

Revisión sistemática de la literatura: aumento de la eficiencia energética de los edificios a través del *retrofit* en un enfoque BIM

Thais Schettini Gonzalez Borges

Profesora FAUFBA / Estudiante de Maestría PPGAU, UFBA, Brasil
schettinithais@gmail.com

Érica de Sousa Checcucci

Profesora Doctora, UFBA, Brasil.
erica.checcucci@ufba.br

RESUMEN

La demanda de eficiencia energética en Arquitectura, Ingeniería, Construcción y Operación (AECO) ha impulsado la investigación de tecnologías que puedan contribuir a esta necesidad mundial. El *Building Information Modeling* (BIM) permite realizar simulaciones que favorecen los estudios para ampliar la eficiencia energética de edificios nuevos o existentes que requieren *retrofit* y en este caso tienen más limitaciones. Este artículo es resultado parcial de una investigación de maestría en curso y presenta los resultados encontrados en la Revisión Sistemática de Literatura (RSL) realizada con el objetivo de investigar el Estado del Arte de la simulación computacional para la expansión de la EEE mediante *retrofit* con el uso de tecnologías BIM: el *software* más utilizado, los flujos de trabajo adoptados por los investigadores, las innovaciones para el sector, las tendencias y desafíos para el uso de BIM con el objetivo de aumentar la EEE a través del *retrofit*. Se espera que este trabajo contribuya con el avance de la adopción de modelos para simulación energética y aumento de EEE en edificios existentes.

PALABRAS-CLAVE: Eficiencia Energética de Edificios. *Retrofit*. BIM.

1 INTRODUCCIÓN

Con los avances tecnológicos del siglo XX, se comenzaron a construir edificios con dependencia del acondicionamiento artificial, pero la crisis del petróleo en la década de 1970 puso en evidencia la escasez de recursos naturales y se replantearon los problemas energéticos a nivel mundial (BRAGA, 2015; MENDES et al., 2005). Ante este escenario, se observó la necesidad de aplicar normativas para aumentar la Eficiencia Energética de los Edificios (EEE), promoviendo la contención del gasto energético innecesario, sin dejar de ofrecer comodidad a los usuarios (LAMBERTS; DULTRA; PEREIRA, 2014).

En la búsqueda de la mejora dentro del campo de la Arquitectura, Ingeniería, Construcción y Operación (AECO), surgió en la década de los 70 el Modelado de Información de Construcción (BIM), que permitió la simulación de escenarios del gemelo digital del edificio construido, el modelado paramétrico y la interoperabilidad que permite el intercambio de datos con otro *software*, entre otras ventajas (ESTMAN et al., 2008).

Schlueter y Geyer (2018) describen que BIM facilita el *Design of Experiments* (DoE) que contribuye a la comparación de las mejores estrategias de *retrofit* para el edificio existente. De esta manera, el edificio existente puede pasar por el proceso de *retrofit* con el objetivo de EEE y puede optimizarse mediante el uso de la tecnología BIM.

La realización de una Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) ayuda en la investigación de las producciones científicas más relevantes sobre un tema determinado. Se realiza una RSL en base a un protocolo previamente definido con pasos para ayudar en la gestión eficiente de las distintas producciones. RSL “sigue principios para presentar un método transparente, replicable y actualizable” (BRENNER; HUMMEL, 2012 apud OPUKU et al., 2021, p. 2, nuestra traducción).

El objetivo de este artículo es presentar el resultado de una RSL que identificó el estado del arte de la simulación por computadora para la expansión de la EEE a través del *retrofit* con el uso de tecnologías BIM. A partir de esta revisión fue posible identificar métodos, herramientas y técnicas existentes para realizar esta simulación.

2 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN Y SELECCIÓN DE TRABAJOS

La RSL se realizó con la ayuda del *software Start*¹ en mayo de 2021. La principal pregunta a responder fue: “¿Qué herramientas y técnicas se están utilizando para la simulación y análisis de EEE con BIM?”. Para el control, fueron leídos los estudios de Sanhudo et al. (2018), Leitner, Scheer y Santos (2020), Romero (2003) y Lamberts, Dutra y Pereira (2014).

Se realizaron búsquedas de trabajos publicados en las siguientes bases de datos: Science Direct®, Association for Computing Machinery® (ACM®) en la colección “The ACM Full-Text collection”, Web of Science® (colección principal), Scopus® e Institute of Electrical and Electronics Engineers® (IEEE®).

Se utilizó una única “string”, combinando diferentes palabras clave para la búsqueda, con el fin de encontrar trabajos que tratan los 3 temas principales de la investigación: “(BIM o *Building information modeling* of *Building Information Modelling*) y (*Energy Efficiency* o *Energy-efficient* o *Energy Retrofitting* o *Energy Consumption*) y (*Retrofit* ou *Retrofitting*)”.

En total, se encontraron 216 artículos, de los cuales 78 estaban duplicados. De los 138 restantes, se leyó el título, las palabras clave y el resumen de las publicaciones que se encontraron aceptadas o rechazadas. Después de este proceso, se incluyeron 49 artículos para ser leídos en su totalidad, ya que trataban los tres temas: EEE, BIM y *retrofit*. Las obras que no fueron leídas y que tuvieron la aplicación del criterio de exclusión fueron aquellas que no fueron encontradas para su lectura; que no se ocupen de EEE, BIM y *retrofit*; o que tiene el objetivo de simplemente analizar una herramienta.

En las siguientes sesiones se presentarán y discutirán los principales resultados encontrados en los trabajos evaluados. RSL también tuvo una fase de extracción de datos bibliométricos que se presenta en otro artículo de los mismos autores.

3 QUÉ ES RETROFIT

Según Feng et al., (2020) existen dos opciones para aumentar el rendimiento de los edificios existentes: renovación o reconstrucción. La reconstrucción consiste en la demolición del edificio y la construcción de uno nuevo con el objetivo de adoptar parámetros para una mayor eficiencia (MARIQUE; ROSSI, 2018 apud FENG et al., 2020). La renovación consiste en cambiar partes del edificio existente (JENSEN et al., 2018 apud FENG et al., 2020). El proceso de renovación para mejorar la eficiencia energética se trata en la investigación RSL como el proceso de rehabilitación energética.

Otros autores trabajan en el concepto de *retrofit* para mejorar la sostenibilidad del edificio. Según la Agencia de Protección Ambiental (2012 apud BU et al., 2015, p. 189, nuestra traducción) el concepto de *Green Building* (GB) “se refiere a la práctica de crear y utilizar estructuras y procesos ambientalmente responsables y eficientes en términos de recursos a lo largo del ciclo de vida de un edificio”. Cuando el concepto de GB se aplicó a edificios existentes, en el proceso identificado como Diseño de *Retrofit Design* (RD) se clasificó como Diseño de *Green Retrofit Design* (GRD) (BU et al., 2015). El GRD tiene dos objetivos, que son presentar la

¹ Creado por el Laboratorio de Investigación en Ingeniería de Software (LaPES) de la Universidad Federal de São Carlos (UFSCar).

eficiencia energética del edificio y reducir las emisiones de carbono en su funcionamiento (MEHNDI; CHAKRABORTY, 2020).

El proceso de rehabilitación para aumentar la eficiencia energética de los edificios ha recibido en los últimos años incentivos o requisitos gubernamentales para su aplicación en varios países (AHMED; ASIF, 2020 apud FREITAS et al., 2020; SARTORI; CALMON, 2019; HOSSEINI; SHIRMOHAMMADI; ASLANI, 2020). Según el Department of Standard Malaysia:

[...] existen varios códigos y normas que se pueden aplicar para mejorar el rendimiento energético en edificios existentes, por ejemplo, ANSI, ASHRAE, USGBC, IES Standard 189.1, Norma para el diseño de edificios ecológicos de alto rendimiento, Norma de Malasia MS1525: 2014, el índice estándar Green Building Index (GBI), Código de Prácticas sobre Eficiencia Energética y Uso de Energías Renovables para Edificios No Residenciales (2014 apud LATIF et al., 2019, p. 4, nuestra traducción).

Gatas y colaboradores (2016) apud Sartori y Calmon (2019), presentan el concepto de energía incorporada y energía operativa. La energía incorporada se refiere al consumo de energía para fabricar e instalar un producto. La energía operativa se refiere al consumo de energía para el uso de ese producto. Según los autores, la modernización aumenta el nivel de energía incorporada, pero disminuye el consumo de energía operativa. Sartori y Calmon (2019) citan el ejemplo de Bin y Parker (2012) quienes, al aplicar aislamiento a la fachada del edificio, aumentaron la energía incorporada en los materiales en un 51 % pero redujeron la energía operativa para la calefacción de espacios en un 90 %.

A la hora de elegir soluciones, hay investigadores que se preocupan por aplicar un plan que provoque la menor interrupción posible en la rutina del edificio existente que tiene actividades en curso, como es la situación de Ballard (2000 apud BRANCA, 2019) que aplicó el Último Plan de Sistema (*Last Planner System* - LPS). Para la elección del *retrofit* en la investigación de Tzortzopoulos et al. (2019) Se realizó un análisis de Línea de Equilibrio (*Line of Balance*) para evaluar el nivel de interrupción alto, medio y bajo, teniendo en cuenta la duración de la reforma, los recursos necesarios y la ubicación de la misma.

Para ayudar a elegir la propuesta de *retrofit*, Freitas et al. (2020) realizan una revisión bibliográfica para comprender las soluciones de *retrofit* aplicadas en proyectos en el país. Definen las Medidas de Eficiencia Energética (*Energy Efficiency Measures* - EEMs) en tres niveles de costo. El primer nivel se refiere a cuestiones como el cambio de hábitos de los usuarios, el cambio de lámparas o la instalación de películas en los marcos. El segundo nivel cuenta con elementos como la instalación de una ventana de doble vidrio y el reemplazo de equipos eléctricos. Y el tercer nivel implica la sustitución del sistema HVAC² de aislamiento de fachada y aislamiento de la fachada.

También existen estudios como el de Sartori y Calmon (2019) que, a la hora de elegir las propuestas, consideran la facilidad de instalación, el mantenimiento y la mínima interferencia estética en la fachada, evitando cambios en los ambientes internos.

La fachada, también caracterizada como la envolvente del edificio, suele ser un

² Calefacción, ventilación y aire acondicionado (*Heating, ventilation and air conditioning*).

objetivo de *retrofit*, pues ella debe ser adecuada para lograr un rendimiento superior, ya que está susceptible a la luz, el calor, el aire y otros impactos (UDDIN et al., 2019). Yasar y Kalfa (2012) y Smith, Isaacs, Burgess y Cox (2012) *apud* Spiegelhalter et al. (2014) muestran que la alternativa de *retrofit* más habitual es la sustitución del acristalamiento de fachada por acristalamiento *low-e*³.

En esta RSL se encontraron estudios de *retrofit* para diferentes tipologías: residencial, institucional y comercial. Según Bu et al. (2015) las principales barreras para implementar el proceso de *retrofit* en los sectores públicos son la falta de capacidad técnica y experiencia de los empleados y la falta de recursos financieros para las reformas. Sin embargo, la investigación de Hu (2018) muestra que existen ventajas en la aplicación de *retrofit* principalmente para edificios educativos. Entre las ventajas está el retorno de la inversión financiera, la valoración del edificio en el mercado inmobiliario por ser un GRD además de la función educativa del uso del edificio como laboratorio vivo para la aplicación de EE.

Según Bu y Shen (2013) el sector comercial también tiene intereses en GRD. Los estudios afirman que un edificio de oficinas típico puede reducir el uso de energía entre un 25 % y un 45 % mediante la implementación de soluciones de modernización de moderadas a profundas (LIU et al., 2011 *apud* WOO; GLEASON, 2014).

4 SIMULACIÓN DE LA EEE DE RETROFIT CON BIM

La adopción de BIM para *retrofit* de edificios existentes es una tendencia de nuevos estudios (FREITAS et al., 2020). Según Liu et al. (2014) es posible con BIM gestionar que otros colaboradores en el proceso de construcción puedan analizar y aprobar las propuestas de *retrofit*. Coulter, Dubler y Leicht (2013) indican que la simulación con BIM puede ayudar a los sectores públicos a decidir la prioridad de los edificios para someterse al proceso de *retrofit*.

El uso del sistema BIM también presenta la posibilidad de gestionar el edificio construido con *Facilities Management*, lo que puede contribuir a una reducción de hasta un 10% del consumo energético operativo y contribuir a las acciones de mantenimiento del edificio (PANTELI; KYLILI; FOKAIDES, 2020 *apud* PISELLI et al., 2020a).

BIM permite el uso de varios programas para analizar la expansión del EEE con el *retrofit* de edificios. El uso del *software* Revit® de Autodesk® ha crecido en los últimos años (NATIONAL BUILDING SPECIFICATION®, 2016 *apud* SANHUDO et al., 2018) siendo, dentro de la AECO, el *software* BIM más popular (FREITAS et al., 2020).

En esta RSL, Revit® también fue el *software* más citado en los estudios, pero en la mayoría de ellos no se utilizó de forma aislada, solo en Giuda, Villa y Piantanida (2015), pero estos autores no realizaron simulación energética. En otras investigaciones, la posibilidad de interoperabilidad de Revit® con otro *software* o *plug-in*, como Design Builder®, Revit MEP®, Dynamo®, Edclima®, Green Building Studio®, Insight®, Sketchup®, IES®, IESVE®, eQuest®, EnergyPlus®, DOE-2®, OpenStudio®, Ecoinvent®, PETRAtool®, ArcGIS® y Ecotec®.

A pesar del énfasis dado a Revit®, a menudo se usa solo para modelado, no para simulación EEE. Sanhudo et al. (2018) afirman que "*Shahryar Habibi demuestra que los software*

³ Vidrios *low-e* son aquellos con propiedades de baja emisividad térmica.

se pueden utilizar para múltiples análisis: exposición solar, ventilación natural, eficiencia de iluminación, rendimiento acústico, orientación del edificio, propiedades térmicas de los materiales, entre otros” (SANHUDO *et al.*, 2018, p. 254. nuestra traducción). Identificaron que Energyplus® es el software más utilizado en la simulación de eficiencia energética de reacondicionamiento, seguido de Ecotec® y DOE-2 software®.

Según Bu *et al.* (2015), Ecotec® y Green Building Studio® son los más populares para analizar edificios nuevos, mientras que Energyplus® y DeST® son los más utilizados para la simulación energética de edificios existentes.

Las simulaciones de propuestas de *retrofit* se pueden realizar en BIM. Según Tzorropoulos *et al.* (2019) y Chaves *et al.* (2017) el modelo BIM ayuda a extraer cantidades confiables de la edificación construida virtualmente, permitiendo además insertar el costo de los elementos en el *software*, así como estimar el tiempo de ejecución del proyecto. También según estos autores, el uso de esta tecnología y herramientas es interesante, especialmente cuando se trata de un *retrofit* en el que las personas están utilizando el espacio, lo que requiere una planificación estratégica.

La cantidad de materiales obtenidos en el *software* BIM también se puede utilizar para el análisis de emisiones de CO₂ en la extracción, el transporte, la fabricación y la instalación, además de la descomposición futura (ISO 14025, 2006 *apud* EDWARDS *et al.*, 2019; PISELLI *et al.*, 2020b). Piselli *et al.*, (2020b) todavía argumentan que esta información de consumo de materiales debería estar integrada en el *software* BIM. Branca *et al.* (2019), observando un modelo estándar para identificar y extraer cantidades de materiales, crean un modelo de archivo configurado (plantilla) que ayudó en las propuestas de *retrofit* de escuelas en Lugano, Suiza.

A partir de la lectura de los artículos de la RSL se identificó un proceso de simulación de EEE, que se puede dividir en tres etapas (SANHUDO *et al.*, 2018, KHADDAJ *et al.*, 2016, UGLIOTTI; DELLOSTA; OSELLO, 2016): (1) la primera etapa estuvo presente en toda la investigación y aborda la documentación de los datos geométricos y energéticos del edificio; (2) la segunda etapa también estuvo presente en todas las investigaciones y se refiere al modelado geométrico y energético calibrado del edificio en *software* BIM; finalmente, (3) la tercera etapa no se llevó a cabo en todos los estudios y se refiere a la simulación de una propuesta de *retrofit*, que incluso puede incluir una evaluación de la inversión financiera necesaria para la ejecución del proyecto. Las siguientes secciones detallan estos pasos.

4.1 PRIMERA ETAPA: DOCUMENTACIÓN DEL EDIFICIO

Este paso comprende la documentación de datos geométricos y datos de energía. Algunos investigadores llaman a este paso de catalogar los datos de los edificios una “auditoría energética” (MALKIAT, 2013; ALBERT; YOUNGER, 2008 *apud* HAMIDA *et al.*, 2020). Este proceso está, según Coulter, Dubler y Leicht (2013), dividido por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – ASHRAE*) en tres niveles. En el nivel simple, se verifica la geometría del edificio, el tipo de lámparas utilizadas, los sensores de ocupación y el sistema de escape. El nivel intermedio, en cambio, involucra entrevistas con personas específicas para identificar, por ejemplo, el patrón de horas de consumo del edificio y en el nivel

avanzado, se utilizan instrumentos para extraer datos en sitio y simulación y por lo tanto tienen más potencial para presentar resultados más precisos.

4.1.1 DOCUMENTACIÓN DE DATOS GEOMÉTRICOS

La documentación de datos geométricos se refiere al registro y modelado del volumen del edificio. Entre los métodos presentados en las encuestas están la adopción de planos de edificios existentes (plano de planta, cortes y fachadas existentes), adopción de un modelo 3D existente, registro con una cinta métrica, escaneo láser 3D (*laser scanning*), fotogrametría e imágenes satelitales. Se identificó que es común que se utilice más de un método de registro geométrico en una misma obra.

La adopción de planos del catastro existente es el método más utilizado por los autores identificados en esta RSL, pero el *laser scanning* también es un destacado en la investigación. Sanhudo *et al* (2018) indican que el *laser scanning* tiene fallas en el procesamiento de datos geométricos, como en edificios de geometría compleja, pero que en parte estos problemas pueden resolverse en el *software* BIM, lo que indica la posibilidad de una buena integración.

En este proceso de documentación, los investigadores indican que los edificios del patrimonio histórico suelen ser más difíciles de registrar debido a que es común que tengan una geometría compleja y falta de estandarización de los elementos constructivos (GIGLIARELLI *et al.*, 2017).

Un elemento descuidado en la mayoría de las investigaciones es sobre los alrededores de los edificios, a veces puede que no haya interferencia, pero la existencia de los alrededores o su modelado no se mencionaron en la investigación. Según Ugliotti, Dellosta y Osello (2016, p. 5, nuestra traducción) "*Los edificios vecinos pueden ser despreciados, pero cuando sombrean el edificio es relevante y debe ser representado*". En la revisión bibliográfica, Scherer y Katranuschkov (2018) tratan sobre el *Neighborhood BIMification*, qué es la necesidad de registrar lo relevante del entorno, abriendo la posibilidad de registrar la fachada del edificio vecino mediante *laser scanning* y terreno con levantamiento topográfico.

Lin *et al.* (2019) realizaron la simulación computacional de energía del caso de estudio con los edificios circundantes, pero no informaron si consideran o no la vegetación circundante en la simulación.

4.1.2 DOCUMENTACIÓN DE DATOS ENERGÉTICOS

La documentación de los datos de energía se refiere al registro de información para el siguiente paso del modelado y calibración de *software*. La información se puede subdividir entre las propiedades del material, el estándar de ocupación y el confort térmico como se muestra a continuación.

4.1.2.1. Propiedades materiales

Se pueden utilizar métodos destructivos y no destructivos para evaluar las propiedades de los materiales (SANHUDO *et al.*, 2018, BU; SHEN, 2013). Los métodos destructivos, que no se

encontraron en aplicación práctica en esta RSL, implican el daño de los elementos de construcción que están en uso para identificar sus propiedades a través de la evaluación de laboratorio. Sin embargo, este método puede no ser viable por la interrupción de actividades en el edificio en uso, por el deterioro de elementos del edificio histórico patrimonial ⁴o por limitaciones presupuestarias, al ser una técnica más costosa.

Entre los métodos no destructivos está el reconocimiento de materiales de construcción y la identificación de propiedades térmicas considerando los datos proporcionados por el fabricante. Sin embargo, si esta información no está disponible, la investigación utiliza valores genéricos de propiedades térmicas de los materiales previstos en la normativa.

Sin embargo, el reconocimiento de materiales contiene fallas. La investigación destaca que los materiales de las construcciones existentes pueden sufrir humedad, deterioro, corrosión y un rendimiento de aislamiento deficiente con el tiempo y que esto debe tenerse en cuenta (SCHERER; KATRANUSCHKOV, 2018; HABIBI *et al.*, 2017; GIGLIARELLI *et al.*, 2017; GIGLIARELLI *et al.*, 2017). A pesar de que estos autores alertan sobre esta falla, se ve que las investigaciones la desprecian y utilizan para las simulaciones las propiedades indicadas por las reglamentaciones del país o por los fabricantes de los materiales.

Todavía entre los métodos no destructivos, actualmente existe la posibilidad de uso en los elementos constructivos de la cámara termográfica infrarroja ⁵que pueden clasificarse como sensores. La cámara térmica se puede utilizar en el envoltorio para identificar la ganancia o pérdida de calor (HU, 2018).

Los sensores permiten el ahorro de energía y existen algunos modelos con transmisión de datos vía inalámbrica o *bluetooth* (GOMEZ; PARADELLS, 2010 *apud* WOO; GLEASON, 2014).

Entre las novedades del sector, se encuentran estudios como el de Ham y Golparvar-Fard (2015) *apud* Habibi *et al.* (2017) quienes desarrollan métodos para la captura de propiedades térmicas para asociarlas automáticamente con elementos BIM para el análisis de *retrofit* energética.

4.1.2.2 Estándar de consumo

Varios investigadores, según Mehndi y Chakraborty (2020), descubrieron que el estándar del consumidor final afecta a EEE. Algunas investigaciones utilizan en la simulación un patrón genérico de periodo de uso y funcionamiento del edificio según la tipología del edificio. Es por ello que una de las causas comunes de error en *Building Performance Simulations* (BPS) es la información sobre el comportamiento de las personas y el periodo de operación del edificio (UDDIN *et al.*, 2019). En este caso, las entrevistas a los usuarios del edificio contribuyen a una identificación más completa (ASHRAE *apud* COULTER; DUBLER; LEICHT, 2013).

Algunas investigaciones utilizan como referencia los datos de consumo de energía presentes en las facturas de energía y gas (YANG; ERGAN; KNOX, 2015) buscando mayor veracidad en la comparación de resultados para el edificio simulado. Pero también hay

⁴ Los edificios del patrimonio histórico suelen tener una legislación específica que imposibilita dañar elementos.

⁵ Se puede encontrar en la investigación como un termómetro infrarrojo o una cámara térmica. La más común es la marca FLIR®.

investigadores que usan datos sobre el consumo de energía promedio anual en el país para el consumo residencial típico para la simulación.

El consumo de energía también se puede observar mediante la instalación de sensores. Los sensores no necesitan capturar datos de todas las habitaciones del edificio. En la investigación de Woo y Menassa (2014) y de Woo y Gleason (2014), se utilizó un piso de medición típico con sensores para basar la simulación computacional. De esta forma, los entornos no registrados recibieron los datos de los registrados y por tanto los resultados obtenidos de la simulación final del edificio son datos aproximados.

Hay estudios que utilizan sensores para identificar el patrón de ocupación de determinados entornos a lo largo del día.

4.1.2.3 Rendimiento térmico

Para capturar datos relacionados con el confort térmico, el uso de sensores de temperatura ambiente, humedad y velocidad del viento son comunes en la investigación.

Las encuestas identificadas en la RSL no presentan explícitamente la necesidad de información sobre la ubicación del edificio, pero sin ella, el software no produce los datos de evaluación sobre el desempeño térmico.

El uso de entrevistas también es un método común en esta etapa de documentación. Lin *et al.* (2019) presentan la aplicación del método de entrevista en el análisis de la sensación de confort térmico: el Voto Promedio Pronosticado (*Predicted Mean Vote - PMV*) y el Porcentaje Previsto de Insatisfechos (*Predicted Percentage Dissatisfied - PPD*).

La etapa de documentar los datos de energía, con la evaluación de las propiedades de los materiales, el patrón de consumo y el rendimiento térmico es el más desigual entre las investigaciones encontradas en la RSL. Algunos de ellos utilizan información más genérica para representar el edificio existente, otros recopilan alguna información que los investigadores consideraron importante o a la que pudieron acceder, mientras que otras investigaciones utilizan métodos más complejos y costosos que entregan más asertividad al verdadero estado del edificio. La etapa del modelado con esta información se presenta a continuación.

4.2 SEGUNDA ETAPA: MODELADO BIM Y ANÁLISIS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA

En este paso se realiza el modelado tridimensional del edificio virtual con la información obtenida en el paso de documentación. Cada elemento o sistema puede asociarse con datos técnicos relevantes como certificados y declaraciones que pueden ser útiles para el mantenimiento futuro (GIUDA; VILLA; PIANTANIDA, 2015).

Los edificios modelados en BIM se pueden clasificar según los niveles de detalle o desarrollo (*Level of Development – LOD*) (MUTHUMANICKAM *et al.*, 2014). En esta LSR se identificó que los investigadores utilizan diferentes niveles de LOD para realizar su trabajo, sin que haya un estándar o consenso sobre cuál es el más adecuado.

Muthumanickam *et al.* (2014) eligieron LOD 300 para el modelado energético en el *software* Revit® porque consideraron que un modelo con este LOD no tiene redundancia ni falta de información. Ugliotti, Dellosta y Osello (2016), además de estar de acuerdo con el LOD 300,

sugieren que se deben eliminar elementos decorativos ya que provocan error o lentitud en la simulación. Sin embargo, Branca *et al.* (2019) y Tzortzopoulos *et al.* (2019) eligió el LOD 200 para modelar en el mismo *software* utilizando el método descrito por Schweizerischer Ingenieur-und Architekten en 2018.

Sin especificar el software utilizado en la simulación energética, otros autores recomiendan el LOD 200 (BEDRICK, 2008; LEITE *et al.*, 2011 *apud* CHAVES *et al.*, 2017). Los investigadores Piselli *et al.* (2020b) no especificaron el LOD utilizado, pero describieron que modelaron detalles de los sistemas hidráulico, eléctrico y HVAC. La mayoría de las investigaciones no presentan el LOD elegido para el modelado y la simulación.

Además de planificar el LOD, otros investigadores debaten la ventaja de crear un modelo de archivo estándar (plantilla) para proyectos de *retrofit* (SCHERER; KATRANUSCHKOV, 2018). Y en la investigación de Khaddaj y Srour (2016) se identifica la necesidad de crear un instrumento legal de estandarización de modelado para *retrofit* para brindar más seguridad y garantía de la simulación para todos los usuarios.

En este paso se compara la compatibilidad de los resultados de la simulación energética con los datos de consumo real del edificio. En algunos casos se observa la necesidad de volver a simular con cambios de datos en el software, para que los resultados de la simulación BIM se acerquen más a los resultados de la realidad. Según la revisión bibliográfica de Yang, Ergan y Knox (2015) en todas las investigaciones de simulación se encuentran datos de Intensidad de uso de energía (*Energy Usage Intensity* - EUI) en kWh/m² y energía consumida.

Existe un rango de tolerancia de error en el proceso de calibración que se puede calcular utilizando la fórmula presentada en ASHARE (UDDIN *et al.*, 2019). La investigación de Hamida *et al.* (2020) tuvo un resultado simulado muy cercano al real con una diferencia de solo 1.1% de error. En la investigación de Spiegelhalter *et al.* (2014) el consumo virtualmente simulado tuvo una variación considerable en relación al consumo real del edificio a pesar de utilizar los datos de consumo real del edificio y datos de sensores instalados en el edificio.

Sanhudo *et al.* (2018) reportan problemas en algunos software como la confiabilidad de ingresar datos bioclimáticos y calcular el volumen de los ambientes de los edificios. En general, los investigadores indican que la interoperabilidad de los archivos en formatos IFC, XML y gbXML tiene fallas y se convierte en un desafío para la implementación completa de BIM para el análisis de EEE (HAMIDA *et al.*, 2020; HOSSEINI; SHIRMOHAMMADI; ASLANI, 2020; PISELLI *et al.*, 2020a).

Sanhudo *et al.* (2018) informam problemas em alguns *software* como a confiabilidade da inserção dos dados bioclimáticos e do cálculo do volume dos ambientes da edificação. De modo geral, pesquisadores indicam que a interoperabilidade de arquivos de formatos IFC, XML e gbXML possuem falhas e se tornam um desafio para completa implantação do BIM para análise de EEE (HAMIDA *et al.*, 2020; HOSSEINI; SHIRMOHAMMADI; ASLANI, 2020; PISELLI *et al.*, 2020a).

4.3 TERCERA ETAPA: PROPUESTA DE RETROFIT

La propuesta de *retrofit* no se realiza en todos los levantamientos de esta RSL. De las encuestas que realizan la simulación de la propuesta, algunas realizan la evaluación de la inversión financiera como se muestra a continuación.

4.3.1 MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA PROPUESTA

En esta etapa, es necesario evaluar cuáles serán las propuestas de *retrofit* para el edificio, haciendo posible que un edificio reciba diferentes tipos de intervenciones. Para elegir los cambios a realizar, Woo y Gleason (2014) incluso entrevistan a los usuarios para conocer su opinión sobre lo que se debe hacer para la actualización del EEE. Los investigadores entienden que es importante que los usuarios participen en el proceso para lograr mejores resultados.

Mediante el uso del *software* BIM Revit® para modelar el edificio y el posterior DesignBuilder® para la simulación de energía, Freitas *et al.* (2020, p. 13, nuestra traducción) informan que:

El principal inconveniente del enfoque BIM adoptado en este estudio es que después de implementar y diseñar cada Medida de Eficiencia Energética (*Energy Efficiency Measures – EEM*) en BIM, el modelo analítico de energía debe recrearse y luego reexportar utilizando el formato BIM .gbXML. Esto creará múltiples archivos y es un enfoque desintegrado. Por lo tanto, sería mucho más eficiente si el análisis energético se realizará dentro del propio *software* BIM.

4.3.2 MODELADO Y EVALUACIÓN DE INVERSIÓN FINANCIERA

En la investigación de Tzortzopoulos *et al.* (2019) se indica que las soluciones de *retrofit* deben considerar tres aspectos: el potencial de ganancias de EEE, la interferencia en la rutina de los usuarios y la estimación del costo del *retrofit*.

Hay investigaciones que tienen casos de estudio, realizan el modelado en *software* BIM, pero no simulan la solución de *retrofit* y en consecuencia no simulan el retorno de la inversión (*payback*) como se hizo, por ejemplo, en la investigación de Guida *et al.* (2015).

Algunos estudios como el de Freitas *et al.* (2019) y por Hamida *et al.* (2020) presentan la simulación del retorno financiero, que puede ser simple, considerando el monto invertido y el tiempo requerido para la compensación. Sin embargo, estos estudios destacan la posibilidad de utilizar fórmulas específicas que toman en cuenta aspectos como la vida útil del edificio, la tasa de interés del país y la proyección del valor del contrato de energía, pero enfatizan que no toman en cuenta la tasa de degradación de materiales o de aparatos.

La simulación de *payback* se presenta con un criterio de importancia en la decisión del *retrofit*. Según la investigación de Hamida *et al.* (2020) una estrategia de *retrofit* reduce el consumo en un 2% y tiene *payback* de 15,7 años, mientras que otra reduce el consumo en un 1,3% y tiene un *payback* de 1,3 años. Spiegelhalter *et al.* (2014) presentan un *payback* de 4 años para la propuesta de *retrofit*.

Freitas *et al.* (2019) incluso tienen una reducción del consumo del 58,54%, pero con un *payback* de 24,60 años. Con el largo tiempo de *payback*, se indicó el estudio de instalar una placa fotovoltaica o la eliminación de servicios para viabilizar económicamente la propuesta final escogida por estos autores.

En la investigación de Hosseini, Shirmohammadi y Aslani (2020), a pesar de una gran reducción en el consumo de energía, el período de recuperación es muy alto porque los costos de energía en el país donde se realizó la investigación son muy bajos.

Hay autores que presentan que incluso si el valor de retorno calculado es mayor que el ciclo de vida de los principales componentes arquitectónicos, aún se recomienda el *retrofit* porque el edificio necesita renovaciones (BRANCA *et al.*, 2019).

5 CONCLUSIÓN

Esta investigación es un paso necesario para comprender las posibilidades disponibles en el uso de BIM y las estrategias para aumentar la EEE. El método RSL demostró ser adecuado para el enfoque de estado del arte de la relación entre BIM, EEE y *retrofit*. Con la investigación se destacó cómo existen varios avances tecnológicos aplicados a herramientas que contribuyen a incrementar los EEE.

Con los requisitos gubernamentales, existe una tendencia a que los edificios GB se vuelvan cada vez más populares. Existen numerosos parámetros para evaluar un EEE, incluida la observación de la energía operativa que se puede reducir con el uso de herramientas de simulación por computadora.

Se identificó un patrón en los pasos adoptados por los investigadores para llevar a cabo el proceso de simulación, siendo el primero la documentación. Para este paso, que incluye la documentación de datos geométricos y energéticos, se encontró que existen varias tecnologías que contribuyen a la mayor precisión del modelo y hay una tendencia de que en el futuro serán más accesibles. Sin embargo, esta etapa fue identificada como la más desigual en las encuestas precisamente por el límite presupuestario de acceso a estas diferentes tecnologías.

Con el segundo paso de modelado, se puede ver que los autores discuten la posibilidad de crear una plantilla para la actualización en BIM (Scherer; KATRANUSCHKOV, 2018). También se observó que el nivel de LOD no es un consenso, pero los más adoptados fueron el LOD 200 y LOD 300 para evitar errores en la interoperabilidad entre los *software*. Entre los *software* BIM, Revit® destaca por el modelado de edificios y así permitir la interoperabilidad con otros *software* de análisis y simulación energética. Entre los *software* de simulación, el más citado fue Energy Plus®. La interoperabilidad de *software* sigue siendo el gran desafío en esta etapa.

En la tercera etapa, que es la simulación de *retrofit*, se encuentran las ventajas de utilizar BIM para la observación y análisis simultáneo de las diferentes estrategias, además de la evaluación del *payback*. Las posibilidades de alteración del edificio construido en los ejemplos estudiados son muy limitadas, pero los artículos tienen varias potencialidades con diferentes tipos de impacto que pueden servir como referencia para su aplicación en casos reales.

El método de selección de artículos resultó en la identificación de obras específicas del área que contribuyeron a la verificación del Estado del Arte. Como próximos pasos, se ajustará el protocolo RSL y se utilizarán dos *strings* combinando (a) BIM y EEE; (b) EEE y *retrofit*. De esta forma, se ampliarán los trabajos a evaluar, aumentando el alcance de la evaluación.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAGA, Darja Kos. **Arquitetura residencial de superquadras do Plano Piloto de Brasília: aspectos de conforto térmico**. 2005. 150 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2005. Disponível em:
https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/2116/1/2006_Darja%20Kos%20Braga.pdf. Acesso em: 18 abr. 2020.

BRANCA, Giovanni et al. Portfolio energy analysis and condition assessment: case study of public schools of the lugano municipality. **Journal Of Physics: Conference Series**, [S.L.], v. 1343, p. 012131, nov. 2019. IOP Publishing.
<http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012131>.

BU, Shanshan *et al.* Literature review of green retrofit design for commercial buildings with BIM implication. **Smart And Sustainable Built Environment**, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 188-214, 21 set. 2015. Emerald.
<http://dx.doi.org/10.1108/sasbe-08-2014-0043>.

CHAVES, Fernanda Justin et al. Building information modelling to cut disruption in housing retrofit. **Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Engineering Sustainability**, [S.L.], v. 170, n. 6, p. 322-333, 1 dez. 2017. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/jensu.16.00063>.

COULTER, T. Sprau; DUBLER, Craig R.; LEICHT, Robert M.. Developing a Standard Energy Auditing Process for Pennsylvania State University. **Aei** 2013, [S.L.], p. 891-901, 5 abr. 2013. American Society of Civil Engineers.
<http://dx.doi.org/10.1061/9780784412909.087>.

EASTMAN, Chuck; TEICHOLZ, Paul; SACKS, Rafael; LISTON, Kathleen. **BIM Handbook: a Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. Disponível em:
https://www.academia.edu/3183272/BIM_handbook_A_guide_to_building_information_modeling_for_owners_managers_designers_engineers_and_contractors. Acesso em: 10 out. 2019.

EDWARDS, Rodger E. et al. Sustainability-led design: feasibility of incorporating whole-life cycle energy assessment into bim for refurbishment projects. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 24, p. 100-697, jul. 2019. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jobee.2019.01.027>.

FENG, Haibo et al. BIM-based life cycle environmental performance assessment of single-family houses: renovation and reconstruction strategies for aging building stock in british columbia. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 250, p. 119-543, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119543>.

FREITAS, Jader de Sousa *et al.* Modeling and assessing BIPV envelopes using parametric Rhinoceros plugins Grasshopper and Ladybug. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 160, p. 1468-1479, nov. 2020. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.137>.

GIGLIARELLI, Elena et al. Heritage Bim, Numerical Simulation and Decision Support Systems: an integrated approach for historical buildings retrofit. **Energy Procedia**, [S.L.], v. 133, p. 135-144, out. 2017. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.379>.

GIUDA, Giuseppe Martino Di; VILLA, Valentina; PIANTANIDA, Paolo. BIM and Energy Efficient Retrofitting in School Buildings. **Energy Procedia**, [S.L.], v. 78, p. 1045-1050, nov. 2015. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.066>.

HABIBI, Shahryar et al. The promise of BIM for improving building performance. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 153, p. 525-548, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.009>.

HAM, Youngjib; GOLPARVAR-FARD, Mani. Mapping actual thermal properties to building elements in gbXML-based BIM for reliable building energy performance modeling. **Automation In Construction**, [S.L.], v. 49, p. 214-224, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2014.07.009>.

HAMIDA, Mohammad B. *et al.* Techno-Economic Assessment of Energy Retrofitting Educational Buildings: a case study in saudi arabia. **Sustainability**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 179, 27 dez. 2020. MDPI AG.
<http://dx.doi.org/10.3390/su13010179>.

HOSSEINI, S. M.; SHIRMOHAMMADI R.; ASLANI A. Achieving to a low carbon-energy commercial building in the hot-dry climate area. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, [S.L.], p. 1-19, 15 out. 2020. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15567036.2020.1826013>.

KHADDAJ, Maggie et al. Using BIM to Retrofit Existing Buildings. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 145, p. 1526-1533, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.192>.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, O. R. F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2014. 366 p. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf. Acesso em: 15 out. 2019.

LATIF, A F et al. A Review on Energy Performance in Malaysian Universities Through Building Information Modelling (BIM) Adaptation. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S.L.], v. 291, p. 012-033, 27 jun. 2019. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/291/1/012033>.

LEITNER, D. S; SCHEER, S.; SANTOS, A. P. L. O uso do BIM para avaliação do desempenho dos edifícios: uma revisão sistemática da literatura. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v.14, n. 2, p.17-33, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v14i2.151292>. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/151292/158156>. Acesso em: 2 abr. 2020.

LIN, Pao-Hung et al. Green BIM Assessment Applying for Energy Consumption and Comfort in the Traditional Public Market: a case study. **Sustainability**, [S.L.], v. 11, n. 17, p. 4636, 26 ago. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su11174636>.

LIU, Fangxiao et al. A Framework for Integrating Change Management with Building information modeling. **Computing In Civil And Building Engineering** (2014), [S.L.], p. 439-446, 17 jun. 2014. American Society of Civil Engineers. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784413616.055>.

MEHNDI, Syed Mohd; CHAKRABORTY, Indrani. Simulation for a Cost-Effective and Energy Efficient Retrofits of the Existing Building Stock in India using BIM. **2020 International Conference On Contemporary Computing And Applications (ic3A)**, [S.L.], p. 237-243, fev. 2020. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/ic3a48958.2020.233305>.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; CUNHA NETO, J. A. B. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre. v. 5, n. 4, p. 47-68, 2005.

MUTHUMANICKAM, Aruna et al. Development of a Novel BIM-Energy Use Ontology. **Construction Research Congress 2014**, [S.L.], p. 150-159, 13 maio 2014. American Society of Civil Engineers. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784413517.016>.

OPOKU, De-Graft et al. Digital twin application in the construction industry: A literature review. **Journal of Building Engineering**, [S.L.], v. 40, p. 1-15, maio 2021. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102726>.

PISELLI, Cristina et al. An Integrated HBIM Simulation Approach for Energy Retrofit of Historical Buildings Implemented in a Case Study of a Medieval Fortress in Italy. **Energies**, [S.L.], v. 13, n. 10, p. 2601, 20 maio 2020b. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en13102601>.

PISELLI, Cristina et al. Facility Energy Management Application of HBIM for Historical Low-Carbon Communities: design, modelling and operation control of geothermal energy retrofit in a real italian case study. **Energies**, [S.L.], v. 13, n. 23, p. 6338, 1 dez. 2020a. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en13236338>

ROMERO, M. A.; ORNSTEIN, S. W. **Avaliação pós-ocupação: métodos e técnicas aplicados à habitação social**. Porto Alegre: ANTAC, 2003. 294 p. ISBN 85-89478-01-7

SANHUDO, Luís *et al.* Building information modeling for energy retrofitting - A review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 89, p. 249-260, jun. 2018.

SARTORI, Thais; CALMON, João Luiz. Analysis of the impacts of retrofit actions on the life cycle energy consumption of typical neighbourhood dwellings. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 21, p. 158-172, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2018.10.009>.

SCHERER, Raimar J.; KATRANUSCHKOV, Peter. BIMification: how to create and use bim for retrofitting. **Advanced Engineering Informatics**, [S.L.], v. 38, p. 54-66, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2018.05.007>.

SCHLUETER, Arno; GEYER, Philipp. Linking BIM and Design of Experiments to balance architectural and technical design factors for energy performance. **Automation in Construction**, [S. L.] , v. 86, p. 33-43, fev. 2018.

SPIEGELHALTER, Thomas *et al.* Energy-efficiency Retrofitting and Transformation of the FIU-college of Architecture + The Arts into a Net-Zero-Energy-Building by 2018. **Energy Procedia**, [S.L.], v. 57, p. 1922-1930, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.056>.

TZORTZOPOULOS, Patricia *et al.* Evaluating Social Housing Retrofit Options to Support Clients' Decision Making—SIMPLER BIM Protocol. **Sustainability**, [S.L.], v. 11, n. 9, p. 2507, 30 abr. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su11092507>.

UDDIN, M N. *et al.* An Inquisition of Envelope Fabric for Building Energy Performance Using Prominent BIM-BPS Tools—A Case Study in Sub-Tropical Climate. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S.L.], v. 354, p. 012129, 25 out. 2019. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/354/1/012129>.

UGLIOTTI, Francesca Maria; DELLOSTA, Maurizio; OSELLO, Anna. BIM-based Energy Analysis Using Edilclima EC770 Plug-in, Case Study Archimede Library EEB Project. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 161, p. 3-8, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.489>.

WOO, Jeong-Han, Carol Menassa. Virtual Retrofit Model for aging commercial buildings in a smart grid environment. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 80, p. 424-435, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.004>.

WOO, Jeong-Han; GLEASON, Blake. Building Energy Benchmarking with Building information modeling and Wireless Sensor Technologies for Building Retrofits. **Computing In Civil And Building Engineering** (2014), [S.L.], p. 1150-1157, 17 jun. 2014. American Society of Civil Engineers. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784413616.143>.

YANG, Xue; ERGAN, Semiha; KNOX, Katie. Requirements of Integrated Design Teams While Evaluating Advanced Energy Retrofit Design Options in Immersive Virtual Environments. **Buildings**, [S.L.], v. 5, n. 4, p. 1302-1320, 5 dez. 2015. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings5041302>.