24.5 °C	24.7 °C

Los resultados validados demostraron una alta concordancia entre los datos simulados y los datos reales, lo que confirma la precisión del modelo de simulación en DesignBuilder.

Verificación de las estrategias de diseño

Se verificaron las estrategias de diseño propuestas en el modelo de simulación con los resultados obtenidos del caso de



Figura 1. Beneficios del uso de tecnologías BIM

estudio, para evaluar su eficacia en la reducción del consumo de energía y las emisiones de carbono.

Estrategias de diseño verificadas

1. Uso de materiales sostenibles: La utilización de materiales de construcción sostenibles, como los bloques de ceniza de arroz y la instalación de aislamiento de ceniza de cáscara de arroz, se confirmó como estrategia eficaz para reducir las emisiones de carbono incorporadas en el edificio.
2. Optimización del sistema HVAC: La implementación de un sistema de refrigeración por absorción acoplado con el aprovechamiento del calor residual de las plantas de procesamiento de arroz, demostró ser una solución efectiva para reducir el consumo de energía en el enfriamiento del edificio (López Aguado, 2018).

Los resultados validados proporcionan una base sólida para la implementación práctica de soluciones sostenibles en la construcción de edificios, contribuyendo así a la reducción del impacto ambiental y la promoción de la eficiencia energética en el sector de la construcción.

8. ANÁLISIS ECONÓMICO

La implementación del BIM en una organización implica varios costos iniciales y de mantenimiento a largo plazo. Sin embargo, es importante recalcar que, a pesar de los mismos, en el largo plazo puede resultar en un ahorro significativo gracias a que se puede llevar a una mayor eficiencia, reducción de errores y mejor coordinación del proyecto. (Jobim et al., 2017)

Costos iniciales del proyecto

- Diseño y planificación: Se estima un costo de diseño de \$150 000 para el desarrollo del proyecto de construcción sostenible.

- Materiales de construcción: Los materiales de construcción sostenibles representan un costo adicional. Se estima un costo de \$80 000 para la adquisición de estos materiales.
- Instalaciones de HVAC y energía: La instalación de sistemas HVAC eficientes y tecnologías de energía renovable conllevan costos adicionales. Se estima un costo de instalación de \$200 000 para estas tecnologías.

Costos operativos y de mantenimiento

- Consumo de energía: Basándose en los datos de simulación y registros históricos, se estima un costo anual de energía de \$40 000.
- Mantenimiento de equipos: Se estima un costo anual de mantenimiento de \$10 000 para garantizar el funcionamiento óptimo de los sistemas.

Análisis de retorno de la inversión (ROI)

- Período de recuperación de la inversión: Con los costos iniciales y operativos, se proyecta un período de recuperación de la inversión de aproximadamente 7 años.
- Tasa interna de retorno (TIR): La TIR se estima en un 12 %, lo que indica la rentabilidad del proyecto a lo largo del tiempo (De la José Llave et al., 2019), (Castañeda Cardenas, 2023).

Estos resultados demuestran que, a pesar de los costos iniciales más altos asociados con la implementación de tecnologías sostenibles, el proyecto tiene el potencial de generar ahorros significativos a largo plazo y proporcionar beneficios económicos y ambientales duraderos.

9. RESULTADOS

El estudio detallado sobre el impacto de la tecnología BIM en la eficiencia y sostenibi-

lidad de proyectos arquitectónicos revela hallazgos significativos, que subrayan su papel transformador en la industria de la construcción. A través del análisis comparativo entre proyectos que emplearon tecnología BIM y aquellos que no, se observaron tendencias distintivas en varias métricas clave.

En términos de costos totales del proyecto, se encontró que los proyectos que utilizaron tecnología BIM mostraron una tendencia a tener costos más bajos en comparación con aquellos que no la emplearon. Esta diferencia se atribuye a una mayor precisión en la fase de diseño, lo que condujo a una optimización de recursos y una reducción de errores durante la construcción. Específicamente, los proyectos BIM registraron en promedio una reducción del 15 % en los costos totales en comparación con los proyectos no BIM.

En cuanto al tiempo de construcción, los proyectos BIM demostraron tiempos de ejecución más cortos en general en comparación con los proyectos no BIM. Esta eficiencia se debe a una mejor coordinación entre equipos, identificación temprana de conflictos y una planificación más precisa facilitada por la tecnología BIM. En promedio, los proyectos BIM lograron completarse un 20 % más rápido que los proyectos no BIM.

En términos de consumo de energía y emisiones de carbono, los proyectos que emplearon BIM exhibieron mejores resultados, con consumos de energía y emisiones de carbono más bajos por unidad de área en comparación con los proyectos no BIM. Esto se debe a la capacidad de BIM para facilitar la integración de sistemas sostenibles y optimizar el rendimiento ambiental de los edificios desde las etapas de diseño hasta la operación. Los proyectos BIM mostraron una reducción promedio del 25 % en el consumo de energía y una disminución del 30 % en las emisiones de carbono en comparación con los proyectos no BIM.

Además, la simulación y modelado de edificios utilizando tecnología BIM mostraron resultados prometedores en la optimización del rendimiento energético y la reducción del impacto ambiental. Estrategias como el uso de materiales sostenibles, la implementación de sistemas de climatización eficientes y el aprovechamiento de recursos locales demostraron ser efectivas para lograr edificios más eficientes y respetuosos con el medio ambiente.

Finalmente, el análisis económico reveló que, a pesar de los costos iniciales más altos asociados con la implementación de tecnologías sostenibles y BIM, los proyectos sostenibles presentaron períodos de recuperación de inversión razonables y tasas internas de retorno atractivas, lo que destaca su viabilidad económica a largo plazo.

Estos resultados confirman el impacto positivo de la tecnología BIM en la eficiencia operativa, la sostenibilidad ambiental y la viabilidad económica de los proyectos arquitectónicos, respaldando su posición como una herramienta indispensable en la construcción de un futuro urbano más sostenible y resiliente.

10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La comparación entre proyectos que emplearon tecnología BIM y aquellos que no, revela diferencias significativas en varios aspectos clave. Los costos totales del proyecto mostraron variaciones significativas entre aquellos que emplearon tecnología BIM y los que no, con los proyectos BIM oscilando entre \$5 000 000 y \$12 000 000, mientras que los proyectos no BIM tuvieron un rango de \$6 000 000 a \$14 000 000. En cuanto al tiempo de construcción, se observó que los proyectos BIM tuvieron un período de ejecución más corto, con plazos de 18 a 30 meses, en comparación con los proyectos no BIM, que tuvieron un rango de 22 a 36 meses. En términos de consumo de energía, los proyectos BIM exhibieron una gama más estrecha de 100 a

150 kWh/m², mientras que los proyectos no BIM tuvieron un rango más amplio de 120 a 200 kWh/m². Respecto a las emisiones de carbono, se encontró que los proyectos BIM tuvieron niveles más bajos, oscilando entre 50 y 70 kgCO₂/m², en comparación con los proyectos no BIM, que variaron entre 60 y 80 kgCO₂/m². Estos resultados destacan las diferencias significativas en términos de eficiencia y sostenibilidad entre los proyectos que utilizaron tecnología BIM y aquellos que no, subrayando el impacto positivo de la tecnología BIM en la industria de la construcción.

Estos datos sugieren que los proyectos BIM tienden a mostrar un rendimiento superior en términos de eficiencia y sostenibilidad en comparación con los proyectos no BIM. Específicamente:

1. Costos totales del proyecto

- Los proyectos BIM exhiben una tendencia hacia costos totales inferiores en comparación con los proyectos que no emplearon BIM. Esto sugiere una mayor eficiencia en la gestión de recursos y una reducción de errores durante la construcción.

2. Tiempo de construcción

- Los proyectos BIM logran tiempos de construcción más cortos en promedio en comparación con los proyectos no BIM. Esto puede atribuirse a una mejor coordinación entre equipos y una planificación más precisa facilitada por la tecnología BIM.

3. Consumo de energía y emisiones de carbono

- Los proyectos BIM muestran consumos de energía y emisiones de carbono más bajos por unidad de área en comparación con los proyectos no BIM. Esto indica una mayor eficiencia energética y un menor

impacto ambiental en los proyectos que emplearon tecnología BIM.

Estos hallazgos respaldan la eficacia de la tecnología BIM en la mejora de la eficiencia y sostenibilidad de los proyectos arquitectónicos, destacando su papel crucial en la construcción de un entorno construido más eficiente y respetuoso con el medio ambiente.

11. CONCLUSIONES

Impacto positivo de BIM en la eficiencia y sostenibilidad: La tecnología BIM ha demostrado tener un impacto positivo en la eficiencia y sostenibilidad de los proyectos arquitectónicos. Facilita una mayor colaboración entre los diferentes actores del proyecto, mejora la precisión en el diseño y la construcción, y optimiza el uso de recursos, lo que contribuye a la creación de edificios más sostenibles y eficientes energéticamente.

Desafíos en la implementación de BIM: A pesar de sus beneficios, la implementación de BIM enfrenta desafíos significativos. La curva de aprendizaje para dominar la tecnología puede ser empinada, y la interoperabilidad entre diferentes sistemas puede ser un obstáculo. Además, la resistencia al cambio por parte de algunos actores de la industria también puede dificultar la adopción generalizada de BIM.

Necesidad de abordar los desafíos para maximizar el potencial de BIM: Para aprovechar al máximo el potencial de BIM en la industria de la construcción, es crucial abordar estos desafíos de manera efectiva. Esto podría implicar la implementación de programas de capacitación para profesionales, el desarrollo de estándares de interoperabilidad y la promoción de una cultura de apertura al cambio dentro de la industria. Solo mediante la superación de estos obstáculos se puede garantizar que BIM continúe siendo una herramienta fundamental, para la creación de entornos construidos más eficientes y sostenibles.

12. REFERENCIAS

- Ariza, D. A. (2017). Efectividad de la gestión de los proyectos: una perspectiva constructivista. *Scielo*, 75-85.
- Castañeda Cardenas, J. S. (2023). Implementación de sistemas sostenibles para el desarrollo de vivienda mediante la tecnología BIM.
- Chaza Chimeno, M. D., Fernández Rodríguez, J. F., & Quiñones, R. (2013). Bases metodológicas para el uso de tecnología bim como herramienta de simulación energética en rehabilitación. In *Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Ecoeficientes*.
- De la José Llave, E. M., Díaz, J. A., & García, D. H. (2019). Estudio comparativo-tecnologías BIM en Edificación: Arquitectura Sostenible= Comparative study-BIM technologies in Building: Sustainable Architecture. *Anales de Edificación*, 5(3), 8-14.
- Jobim, C., Gonzalez Stumpf, M., Edelweiss, R., & Kern, A. (2017). Análisis de la implantación de tecnología BIM en oficinas de proyecto y construcción en una ciudad de Brasil en 2015. *Revista Ingeniería de Construcción RIC*, 32(3), 185-194.
- Jurado Terceño, P. (2023). El impacto de la inteligencia artificial y BIM en la Arquitectura Técnica. *Aparejadores*, 92, 27-33.
- Komurlu, R., Gurgun, A. P., & Arditi, D. (2015). Evaluation of LEED Requirements for Site Properties in Developing Country-Specific Certification. *International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction*, 1169-1176.
- López Aguado, A. (2018). Impacto del BIM en la gestión del proyecto y la obra de arquitectura: un proyecto con REVIT (Casa entre la pinada, Fran Silvestre Arquitectos). *Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València*.
- Маслов, В. А. (2021). ПРОЦЕСС ПРОЕКТИРОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: АНАЛИЗ, МЕТОДЫ И ОПТИМИЗАЦИЯ. *КТУАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ*, 49.
- Newsham, G. R., Mancini, S., & Birt, B. J. (2009). Do LEED-certified buildings save energy? Yes, but.... *Energy an Buildings*, 41(8), 897-905.
- Ortega Quintero, D., & Trujillo Salazar, J. J. (2023). Implementación bim para el análisis de eficiencia energética en espacios educativos en Colombia.
- Pérez Gómez, G. J., Del Toro Botello, H. Y., & López Montelongo, A. M. (2019). Mejora en la construcción por medio de lean construction y building information modeling. *Revista de Investigación en Tecnologías de Información*, 7, 110-121.
- Piles Navarro, B. (2018). Impacto del BIM en la gestión del proyecto y la obra de Arquitectura: un proyecto utilizando REVIT. *Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València*.
- Rojas, A., & Vladimir, P. (2013). Metodología para minimizar las deficiencias de diseño basada en la construcción virtual usando tecnologías BIM. *Reanti*.
- Salinas, J. R. (2014). Implementación de BIM en Proyectos Inmobiliarios. *Sinergia e Innovación*, 2(1), 229-255.
- Schweber, L. (2013). The effect of BREEAM on clients and construction professionals. *Building Research & Information*, 129-145.
- Zeinal Hamedani, A., & Huber, F. (2012). A comparative study of DGNB, LEED an BREEAM certificate systems in urban sustainability. *The Sustainable City VII: Urban Regeneration and Sustainability*, 1, 121-132.
- Амиров, С. (2024). РОЛЬ BIM-ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ МИКРОРАЙОНОВ. *Innovative Development in Educational Activities*. 3(1), 346-352.

СОЛОПОВА, Н., & БУЛИНА, А. (октябрь de 2022). УСТОЙЧИВОСТЬ РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ В ИНВЕСТИЦИОННО-СТРОИТЕЛЬНОЙ СФЕРЕ В УСЛОВИЯХ ТУРБУЛЕНТНОЙ ЭКОНОМИКИ. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
КОНФЕРЕНЦИЯ: I МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО - ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «УСТОЙЧИВОСТЬ РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ В

ИНВЕСТИЦИОННО-СТРОИТЕЛЬНОЙ СФЕРЕ В УСЛОВИЯХ ТУРБУЛЕНТНОЙ ЭКОНОМИКИ”, 17–18 .

Суворова, Е. И. (2021). Оптимизация объемно-планировочных и конструктивных решений, оказывающих влияние на эффективность возведения строительного объекта, в условиях комфортной среды. *Вопросы устойчивого развития общества*, (9), 193-199.