

Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Implementación de la Realidad Virtual en los modelos BIM para la sostenibilidad

Implementation of Virtual Reality in BIM models for sustainability

Miguel Cervantes-García* y David Joaquín Delgado-Hernández

Para citar este artículo: Cervantes-García Miguel y Delgado-Hernández David Joaquín, 2023. Implementación de la Realidad Virtual en los modelos BIM para la sostenibilidad. Ciencia Nicolaita no. 87, 61-78. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.632>



Historial del artículo:

Recibido: 22 de abril de 2022

Aceptado: 10 de septiembre de 2022

Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: miguelceg@hotmail.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Implementación de la Realidad Virtual en los modelos BIM para la sostenibilidad

Implementation of Virtual Reality in BIM models for sustainability

Miguel Cervantes-García* y David Joaquín Delgado-Hernández

Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Arquitectura y Diseño

Resumen

El uso de la Realidad Virtual (VR) tiene sus raíces en las ciencias de la comunicación visual, por lo que su aplicación en proyectos arquitectónicos la distingue de muchas otras herramientas. En este artículo se determinan las dimensiones de la metodología *BIM* (*Building Information Modeling*) que permite implementar la VR mostrando los posibles beneficios. La metodología a seguir comienza presentando la clasificación general de los sistemas tridimensionales, las características de la VR, sus ventajas de integración con la metodología *BIM* y sus desafíos como herramienta dentro de una arquitectura sostenible. Finalmente, se plantean las conclusiones.

Palabras clave: realidad virtual, realidad extendida, modelado de información de construcción - *BIM*, *BIM* verde, sostenibilidad

Abstract

The use of Virtual Reality (VR) originated in the visual communication sciences, and its application in architectural projects distinguishes it from many other tools. In this article, the dimensions of the BIM (*Building Information Modeling*) methodology that allow the implementation of VR are determined, showing the possible benefits. The research methodology begins by presenting the general classification of three-dimensional systems, the characteristics of VR, its integration advantages with the BIM approaches and its challenges as a tool within the sustainable architecture arena. Finally, the conclusions are presented.

Keywords: virtual reality, extended reality, building information modeling - BIM, green BIM, sustainability

Introducción

Las definiciones de lo que implica la disciplina del diseño son, en sí mismas, amplias. En el campo de la arquitectura abarca desde la parte conceptual, es decir, la modelización de procesos democráticos y participativos en la planificación del objeto arquitectónico (Björgvinsson, Ehn, & Hillgren, 2010), hasta su materialización misma (Shen, Ong, & Nee, 2010). En arquitectura, la VR es utilizada para planificar y diseñar realidades tridimensionales controladas para ser visualizadas con un propósito específico, por ejemplo, mejorar visualmente la presentación de un proyecto o detectar errores de construcción que pueden representar un mayor gasto de recursos. Así, conviene definir los “tipos” de realidad.

Definiendo los “tipos” de realidad

La VR es una de las categorías que existen para clasificar la forma en que se presentan los objetos y espacios virtuales en tres dimensiones en relación con la realidad. A su vez, la VR está inmersa en una categoría general más amplia conocida como Realidad Extendida (*Extended Reality - XR*), cuyo esquema (Figura 1) y definición se presenta en seguida.

a) Realidad Extendida y Realidad Mixta

A grandes rasgos, la XR se presenta como una categoría general, de visión integradora, de las tecnologías y sistemas referentes a los espacios y objetos tridimensionales que, como su nombre lo indica, puedan “extenderse” o enriquecerse mediante cualquier otro sistema o tipo de tecnología. La XR integra como subcategoría a la VR y a la Realidad Mixta (*Mixed Reality - MR*), que a su vez tiene como subcategorías a la

Realidad Aumentada (*Augmented Reality - AR*) y a la Virtualidad Aumentada (*Augmented Virtuality - AV*), ambos tipos de “realidades” se caracterizan por permitirle al usuario tener un sentido de presencia, es decir, cierta noción o vinculación con el entorno real.

Para entender mejor los conceptos, en la Figura 2 se muestra un ejemplo. Las montañas representan el entorno real (RE) y los árboles los objetos reales. Los prismas simbolizan un objeto virtual cualquiera y los tres planos el espacio virtual. La combinación del prisma con las montañas, corresponde con la AR. La superposición de los tres planos con los árboles representa la AV y, finalmente, el prisma con los tres planos simboliza la VR.

Steve Mann (2018) menciona que la XR está relacionada con una serie de conceptos y postulados que utilizan la letra “X” para representar una variable posicionada dentro del continuo de virtualidad, concepto propuesto por Paul Milgram y Fumio Kishino (1994), el cual es un eje horizontal que va de izquierda a derecha y que tiene como extremos el entorno “real” y el entorno “virtual”. El mismo autor también aclara que existe cierta confusión en la manera en que se emplea el término XR, ya que se utiliza de forma equivalente al de Realidad-X (*X-Reality*) y Realidad Cruzada (*Cross-Reality*), generando tres clasificaciones distintas. Por lo que no es raro que la XR sea entendida como sinónimo de la MR, la XR como una subcategoría de la MR y la XR como categoría general (Figura 3).

En cuanto a la MR, tanto Paul Milgram y Fumio Kishino (1994), como Åsa Fast-Berglund, Liang Gong y Dan Li (2018), la entienden como un entorno en donde lo real y lo virtual se mezclan; en donde lo vir-



Figura 1. Clasificación general de los distintos tipos de realidad. Adaptación de testing and validating Extended Reality (XR) technologies in manufacturing (p. 2) por Åsa Fast-Berglund, Liang Gong y Dan Li (2018).

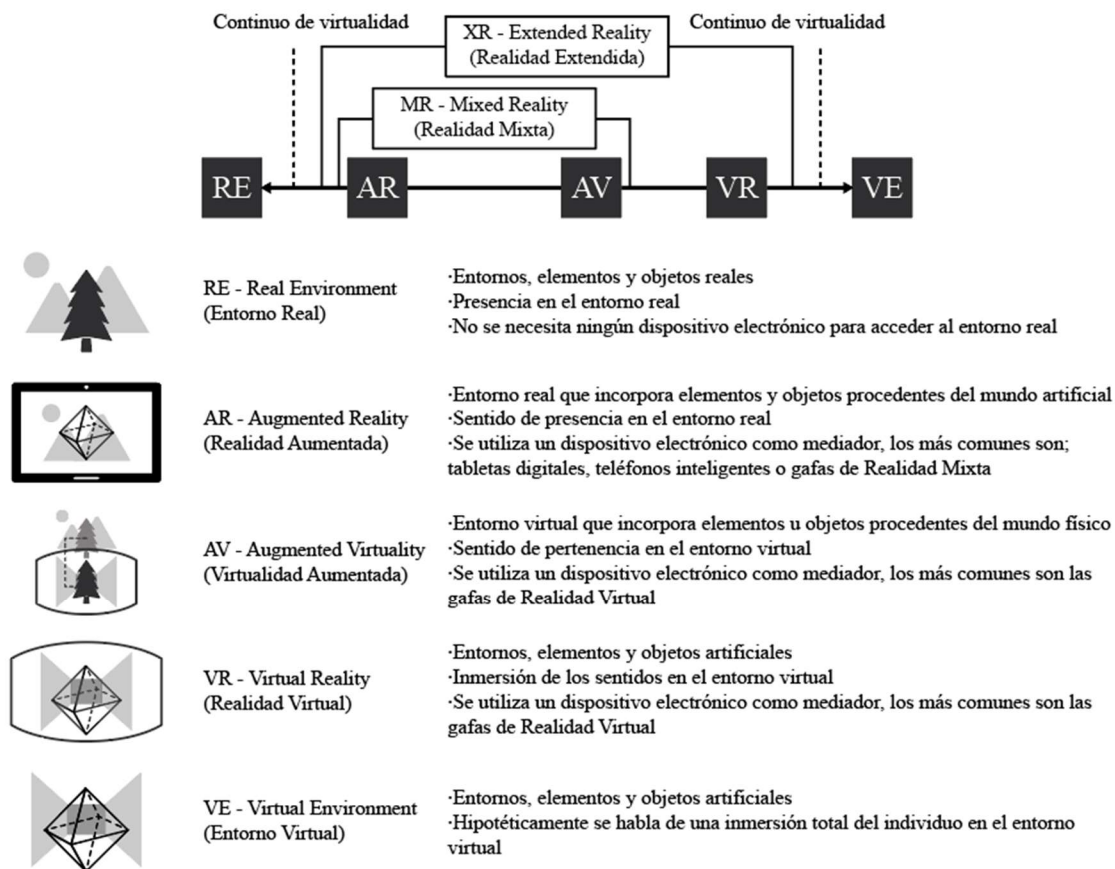


Figura 2. Características de los distintos tipos de realidad (Elaboración propia).

tual aumenta lo real y lo real aumenta lo virtual, dándole cierto grado de presencia al usuario respecto al mundo real. Cabe señalar que según la definición de *MR*, y como se puede ver en la Figura 3, la primera acepción que se presenta de izquierda a derecha, es la que mejor plantea la clasificación general de los distintos tipos de realidad, ya que la *VR* al presentar una virtualidad total por definición, no puede estar integrada dentro de la *MR*. Para esclarecer esta situación, se presentan a continuación algunas definiciones clásicas de la *VR*.

b) Realidad Virtual

La idea de *VR* fue concebida en la ciencia ficción. Su primer registro fue en 1935 cuando Stanley G. Weinbaum publicó un relato breve para la revista *Wonder Stories* denominado “Las gafas de Pigmalión”, donde se describe un sistema de grabaciones holográficas y experiencias ficticias. En su relato, Weinbaum manifiesta un anhelo que ha acompañado al ser humano desde sus orígenes: el anhelo de trascender, no

solo de superar las limitaciones impuestas y circunscritas por el espacio y el tiempo, sino de exceder las limitaciones de los sentidos aumentándolos a través de los medios electrónicos.

El concepto *VR* tiene su origen en la década de los sesenta. Fue introducido en los escritos *ciberpunk* que se popularizaron y permitieron que varios conceptos, relacionados con la virtualidad, se utilizaran de manera cotidiana; entornos virtuales, mundos virtuales, espacio virtual y realidad artificial. Jaron Lanier integró dichos conceptos en un solo término: *VR*, que definió como una tecnología informática que es utilizada para recrear la relación de una persona con el mundo físico, en un nuevo plano (Lanier, 1988). Utilizó dicho término para referirse a los “trabajos informáticos” que en esa época se realizaban en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, en la Universidad de Carolina del Norte y en los centros de investigación militares de EUA. Aunque sería el propio Lanier, años más tarde, quien reconocería en una entrevista otorgada a Lynn Hershman, que quizá el concepto de *VR* no haya

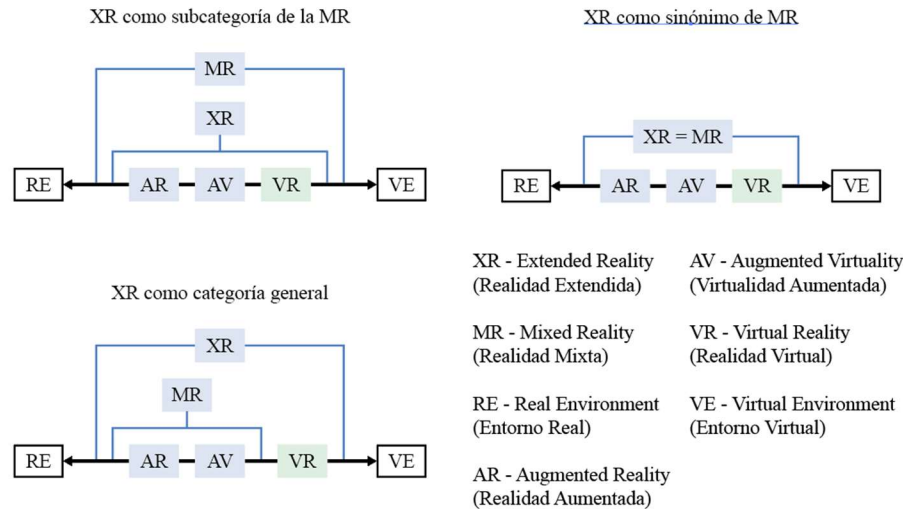


Figura 3. Acepciones de la clasificación general de los distintos tipos de realidad (Elaboración propia).

sido el más adecuado para definir dichas tecnologías. Pero que en su momento, fue el intento de reflejar la pasión que sentían las personas por la tecnología y el deseo de cambiar profundamente las condiciones de la existencia física humana (Leeson, 1998). El concepto VR propuesto por Lanier (1988) ha sido abordado y redefinido desde muchas ópticas y disciplinas. Dentro del enfoque de la comunicación se presenta como una definición muy citada, la que sostienen Frank Biocca y Mark R. Levy (1995):

La Realidad Virtual es la vanguardia de la evolución general de las interfaces de comunicación actuales como la televisión, las computadoras y el teléfono hacia el surgimiento de un metamedio. La Realidad Virtual, forma de este metamedio emergente, es como un traje de buceo con el que uno puede sumergirse y explorar el océano electrónico [...] la Realidad Virtual no es la tecnología; es el destino. El objetivo final del diseño de la interfaz de Realidad Virtual es nada menos que la inmersión total de los canales sensomotores humanos en una vívida experiencia generada por computadora. En el sistema ideal, el cuerpo está envuelto en comunicación y late con información. Los medios siempre han sido entornos, tanto la radio como la televisión dominan las salas en las que se encuentran utilizadas y las mentes que los utilizan. Pero el entorno de realidad virtual envuelve los sentidos. El optimista diría que la Realidad Virtual abraza los sentidos; el pesimista diría que los secuestra.

Una definición más reciente y concreta dentro de la misma disciplina, es la que proponen Steve Mann, Tomas A. Furness, Yu Yuan, Jay Iorio, y Zixin Wang (2018), quienes mencionan que “La Realidad Virtual es una simulación, de experiencia realista, generada por computadora. Normalmente, la Realidad Virtual bloquea el mundo real y lo reemplaza por un mundo virtual”.

En materia de ingeniería y sistemas computacionales, Leif P. Berg y Judy M. Vance (2017) plantean la siguiente definición:

Un conjunto de tecnologías que permiten a las personas experimentar de forma inmersiva un mundo más allá de la realidad [...] Las tecnologías de visualización [de Realidad Virtual] vienen en una variedad de modalidades y tamaños, cada uno con el objetivo de entregar información a nuestros sentidos, en particular la vista, el oído y el tacto. Mientras que el olfato y el gusto han recibido comprensiblemente menos atención [...] En esencia, la Realidad Virtual es una experiencia humana [...] La tecnología [de Realidad Virtual] está diseñada expresamente para aprovechar el sistema de procesamiento de información humana, para imitar cómo interpretamos el mundo que nos rodea [...] [la Realidad Virtual] suplanta la información de la realidad con la del mundo virtual [...] son nuestras mentes las que ponen las piezas juntas para formar la experiencia.

En materia de arquitectura, De Freitas y Ruschel (2013), quienes revisaron y agruparon doscientos artículos sobre VR y AR aplicada a la arquitectura en áreas de investigación y etapas de desarrollo tecnológico, adoptan la definición de Burdea y Coiffet (2003), la cual señala que es “Una tecnología que agrega las dimensiones de inmersión e interactividad a modelos tridimensionales generados por computadora que permiten una «exploración» que no es posible con las formas tradicionales de representación”.

Como se observa, es difícil categorizar y definir la VR; no obstante, existen ciertas coincidencias que permiten describirla como un metamedio con el que las personas pueden experimentar sensorialmente un fenómeno. Lo hacen a través de dispositivos electrónicos diseñados expresamente para aprovechar el sistema de procesamiento de información humana y su propósito es imitar la manera en la que se interpreta el mundo. Se trata de un tipo de “realidad perceptiva” en donde lo más importante es la experiencia que dicho metamedio genera en las personas. Así, es importante resaltar las características de la VR.

Características de la Realidad Virtual (VR)

Burdea y Coiffet (2003) argumentan que la VR puede determinarse por su función, para lo cual proponen las tres “i”: inmersión, interacción e imaginación. Plantean que un sistema de VR es una interfaz que implica simulación en tiempo real e interacciones mediante múltiples canales sensoriales, tales como la vista, el oído, el tacto, el olfato y el gusto. Por lo tanto, la VR implica los conceptos de interactividad e inmersión, pero también conlleva mucho de la imaginación del operador (Burdea & Coiffet, 1993). De esta forma, se detallan estos conceptos.

- **Inmersión.** Es la sensación de presencia en lo real o lo virtual. En esta última, la sensación de presencia se logra estimulando los sentidos humanos mediante dispositivos electrónicos.
- **Interacción.** Es la influencia recíproca entre dos entes. En la VR, hace referencia a la interacción persona-ordenador, entre los usuarios y los sistemas informáticos.

- **Imaginación.** En la VR puede verse como el pensamiento que permite utilizar los componentes de un sistema informático para ejecutar un objetivo particular.

A su vez, los sistemas de VR se pueden clasificar en tres categorías según el grado de inmersión y el tipo de interfaz que utilizan. Dichos sistemas se dividen en no inmersivos, semi-inmersivos e inmersivos (Bamodu & Ye, 2013), como se describe a continuación y se muestra en la Figura 4.

- **Sistemas de VR no inmersivos.** También llamados sistemas de VR de escritorio, permiten a los usuarios interactuar con entornos 3D a través de dispositivos de menor costo, facilidad de uso y facilidad de instalación, como computadoras de escritorio, tabletas y teléfonos inteligentes. Autores como Bolter y Grusin (1996), mencionan que este tipo de sistemas le permiten al usuario tener una presencia real y un grado de control del mundo mucho mayor que otro tipo de sistemas.
- **Sistemas de VR semi-inmersivos.** También llamados sistemas híbridos, proporcionan un alto nivel de inmersión, pero mantienen la simplicidad de la VR de escritorio, permitiéndole a los usuarios tener cierto grado de control sobre los objetos físicos del mundo real. Un ejemplo de este tipo de sistema es el CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*), ambiente en el que el usuario está rodeado de pantallas que proyectan el mundo virtual.
- **Sistemas de VR inmersivos.** Presentan el grado de inmersión más alto, lo que permite al usuario tener la sensación de estar en el entorno virtual. También son los sistemas que utilizan los dispositivos más caros del mercado, así como el mayor número de periféricos para lograr la inmersión total del usuario. Los dispositivos más utilizados en este tipo de sistemas son gafas, cascos, guantes, caminadoras y trajes de VR.

Como se aprecia en la Figura 4, los sistemas de VR logran que los usuarios vivan experiencias distintas de acuerdo al tipo de sistema empleado. Y aunque todo parece benéfico, también hay algunas desventajas que deben señalarse.



Figura 4. Sistemas de Realidad Virtual según su grado de inmersión (Elaboración propia).

Ventajas y desventajas de la VR

En su revisión, Schnabel, Wang y Kvan (2010), explican que los entornos virtuales son utilizados en diseño porque han permitido expresar y explorar la imaginación con mayor facilidad. Mientras que Burdea y Coiffet (2003), mencionan que las dimensiones de inmersión e interactividad de la VR, permiten enriquecer mucho más las formas de representación que como se haría con las herramientas tradicionales. En ese sentido, es evidente que las tecnologías de VR presentan ventajas e inconvenientes tecnológicos que aún no se han podido resolver. Se enlistan a continuación ambas partes.

a) Ventajas

- **Actualización e imagen.** Estar actualizado en cuanto al uso de las tecnologías, como es el caso de la VR, permite resolver, realizar y presentar proyectos de una forma enriquecida tanto técnica como estéticamente.
- **Experiencia multisensorial.** Vinculado al punto anterior, la VR estimula diferentes sentidos (vista, oído e incluso tacto) despertando una sensibilidad diferente de quien la experimenta. Cabe señalar que la VR permite controlar y manipular el entorno y los objetos de una manera que en la realidad no sería posible (experiencia individual controlada).
- **Comprensión de espacios y contenidos.** La VR permite generar espacios controlados en los que el arquitecto y diseñador pueden moverse con total libertad, permitiéndoles probar diseños hipotéticos. Con relación a esto, el informe de Mavridou, Hoelscher y Kalff (2009), permite ver con mayor claridad cómo las propiedades

geométricas y topológicas del espacio, afectan el flujo y movimiento de las personas. Lo anterior, tanto en interiores (como puede ser una casa o un edificio) como en exteriores (por ejemplo, las ciudades), teniendo implicaciones en las decisiones de diseño. Otros estudios de caso como los que realizaron Fast-Berglund, Gong, y Li (2018), demuestran que la VR mejora no solo la presentación, sino también la comprensión de contenidos por parte de los usuarios.

- **Anticipación y detección de anomalías.** Esto se traduce en una mejor planeación de diseño, reduciendo y eliminando riesgos. Por tanto, facilita el ahorro y aprovechamiento de los recursos humanos, materiales y financieros.
- **Elimina los límites espacio-temporales.** Al respecto, Royo (2004) presenta algunas características espacio-temporales que se pueden encontrar en la VR y que suponen una ventaja respecto a las herramientas de diseño tradicional. Lo multicrónico, que hace referencia a la capacidad de poder reutilizar recursos de proyectos generados y almacenados en el pasado. La reversibilidad, que es la facilidad con la que se pueden “volver pasos hacia atrás”, ya sea corrigiendo un modelo o encausando de otra forma un proyecto. La globalidad, hace referencia a que en el espacio virtual no existe la territorialidad, sino más bien una serie de redes interconectadas (gracias a internet) que permite a las personas trabajar en conjunto y presentar sus proyectos (metaversos) a cualquier hora y desde cualquier punto geográfico del planeta.

- **Colaboración.** La VR puede ser utilizada para mejorar el trabajo entre las personas que participan en el desarrollo de un proyecto. En cuanto a esto, Dorta, Lesage y Pérez (2011), explican que los metaversos pueden compensar la ausencia de un espacio de ideación, ya sea de manera local o remota. En este sentido, cabe mencionar que los metaversos son entornos virtuales tridimensionales en donde las personas pueden interactuar sin tener las limitaciones físicas propias del entorno real.

b) Desventajas

- **Aparición de náuseas, mareos y fatiga en los usuarios como respuesta fisiológica a estímulos inusuales.** Los espacios y objetos presentados en la VR pueden tener atributos a los que no estamos acostumbrados en el entorno real, causando malestar en el usuario. Por este motivo, los manuales de gafas de VR recomiendan un tiempo de uso gradual; además, las aplicaciones tienen distintos tipos de intensidad para usuarios principiantes, medios y expertos.
- **Problemas técnicos asociados a los dispositivos empleados.** La VR, al igual que muchas otras tecnologías, se ve condicionada por los dispositivos eléctricos necesarios para su funcionamiento.
- Existe la posibilidad de que se tengan problemas de ergonomía y comodidad en el uso de los dispositivos de VR a causa de la necesidad de espacio, tanto para el movimiento del usuario como para la detección de los sensores.
- **Potenciales problemas de visualización.** El usuario puede presentar duplicación de las imágenes producida por dos fenómenos que también se pueden dar en la VR. Asimismo, es posible que también se vean afectados por el emborronamiento de imágenes (desenfoque de movimiento) y por la estroboscopia (percepción de múltiples copias de una imagen al mismo tiempo). Otro problema de visualización es el llamado “efecto de puerta de pantalla”, que ocurre en algunos dispositivos de VR, en donde parece que el mundo virtual se ve a través de una malla.
- **Reducción del campo de visión.** Para acceder a la VR se necesita un mediador, generalmente un dispositivo electrónico, que limita el campo de visión.
- **Costos.** La VR requiere una inversión inicial que depende en gran medida del grado de inmersión. La forma más básica de iniciar una experiencia VR es por medio de dispositivos móviles como teléfonos inteligentes y tabletas, mientras que tener una experiencia semi-inmersiva, requiere hacer uso de dispositivos más costosos como computadoras y gafas de VR. Finalmente, tener una experiencia inmersiva total requiere hacer uso de dispositivos periféricos especializados de última generación como guantes, caminadoras y trajes de VR. No obstante, como menciona Sidani (2021), la VR ha mostrado desarrollos alentadores a medida que los precios de las tecnologías se vuelven cada vez más accesibles para el consumidor general y aumenta la potencia computacional.

Como se ha podido apreciar, las definiciones de VR son variadas. Más aún, aunque tiene aspectos positivos, también hay otros puntos por mejorar. Teniendo ahora la visión de las dos caras de la moneda, en la siguiente sección se propone el uso de la VR en la práctica de la arquitectura sostenible.

La RV y la metodología BIM como prácticas de una arquitectura sostenible

La arquitectura evoluciona continuamente de la mano de la innovación y la digitalización de procesos. En la última década, los desarrollos del software de diseño asistido por computadora (CAD) y del Modelado de Información de Construcción (*Building Information Modeling - BIM*), han permitido generar y gestionar los datos para poner en marcha las diferentes etapas del ciclo de vida de los proyectos de construcción. Concretamente, en lo que se refiere al concepto de BIM, Penttilä (2006) lo define como “un conjunto de políticas, procesos y tecnologías interrelacionados que generan un enfoque sistemático a la gestión de la información crítica para el diseño y proyecto de edificios”.

Mientras que el Comité de Proyecto Estándar del Modelo de Información de Construcción Nacional de EUA (NIBS, 2022) plantea lo siguiente: “BIM es un recurso de conocimiento compartido para obtener información sobre una instalación, formando una base confiable para las decisiones durante su ciclo de vida, definido desde la primera concepción hasta la demolición”.

Más aún, Ding, Zhou y Akinci (2014) mencionan:

BIM se puede describir como un proceso que expande datos en un modelo 3D de información nD, que permite dinámica y virtualmente realizar un análisis de programación, costos, estabilidad, sustentabilidad, mantenibilidad, simulación de evacuación y seguridad, solo por nombrar algunos [...] Este modelo nD proporciona una base de datos que le permite a las partes interesadas recuperar la información necesaria a través del mismo sistema, lo que les permite trabajar de manera coherente y eficiente durante el ciclo de vida completo del proyecto.

BIM supone una colaboración multiprofesional en la que varias áreas del conocimiento comparten los mismos conjuntos de datos; opera en una plataforma unificada para mejorar y agilizar el proceso de construcción; permite que la información multidisciplinaria se superponga dentro de un modelo 3D; asimismo, se puede vincular con la VR para añadir más capas de interactividad e inmersión a los proyectos de construcción. Dicha vinculación permite suponer que los análisis de desempeño ambiental se pueden realizar de una manera más precisa y eficiente. En la Figura 5 se presenta un ejemplo de render 3D visualizado a través de VR.

Para determinar la relación que existe entre los conceptos hasta ahora estudiados, es necesario realizar un análisis bibliométrico. El resultado esperado es un mapa en el que se muestran las interacciones entre ellos. Sidani (2021) llevó a cabo el ejercicio con 2 950 artículos, mediante las pautas de notificación preferida de elementos para revisiones sistemáticas y metaanálisis (PRISMA). El primer paso que siguió fue identificar ciertas palabras clave en los títulos de los artículos, tales como VR, XR y Arquitectura. Las bases de datos consultadas incluían: *Academic Search Complete*, *Web of Science*, *OCS PUS*, *INSPEC*, *Science Direct*, *Emerald*, *Taylor y Francis*, *Cambridge*, *Oxford*, *SAGE*, *SciELO*, *Springer Link*, *Wiley*, *ACM*, *ASME*, *ASCE*, *IEEE*, *PIO* y *SIAM*. Como resultado del análisis, se identificaron seis campos de acción en los que se puede relacionar la VR y la arquitectura. Estos son:

- **Colaboración:** centrado en el trabajo en equipo, principalmente en la mejora de la comunicación y la interacción entre los individuos.
- **Diseño de la construcción:** orientado en mejorar la etapa de diseño de un proyecto de construcción.
- **Gestión de construcción:** enfocado en mejorar la gestión de un proyecto de construcción a lo largo de las etapas de diseño y construcción.
- **Educación:** centrado en mejorar el conocimiento de cualquier entidad relacionada con la construcción (obreros, ingenieros, arquitectos, etc.) y/o estudiantes.
- **Seguridad en la construcción:** orientado en mejorar la seguridad del sitio de construcción mediante la concientización.



Figura 5. Render de modelo 3D para VR desarrollado con ayuda del software Enscape. Adaptado de Enscape: Virtual Reality, 2022 (<https://enscape3d.com/features/>)

- **Gestión de instalaciones:** enfocado en mejorar la gestión de una instalación en su etapa de operación.

En la investigación de Sidani (2021), el campo que más aparece es el que está relacionado con la colaboración, quizá porque uno de los principales objetivos de la VR es mejorar la interacción humano-humano entre usuarios ubicados de forma remota. Tanto el diseño como la gestión de la construcción, ocupan el segundo lugar con las mismas ocurrencias cada uno. En tercer lugar, queda el campo de educación seguido por el de seguridad, mientras que al final de la lista se encuentra el campo de gestión de instalaciones.

Planteados los campos de acción en los que se puede relacionar la VR y la arquitectura, se explican a continuación las dimensiones de la metodología BIM, para establecer las coincidencias entre ambas partes.

Dimensiones de la metodología BIM

La metodología BIM se ha ido perfeccionando gradualmente, pasando de modelos tridimensionales (3D) a modelos multidimensionales (nD). La primera dimensión (1D) y punto inicial es la idea o concepto del que parte un proyecto de construcción, e incluye la investigación previa para definir las condiciones iniciales, la etapa de diseño y las primeras estimaciones de superficie, volumetría y costos. En materia sustentable, Wong y Zhou (2015) proponen planificar esta etapa considerando los siguientes puntos:

- Evaluar la orientación para reducir los costos de energía.
- Analizar la masa de la construcción para optimizar la envolvente.
- Realizar análisis de iluminación natural.
- Investigar el potencial de captación de agua para reducir la necesidad de su uso.
- Modelar el rendimiento energético de los edificios para reducir las necesidades energéticas o analizar las opciones de energía renovable que puedan reducir los costos.
- Examinar la idoneidad de los materiales sostenibles.
- Diseñar el sitio y la gestión logística para minimizar los residuos y la huella de carbono.

En lo que se refiere a la dimensión 2D, se trata de la representación bidimensional del proyecto en un plano vectorial. Para ello se definen el software CAD, el software de modelado, los materiales, las cargas estructurales, las energéticas y se establecen las bases del plan de desarrollo sostenible. La investigación de Sidani (2021) reveló que *Autodesk Revit* es el software de modelado BIM más utilizado vinculado con la VR, mientras que *Unity* es el software de VR que se aplica con mayor frecuencia en los proyectos BIM. También destaca *Enscape* como software de VR y la capacidad de renderizado de *Unreal Engine* para simular la interacción de la luz con los materiales.

La tarea de lograr procesos de construcción más limpios y bajos en carbono, así como de lugares de trabajo más ecológicos, se ha convertido en una preocupación importante en el sector de la construcción. De esta manera, se ha planteado la necesidad de mecanismos más efectivos y de bajo costo para desarrollar las dimensiones durante todo el ciclo de vida del proyecto. Así, en la tercera dimensión, se trata de integrar en un modelo de 3D tanto los detalles de instalaciones, de eficiencia energética, de mantenimiento, de administración y de materiales, como los aspectos técnicos, estructurales, económicos, comerciales y fases de ejecución. El propósito es reducir los rediseños, el procesamiento, las revisiones y los cambios en el proyecto de construcción (Ding, Zhou, & Akinci, 2014).

Pero el modelado no termina aquí. La mayoría de los académicos y profesionales coinciden en que la dimensión 4D está relacionada con el tiempo y las dinámicas de ejecución del proyecto (Charef, Alaka, & Emmit, 2018). El punto clave es mitigar los riesgos verificando los conflictos del flujo de trabajo, las tareas asignadas a cada dependencia y la optimización de la logística de construcción. Desde la perspectiva ambiental, la 4D en el estudio de Jupp (2017), incluye las siguientes etapas del proceso constructivo: planeación, programación y control. Adicionalmente, considera la gestión de la seguridad *in situ* y la gestión medioambiental. Guerra (2020) amplía aún más la 4D en materia de sustentabilidad para enfatizar el manejo de residuos de construcción, desde su recuperación, pasando por su reciclaje y llegando hasta su reutilización. Con estas ideas en mente, se explica la quinta dimensión (5D) referente a la sostenibilidad del proyecto, haciendo hincapié en un movimiento integral conocido como *green BIM*.



Green BIM y la quinta dimensión BIM

Ha sido tan grande la preocupación por minimizar el impacto ambiental de los proyectos arquitectónicos, que han surgido movimientos como el *green BIM*, el cual intenta implementar una visión sostenible en todas las etapas del ciclo de vida de un proyecto, principalmente en lo que se refiere a:

- Procesos de consumo de energía y de carbono.
- Extracción de materias primas.
- Fabricación de materiales de construcción.
- Montaje de materiales *in situ*.
- Ocupación o uso.
- Reparación y mantenimiento.
- Demolición.
- Deconstrucción.
- Eliminación o reutilización de los materiales.

Algunos expertos coinciden en incluir una visión *green* en la quinta dimensión *BIM* (Yung, Wang, Wang, & Jin, 2014). A pesar de que todavía se discute lo que implica realmente el “*BIM* verde” o *green BIM*, Wu e Issa (2015) señalan:

Green BIM es la sinergia de *BIM* y la construcción ecológica, que se utiliza para mejorar los resultados sostenibles de un proyecto arquitectónico durante todo el ciclo de vida, incluidas las etapas de operación (puesta en marcha y ocupación), reparación, mantenimiento y demolición, haciendo especial hincapié a la aplicación de la eficiencia energética durante dicho ciclo de vida.

Además, dejan entrever que el *green BIM* es un sistema sociotécnico de múltiples capas debido a que contiene un núcleo técnico y una parte social que combina la tecnología hecha por el hombre y las consecuencias sociales e institucionales de su implementación.

Es indudable que el concepto de sostenibilidad y muchos otros relacionados como el *green BIM*, han transformado la forma en que se realizan los proyectos arquitectónicos, implicando el uso cada vez más frecuente de *software* de diseño asistido por computadora (*CAD*) y de modelados de información de construcción (*BIM*) para lograr sus objetivos ecológicos.

Pero también, ha explorado nuevos *softwares* y tecnologías que no son frecuentemente utilizadas por la arquitectura (como es el caso de la *VR*).

Habiendo discutido el *green BIM* y la quinta dimensión *BIM*, en los siguientes párrafos se plantea cómo se relaciona la *VR* con la metodología *BIM* desde una perspectiva sostenible.

Relación entre el *green BIM* y la *VR*

Tanto el *green BIM* como la *VR* tienen como núcleo técnico el *software*. En el caso del *green BIM*, el *software* permite insertar datos e información adicional de sostenibilidad en el modelo 3D. Mientras que en el caso de la *VR*, el *software* contribuye a la visualización de dicho modelo mejorando la planeación del proyecto y la toma de decisiones. Otra característica que relaciona al *green BIM* con la *VR*, es que el primero integra la tecnología digital de vanguardia para aportar datos al modelado 3D. En ese sentido, la *VR* es considerada una tecnología de la industria 4.0 y 5.0 que se busca incorporar en los procesos de producción de diversos sectores de desarrollo humano.

Si bien la *VR* en su integración con el *green BIM* puede convertirse en una herramienta muy útil en la toma de decisiones de sostenibilidad de un proyecto de construcción, lo cierto es que la tasa de adopción de *green BIM* es aún muy baja. Más aún en su relación con la *VR*, por lo que el potencial de ambas herramientas combinadas todavía no se ha explorado ampliamente.

Con base en lo que hasta el momento se ha expuesto en este artículo, se pueden llegar a establecer cuáles son las áreas de oportunidad en los que la *VR* puede ser aplicada a los proyectos *green BIM*, para lo cual se toman como referencia los seis campos de acción propuestos por Sidani (2021), así como las ventajas de la *VR* y las dimensiones de la metodología *BIM* mencionadas en apartados anteriores. Así, se propone lo siguiente:

- **Colaboración.** Centrado en acompañar todas las dimensiones de un proyecto arquitectónico desarrollado con la metodología *BIM* (de 1D a nD). Dentro de las ventajas de la *VR* se expone que puede ayudar a mejorar el trabajo en equipo en lo que respecta a la comunicación, la interacción entre los profesionistas e individuos involucrados en el proyecto, pero, sobre

todo, a mejorar la toma de decisiones en las etapas de construcción. Al respecto, se puede mencionar que la *VR* en conexión con internet permite generar metaversos que pueden sustituir o compensar la ausencia de un espacio de trabajo, ya sea de manera local o remota (Dorta, Lesage, Pérez, & Bastien, 2011).

- **Diseño de la construcción.** Abarca las dimensiones 1D a 3D dentro de la metodología *BIM*. En esta etapa la *VR* permite generar espacios controlados en los que el arquitecto y diseñador pueden probar diseños hipotéticos y desarrollar sus proyectos con total libertad. Dentro de las ventajas de la *VR* se habla de reversibilidad, que es la facilidad con la que se pueden “volver pasos hacia atrás”, ya sea corrigiendo un modelo o encausando de otra forma un proyecto. En materia sustentable, esto se traduce en una mejor planeación y un ahorro de recursos a la hora de hacer las revisiones, los rediseños, el procesamiento y los cambios del proyecto. Un simple clic permite realizar modificaciones oportunas como el color de las paredes, el material de los suelos, o incluso los tipos de mobiliario sin tener que generar gasto alguno.
- **Gestión de la construcción.** Está relacionada con la dimensión 4D y 5D de la metodología *BIM* que se refiere al tiempo y las dinámicas de ejecución del proyecto arquitectónico. Al respecto, se puede decir que los entornos de *VR*, al no tener las limitaciones físicas propias de la realidad, ayudan a optimizar los procesos y tiempos de trabajo aumentando y mejorando la productividad. La investigación de Sidani (2021) concluyó que la *VR* desarrolla mecanismos de bajo costo para mejorar la gestión de un proyecto de construcción. Dentro de las ventajas de la *VR*, está su capacidad para anticipar y detectar anomalías en el desarrollo de los proyectos, lo que se traduce en una mejor planeación del diseño, la reducción y eliminación de riesgos, así como el ahorro y aprovechamiento de los recursos humanos, materiales y financieros. En un mundo cada vez más competitivo y respetuoso del medio ambiente, el proceso de diseño va encontrando en las

nuevas tecnologías una forma para ahorrar recursos y costos materiales.

- **Educación.** Es el campo enfocado a mejorar el conocimiento de cualquier individuo relacionado con la construcción (obreros, ingenieros, arquitectos, etc.) y/o estudiantes. Al respecto, Fast-Berglund, Gong y Li (2018) muestran que la *VR* mejora la comprensión de la información y los contenidos al presentarlos de una forma “enriquecida”, tanto técnica como estéticamente. Esto aplica para la capacitación y la presentación de un proyecto al cliente. Dentro de las ventajas de la *VR* se menciona la importancia de mantenerse actualizado, ya que esto implica tener herramientas nuevas para resolver, realizar y presentar proyectos.
- **Seguridad en la construcción.** Está relacionada con la tercera dimensión del modelo *BIM* en donde se planean los aspectos técnicos. La *VR* aplicada a los modelos *BIM* permite presentar proyectos que pueden ser recorridos por los arquitectos e ingenieros, aún sin estar construidos, lo que les permite anticiparse y detectar anomalías de construcción para realizar un mejor diseño que reduzca y elimine riesgos. En *green BIM*, arquitectos y planificadores se enfocan cada vez más en las formas de minimizar, tanto el consumo de energía de los edificios como las emisiones de carbono a través de un mejor diseño.
- **Gestión de instalaciones.** La *VR* mejora la gestión de una instalación en su etapa de operación, ya que permite ver con mayor claridad las propiedades geométricas y topológicas del espacio que afectan el flujo y movimiento de las personas, tanto en interiores (casa o edificio) como en exteriores (ciudades). En esta etapa, en materia sostenible, se destaca la importancia de reducir la ocurrencia de emergencias en las operaciones de la edificación, mejorando el desempeño de seguridad y reduciendo el desperdicio de recursos. También se hace hincapié en la importancia de reducir las operaciones de reparación y mantenimiento de una edificación.



En la Tabla 1 se resumen los puntos hasta ahora abordados. Como se observa, para cada campo de acción analizado, el *BIM* ofrece un punto de partida sólido. En lo que se refiere al *green BIM*, complementa de forma adecuada a la metodología *BIM*. Pero la *VR*

mejora significativamente la información y experiencia que este tipo de herramientas puede brindar a la arquitectura sostenible.

Tabla 1
Comparación de los campos de acción de BIM, green BIM y VR. (Elaboración propia).

Campo de Acción	BIM	Green BIM	VR
Colaboración	Contempla todas las dimensiones del proyecto (1D a nD)	Está relacionado con las prácticas ambientalmente sostenibles como la reducción de consumo de energía y la huella de carbono en el espacio de trabajo.	Mejora la comunicación, la interacción entre profesionales y la toma de decisiones. Sustituye o compensa la ausencia de un espacio de trabajo lo que permite generar un ahorro de recursos.
Diseño de la construcción	Se extiende de la 1D a la 3D en donde se plantean las condiciones iniciales del proyecto, el diseño y las estimaciones de superficie, volumetría y costos.	Es útil para los procesos de consumo de energía y de carbono, extracción de materias primas, fabricación de materiales de construcción, montaje de materiales <i>in situ</i> , ocupación o uso, reparación y mantenimiento, demolición, deconstrucción, eliminación o reutilización de los materiales.	Permite desarrollar diseños hipotéticos con total libertad. Mejora la planeación del proyecto gracias a su capacidad de reversibilidad para modificar y corregir fácilmente un modelo.
Gestión de la construcción	Está relacionado con las dimensiones 4D y 5D que incluyen el tiempo y las dinámicas de ejecución.	Principalmente considera la planeación, programación y control. Adicionalmente, toma en cuenta la gestión de la seguridad <i>in situ</i> y la gestión medioambiental, enfatizando el manejo de residuos de construcción, desde su recuperación pasando por su reciclaje y llegando hasta su reutilización.	Los espacios virtuales no tienen limitaciones físicas o geográficas, lo que permite optimizar los procesos y tiempos de trabajo, aumentando y mejorando la productividad. Mejora la planeación en la etapa de diseño y permite reducir y mitigar los riesgos en el proceso de construcción. También facilita el ahorro y el aprovechamiento de los recursos.
Educación	No es aplicable a una dimensión en particular.	Está asociado con los conocimientos que tienen los agentes participantes (obreros, ingenieros, arquitectos, etc.) relacionados con	Mejora la comprensión de la información y los contenidos en materia de capacita-

		la implementación de la sostenibilidad en un proyecto arquitectónico.	ción o de presentación de un proyecto al cliente.
Seguridad en la construcción	Contempla la 3D del modelo <i>BIM</i> en donde se planean los aspectos técnicos del proyecto.	Se centra en minimizar tanto el consumo de energía de los edificios, como las emisiones de carbono a través de un mejor diseño.	Permite presentar proyectos que pueden ser recorridos aún sin estar construidos para anticiparse y detectar anomalías de construcción, reduciendo y mitigando riesgos.
Gestión de instalaciones	Relacionado con la 5D, 6D y 7D que no se incluyen porque no están consensuadas de manera general.	Reduce la ocurrencia de emergencias en las operaciones de la edificación. Mejora el desempeño de seguridad. Disminuye el desperdicio de recursos. También hace hincapié en la importancia de minimizar las operaciones de reparación y mantenimiento de una edificación.	Facilita la visualización de las propiedades geométricas y topológicas del espacio que afectan el flujo y movimiento de las personas, tanto en interiores como en exteriores, lo que permite reducir las reparaciones y el mantenimiento de una edificación.

Antes de presentar un caso de estudio sobre los conceptos analizados, se debe mencionar que las tendencias de la *VR* indican que próximamente se hablará de la 6D y 7D. Mientras esa discusión científica se lleva a cabo, se describe a continuación la aplicación práctica de la *VR* conocida hasta ahora en China.

Caso de estudio

Para ilustrar los conceptos hasta aquí presentados, enseguida se describe un ejemplo de aplicación en la práctica desarrollado por el despacho de arquitectura *Zaha Hadid Architects* (ZHA). Se trata de un complejo cívico conocido como *Unicorn Island* desarrollado en la Nueva Área de Tianfu, al sur de la ciudad de

Chengdu, China. El plan maestro de 67 hectáreas de uso mixto, dará servicio a 70 000 residentes y trabajadores. Así, se convertirá en una importante fábrica de chips de computadora para el mundo, además de otras herramientas de hardware y computación móvil. En la Figura 6 se muestra el modelo 3D del proyecto.

El diseño del complejo se presenta como una prueba del potencial que tiene la *VR* como herramienta para el diseño, pues las posibilidades tecnológicas que ofrece permitieron a los arquitectos colaborar en tiempo real para incorporar al diseño sistemas de conservación y gestión de agua natural, parques que incluyen espacios cívicos verdes con zonas de cultivo para proporcionar a sus habitantes alimentos cosechados *in situ*, así como una mayor conectividad



Figura 6. Render No. 1 del modelo 3D del proyecto Unicorn Island. Imagen extraída de la página oficial del sitio web de Zaha Hadid Architects, 2022 (<https://www.zaha-hadid.com/architecture/unicorn-island-masterplan>).



Figura 7. Render No. 2 del modelo 3D del proyecto Unicorn Island. Imagen extraída de la página oficial del sitio web de Zaha Hadid Architects, 2022 (<https://www.zaha-hadid.com/architecture/unicorn-island-masterplan>).

para crear entornos de vida y de trabajo que mejoran el bienestar de las personas. Además, la configuración radial del complejo en VR permitió tener una mejor comprensión del entorno y en consecuencia lograr una mejor planeación en los recorridos peatonales y ciclistas. También optimizar los espacios a la hora de construir. En el caso de *Unicorn Island*, los edificios se agrupan en torno a una plaza central y una estación de metro. En la Figura 7 se muestra otra perspectiva del proyecto donde se aprecia la interacción entre el agua, la vegetación y los edificios.

ZHA es un despacho que impulsa el uso de las tecnologías inmersivas para desarrollar soluciones de diseño especializadas. Con ayuda de su estudio *Group Virtual Reality Zaha Hadid (ZH VR Group)* ha podido dar forma a la tecnología de VR inmersiva, incluido el modelado 3D en tiempo real con enfoque en su aplicación como herramienta de diseño sustentable, además de aprovechar el potencial de la VR y el valor intrínseco de sus medios para desarrollar formas novedosas de diseño, así como experiencias y presentaciones para proyectos de construcción.

El complejo *Unicorn Island*, como muchos otros proyectos, deja claro que la VR es un ingrediente vital tanto en la colaboración como en el diseño y la gestión de la construcción. La participación de distintos profesionales de manera simultánea y en tiempo real, permite llegar a resultados satisfactorios tanto para el cliente como para el constructor. Es así como muchos de los conceptos teóricos se pueden desarrollar en la práctica cotidiana de la ingeniería, de la arquitectura y de la construcción.

Otros despachos de arquitectura famosos, al igual que ZHA, han trabajado con los principales desarrolladores de hardware y software para habilitar las aplicaciones de la tecnología de VR emergente en la arquitectura. Ejemplos de ello son *Foster + Partners*, *Bjarke Ingels Group (BIG)* y *HOK*, entre otros. En la Figura 8 se aprecia cómo algunos usuarios pueden observar virtualmente un edificio *in situ* que todavía no ha sido construido. Se espera que este sea el común denominador de los proyectos arquitectónicos más importantes a lo largo y ancho del mundo.

Se puede adelantar que el futuro de la VR tiene un gran potencial. Las aplicaciones pueden ir desde el entretenimiento en un centro de diversiones, hasta la simulación de operaciones en los quirófanos de un hospital. Habiendo presentado estos ejemplos de aplicación, se procede ahora al establecimiento de las principales conclusiones de la investigación.

Conclusiones

La revisión de la literatura sugiere que no existe un consenso claro sobre cómo clasificar los medios relacionados con los objetos y espacios virtuales en tres dimensiones. Se proponen los conceptos de XR y MR como categorías generales; sin embargo, existe cierta confusión en la manera en que se utilizan, lo que ha generado acepciones distintas en cuanto a su nivel jerárquico. De igual manera, el concepto de VR no es general y es planteado desde diferentes ópticas y disciplinas, haciendo difícil la noción de lo que implica y sus posibles alcances en la arquitectura.



Figura 8. Vista en tiempo real de un proyecto arquitectónico in situ mediante gafas de VR, realizado por el despacho de arquitectura Foster + Partners. Imagen extraída del canal oficial de Unreal Engine en YouTube, 2022 (<https://www.youtube.com/watch?v=YohEKgaQWGI>).

Todos los “tipos” de realidad (*XR*, *MR*, *AR*, *AV*, *VR*) están relacionados con los objetos y espacios virtuales en tres dimensiones. No obstante, es importante aclarar que cumplen diferentes propósitos y funciones específicas, por lo que no es conveniente hablar de estos “tipos de realidad” de manera generalizada.

La *VR* permite la simulación y busca generar en el usuario una experiencia apegada a la realidad. Existen distintos sistemas de *VR* con diferente grado de inmersión (no inmersivos, semi-inmersivos e inmersivos); esencialmente, utilizan dispositivos tecnológicos específicos de acuerdo a los objetivos que se quieren alcanzar. De hecho, se puede decir que los modelos 3D, que se generan por medio de la metodología *BIM* y que gracias al uso de *software* especializado (como Autodesk Revit) pueden ser presentados en una pantalla “tradicional” de computadora, forman parte de los sistemas de *VR* no inmersivos. En todo caso, es cuestión del arquitecto investigar cómo llevar sus proyectos a distintos niveles de inmersión con el propósito de enriquecerlos.

BIM aún está lejos de ser una metodología totalmente colaborativa e integradora. Por lo tanto, es necesario generar nuevos enfoques de fácil acceso para capitalizar los diferentes perfiles y antecedentes académicos de los interesados en los proyectos de construcción.

La etapa del ciclo de vida en la que se tiene mejor idea de cómo integrar la *VR* en los modelos desarrollados mediante la metodología *BIM* es en la de diseño, ya que permite hacer una planeación temprana de la eficiencia de todo el ciclo de vida del proyecto.

La revisión de la literatura sugiere que la *VR* brinda sus máximos beneficios en las primeras dimensiones del *BIM* convencional por ser las que están mejor definidas. Caso contrario a lo que sucede en las etapas posteriores del ciclo de vida como el mantenimiento o la demolición. En ese sentido, se hace evidente que la *VR* implementada en los modelos *BIM* no está alcanzando todo su potencial. De esta forma, se espera que las investigaciones futuras puedan centrarse en el manejo de los datos proporcionados por *BIM* dentro de las interfaces para saber más específicamente cómo, dónde y cuándo integrar la *VR* en los proyectos arquitectónicos.

Actualmente, la relación de *BIM* y *VR* se centra casi exclusivamente en la visualización de los modelos 3D. Se especula que eso se debe a que no hay un *software* general que permita transmitir los cambios del modelo *BIM* a la *VR* en tiempo real. Por un lado, el *software BIM* proporciona una visualización precisa de la geometría del edificio, aspecto que no permite una visualización de *VR* nativa. Por otro lado, el *software* de *VR* permite visualizar un sistema inmersivo que no posee componentes para acceder a la base de datos e información paramétrica que genera el modelo *BIM*.

La tasa de adopción de la *VR* en los proyectos *BIM*, y más aún *green BIM*, es todavía muy baja. Aunado a esto, no existe una revisión sistemática de los principales esfuerzos y logros de investigación sobre las formas en que la *VR* puede mejorar la sostenibilidad ambiental de los proyectos arquitectónicos. Por ello, es necesario que tanto académicos como profesionales en el área exploren y reporten sus experiencias sobre el tema, ya que eso permitirá que esta interesante



área del conocimiento siga creciendo, evolucione y se consolide como un estándar en la industria de la construcción.

Referencias

- Azuma, R.T., 1997, A survey of augmented reality: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 6(4), 355-385. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
- Azuma, R., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S. and B. MacIntyre, 2001, Recent advances in augmented reality: *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6), 34-47. DOI: 10.1109/38.963459
- Bamodu, O. and Ye, X., 2013, Virtual Reality and Virtual Reality System Components: *Advanced Materials Research*, 765-767, 1169-1172. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.765-767.1169>
- Berg, P. and Vance, J.M., 2017, Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey: *Virtual reality*, 21, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10055-016-0293-9>
- Biocca, F. and Levy, M.R., 1995, Communication in the age of virtual reality: *New Jersey, Lawrence Erlbaum Associates*.
- Björgvinsson, E., Ehn, P. and Hillgren, P.A., 2010, Participatory design and democratizing innovation: *Proceedings of the 11th Biennial participatory design conference*, 41-50. <https://doi.org/10.1145/1900441.1900448>
- Bolter, J.D. and Grusin, R.A., 1996, Remediation: *Configurations*, 4(3), 311-358. <http://doi.org/10.1353/con.1996.0018>
- Burdea, G.C. and Coiffet, P., 2003, Virtual reality technology: *John Wiley & Sons*.
- Burdea, G. and Coiffet, P., 1993, La réalité virtuelle: *Hermès*.
- Burdea, G., Richard, P. and Coiffet, P., 2003, Multimodal virtual reality: Input-output devices, system integration, and human factors: *International Journal of Human-Computer Interaction*, 8, 5-24. <https://doi.org/10.1080/10447319609526138>
- Caudell, T.P. and Mizell, D.W., 1992, Augmented Reality: An Application of Heads-Up Display Technology to Manual Manufacturing Processes: *Hawaii International Conference on System Sciences* (pp. 659 -669). Boeing Computer Services, Research and Technology.
- Charef, R., Alaka, H. and Emmitt, S., 2018, Beyond the third dimension of BIM: A systematic review of literature and assessment of professional views: *Journal of Building Engineering*, 19, 242-257. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.04.028>
- Ding, L., Zhou, Y. and Akinci, B., 2014, Building Information Modeling (BIM) application framework: The process of expanding from 3D to computable nD: *Automation in construction*, 46, 83-93. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.04.009>
- Dorta, T., Lesage, A., Pérez, E. and Bastien, J.M., 2011, Signs of collaborative ideation and the hybrid ideation space: *In Design Creativity 2010*, 199-206. ISBN 978-0-85729-223-0
- Fast-Berglund, Å., Gong, L. and Li, D., 2018, Testing and validating Extended Reality (xR) technologies in manufacturing: *Procedia Manufacturing*, 25, 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.054>
- Freitas, M.R. and Ruschel, R.C., 2013, ¿What is happening to virtual and augmented reality applied to architecture? DOI:10.52842/conf.caadria.2013.407
- Gubern, R., 2007, Del bisonte a la realidad virtual: *Barcelona, Gustavo Gili*.
- Guerra, B.C., Leite, F. and Faust, K.M., 2020, 4D-BIM to enhance construction waste reuse and recycle planning: Case studies on concrete and drywall waste streams: *Waste Management*, 116(1), 79-90. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.07.035
- Jupp, J., 2017, 4D BIM for environmental planning and management: *Procedia engineering*, 180, 190-201. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.178>
- Kerckhove, D. d. (2018). La piel de la cultura, investigando la nueva realidad electrónica: *Barcelona, Gedisa Editorial*.
- Kwok, J., Wong, W. and Zhou, J., 2015, Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review: *Automation in construction*, 57, 156-165. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.06.003>
- Lanier, J., 1988, "A vintage Virtual Reality interview". <http://www.jaronlanier.com/vrint.html>
- Leeson, L.H., 1998, La irrealidad y el deseo: entrevista con Jaron Lanier, "inventor" de la Realidad Virtual: *El paseante*, (27), 78-81. ISSN 1130-0388
- Mann, S., Furness, T.A., Yuan, Y., Iorio, J. and Wang, Z., 2018, All Reality: Virtual, Augmented, Mixed (X), Mediated (X,Y), and Multimeditated Reality: *arXiv e-prints*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.08386>

- Mavridou, M., Hoelscher, C. and Kalff, C., 2009, The impact of different building height configurations on navigation and wayfinding: *Proceedings of the 7th international space syntax symposium*, 72, 1-11.
- Milgram, P. and Kishino, F., 1994, A taxonomy of Mixed Reality visual displays: *IEICE Transactions on Information and Systems*, E77-D(12), 1321-1329. ISSN impreso: 0916-8532
- Penttilä, H., 2006, Describing the changes in architectural information technology to understand design complexity and free-form architectural expression: *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 11, 395-408.
https://www.itcon.org/papers/2006_29.content.02253.pdf
- Royo, J., 2004, Diseño Digital: *Barcelona, España, Paidós*.
- Schnabel, M.A., Wang, X. and Hartmut Seichter, T.K., 2008, "Touching the untouchables: Virtual, augmented-and reality". file:///C:/Users/Angel/Downloads/2008-TouchingTheUntouchablesVirtual-Augmented-AndReality.pdf
- Schnabel, M.A., Wang, X. and Hartmut Seichter, T.K., 2010, Touching the untouchables: Virtual-, augmented-and reality: *Design Creativity*, 199-206.
https://www.researchgate.net/publication/30874792_Touching_The_Untouchables_Virtual-Augmented-And_Reality
- Shen, Y., Ong, S.K. and Nee, A.Y., 2010, Augmented reality for collaborative product design and development: *Design studies*, 31(2), 118-145.
<https://doi.org/10.1016/j.destud.2009.11.001>
- Sidani, A., Dinis, F.M., Sanhudo, L., Duarte, J., Santos Baptista, J., Pocas Martins, J. and Soeiro, A., 2021, Recent Tools and Techniques of BIM-Based Virtual Reality: A systematic review: *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(2), 449-462. DOI: 10.1007/s11831-019-09386-0
- Sutherland, I., 1965, The Proceedings of the Congress of the International Federation of Information Processing (IFIP): *London, Macmillan and Co.*
- Wong, J.K. and Zhou, J., 2015, Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: *Automation in construction*, 57, 156-165.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.06.003>
- Wu, W. and Issa, R.R., 2015, BIM execution planning in green building projects: *Journal of Management in Engineering*, 31(1). DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000314
- Yung, P., Wang, J., Wang, X. and Jin, M., 2014, A BIM-enabled MEP coordination process for use in China: *Journal of Information Technology in Construction*, 19, 383-398. ISSN: 1874-4753