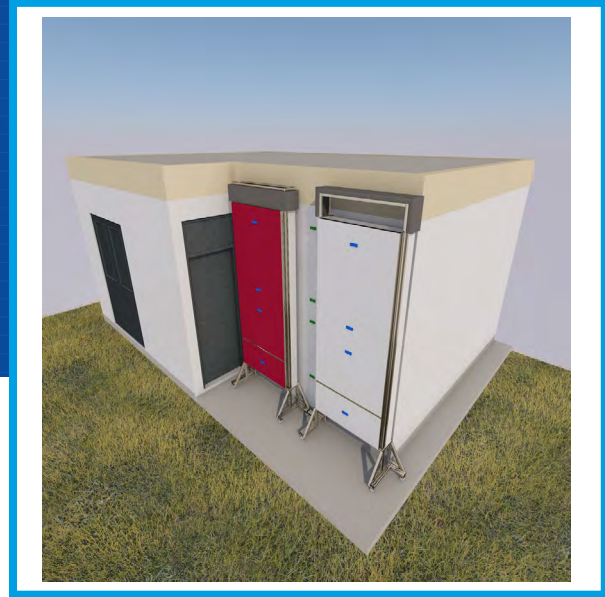


Desarrollo de Gemelo Digital para la evaluación de la envolvente térmica

Alvarez Analía

Instituto de Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de San Juan.

Contacto: ana_alv023@hotmail.com>



RESUMEN

En el marco de la Agenda 2030 en general y en particular de los ODS 11 y 13, esta investigación busca establecer una mecánica de trabajo orientada al desarrollo de un Gemelo Digital que permita evaluar el comportamiento higrotérmico interior de espacios residenciales. Para ello, se toma como caso de estudio el Laboratorio Experimental para Viviendas Sociales del Área de Energías Renovables y Ambiente del Instituto de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan. La metodología se estructura conforme a 3 etapas (Relevamiento Arquitectónico, Modelado y Simulación). Adicionalmente, se contrastan los resultados del modelo de energía 3D realizado con un software BIM con los obtenidos en EnergyPlus. Finalmente, se obtiene que el desarrollo de un modelo digital constituye una herramienta orientada a la toma de decisión que permite conocer en etapa de diseño el desempeño energético posible del edificio en etapa de uso.

ABSTRACT

Within the framework of the 2030 Agenda in general and of SDGs 11 and 13 in particular, this research seeks to establish a working mechanism to develop a Digital Twin that allows the evaluation of the interior hygrothermal behavior of residential spaces. In this direction, the case study is the Experimental Laboratory for Social Housing of the Renewable Energy and Environment Area of the Institute of Applied Mechanics of the Faculty of Engineering of the National University of San Juan. The methodology includes three stages (Architectural Survey, Modeling, and Simulation). Additionally, the results of the 3D energy model created with BIM software are compared with those obtained in EnergyPlus. Finally, it is concluded that the construction of a digital model constitutes a decision-making tool that allows knowing in the design stage the possible energy performance of the building in the use stage.

Palabras clave: Building Information Modeling, Gemelo Digital, Envolvente Térmica, Building Energy Modeling, Confort Higrotérmico.

INTRODUCCIÓN

Las ciudades abarcan menos del 3% de la superficie de la tierra, pero consumen el 78% de la energía mundial y producen más del 60% de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Los edificios consumen un 40% de la energía y emiten un 36% de las emisiones de CO₂. Adicionalmente, se estima que en los próximos 20 años se producirá un crecimiento de alrededor del 40% en el uso de energía de los edificios debido a la creciente demanda de confort térmico. Dentro de este escenario tendencial, Argentina, tiene como meta incondicional reducir entre el 18% y el 37% las emisiones de GEI para 2030 [1]. Al respecto, se destaca que los impactos ambientales de los edificios tienen su origen principalmente en dos fuentes: la energía relacionada con su operación (calefacción, aire acondicionado, iluminación, agua caliente, etc.) y los materiales de construcción [2].

En este contexto, la metodología del Building Information Modeling, BIM por sus siglas en inglés, permite analizar diversos factores de manera simultánea y así lograr el funcionamiento de múltiples procesos constructivos de manera sincronizada. En coincidencia, en Schiavi [3], exponen que el BIM permite unificar distintos aspectos del proyecto en un único modelo denominado Gemelo Digital, el cual contiene toda la información necesaria para la colaboración. Bajo este enfoque, la gestión colaborativa del proyecto resulta de la generación de un modelo 3D paramétrico que se actualiza y completa con metadatos durante todo el proyecto de construcción facilitando el seguimiento y toma de decisiones, a través de todas las fases que integran el ciclo de vida de la misma [4].

Por otro lado, el concepto de industria 4.0, surge en Alemania en 2011, para hacer referencia a una política económica gubernamental basada en estrategias de alta tecnología, caracterizada por la automatización, la digitalización de los procesos y el uso de la electrónica y de la información en la manufactura, la personalización de la producción, la prestación de servicios, la creación de negocios de valor agregado, las capacidades de interacción y el intercambio de información entre humanos y máquinas [5]. De acuerdo con Peralta-Abarca [6], este concepto se relaciona con la cuarta revolución industrial. Por tanto, se corresponde con un sistema completo que proporciona herramientas y tecnologías que ayudan a fortalecer la integración de las empresas a partir de la mejora gradual de sus sistemas. En este sentido, la I4.0 nace de la revolución tecnológica impulsada por la convergencia del mundo virtual y físico. Está enfocada en la automatización industrial y se basa en la recolección de datos de todos los procesos relevantes en

tiempo real, mediante la utilización de herramientas inteligentes (sensores, software de recolección de datos) y sistemas de identificación que se encargan de captar, transportar e interpretar esos datos. Aplicado a los procesos productivos y sus principales aspectos de fabricación, este concepto tiene un amplio enfoque en la utilización de herramientas y estrategias de gestión mediante el uso de plataformas, las cuales facilitan, automatizan e implementan el flujo de los procesos; de este modo se obtiene el máximo rendimiento y optimización.

Las simulaciones se utilizan para modelar sistemas extraídos del entorno real para evaluar su comportamiento en diferentes condiciones y comprender sus respuestas a diferentes agentes directos e indirectos que pueden influir en los resultados del sistema. Debido a su flexibilidad, las simulaciones son un pilar fundamental en la I4.0, ya que pueden implementarse en cualquier campo, como la fabricación, los servicios, el diseño y la salud. La I4.0 encuentra beneficiosa la simulación de procesos basada en software en virtud de la implementación de procesos analíticos [7].

Al respecto, las Smart Cities son características de la I4.0. Por tanto, la Construcción 4.0 pivota sobre dos pilares, la industrialización de los procesos constructivos y la incorporación de tecnologías emergentes, donde la interoperabilidad, virtualización, descentralización, capacidad en tiempo real, orientación a servicios y modularidad son principios fundamentales. De manera que, la metodología BIM (Building Information Modeling) y sus herramientas son indisociables de las herramientas de la I4.0, ya que sus posibles aplicaciones van acordes a los principios de la misma

Bajo este enfoque, esta investigación surge en relación con la Agenda 2030 en general y en particular, con el ODS 11 relativo a ciudades y comunidades inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles y el ODS 13 en relación con la adopción de medidas orientadas a combatir el cambio climático y sus efectos, todo ello como resultado de la determinación de una mecánica de trabajo orientada a la construcción de un Gemelo Digital que permita evaluar el comportamiento higrotérmico interior de espacios residenciales en zonas áridas a partir del uso de herramientas BIM.

DESARROLLO

Metodológicamente, el trabajo se estructura en la consecución de 3 etapas. La primera de ellas se relaciona con el relevamiento arquitectónico y técnico del Laboratorio Experimental para Viviendas Sociales (LEVS) del Área Energías Renovables y Ambiente (AERyA) del Instituto de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería (FI) de la Univer-

idad Nacional de San Juan (UNSJ). En la segunda etapa, se modeló dicho edificio a partir del uso de una herramienta BIM. Finalmente, se solicitó como salida del software BIM utilizado para la simulación, la diferencia entre la temperatura interior y exterior con el objetivo de evaluar el nivel de mejoramiento higrotérmico de los espacios interiores en relación con las envolventes analizadas. La Figura 1 sintetiza la metodología utilizada.

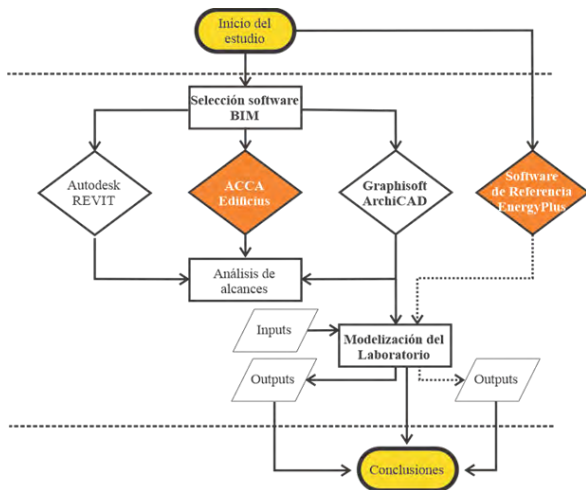


Figura 1: Metodología de Trabajo.

Etapa 1: Relevamiento del Caso de Estudio

En el LEVS (Figura 2) del AERyA se realizan mediciones orientadas a determinar las condiciones climáticas del Área Metropolitana de San Juan (AMSJ). Dicha información, luego es correlacionada con los datos relativos al comportamiento higrotérmico de distintas soluciones constructivas implementadas en la envolvente del laboratorio. Para ello, se utiliza un sistema compuesto por 44 sensores colocados in situ. Cabe destacar que, la recolección de datos en tiempo real, de los múltiples instrumentos en funcionamiento, se realiza por medio del Software Matlab. Con ello, se logra evaluar, ensayar y validar la viabilidad y efectividad de un determinado paquete constructivo en condiciones reales de uso y en respuesta a las características climáticas propias de una zona árida.

En relación con las características de la envolvente se destaca la presencia de un Eco-panel adicionado a la cara este del LEVS. Dicho elemento (Figura 3 y 4) está compuesto por una estructura de chapa con cámara de aire de 150mm con aberturas a nivel inferior y superior, cuyas hojas se abren o cierran facilitando la ventilación en verano e impidiendo el paso del aire en invierno y una capa interna que contiene 50mm de pomeca puzolánica como material de aislación con origen mineral regional, de origen volcánico que fue dispuesto a granel y en seco [8].



Figura 2: Laboratorio Experimental para viviendas sociales.

Etapa 2: Modelado

De acuerdo con el relevamiento realizado, el Laboratorio Experimental posee una superficie de 34,37m². Su desarrollo pretende simular los espacios correspondientes a una vivienda social y, por tanto, su diseño integra un espacio tipo cocina-comedor y un dormitorio. Las características térmicas de la envolvente junto con su distribución dentro del proyecto son expuestas en las la Tabla 1 y Figura 4 respectivamente. Cabe destacar que el modelado se realizó con un la versión estudiantil del software ArchiCAD (versión 2025).



Figura 3: Eco paneles adosados a muro Este LEVS.

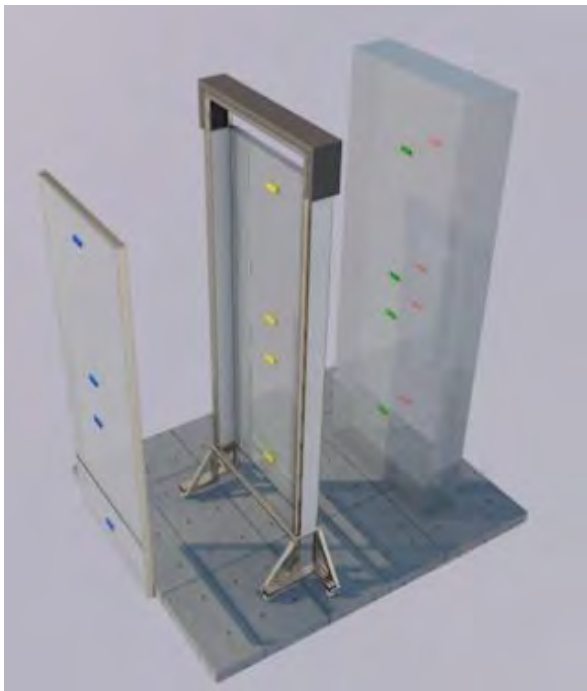


Figura 4: Distribución de sensores en Eco panel.

Para el desarrollo del modelo paramétrico, se utilizó la información gráfica expuesta en las figuras 5. En relación con las características constructivas de la envolvente, la misma se detalla en la Tabla 1. La Figura 6, expone la distribución de los distintos tipos de muros (Tabla 2) en el LEVS.

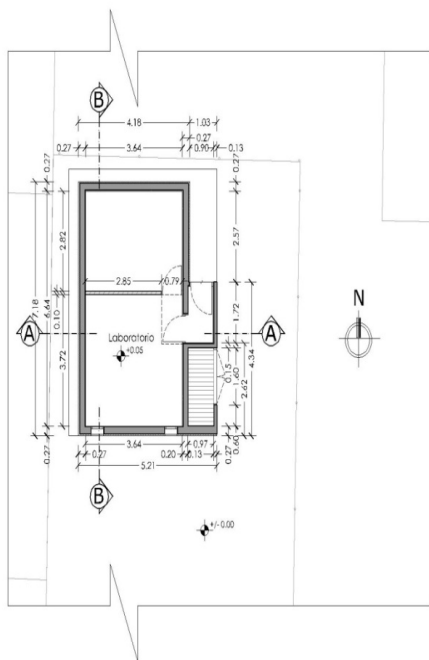


Figura 5: Planta General del LEVS.

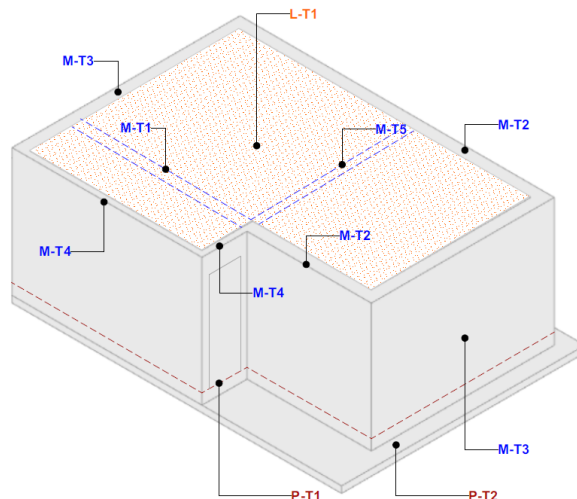


Figura 6: Envoltura del LEVS.

Etapa 3: Simulación

El término Modelo de Energía de la Construcción o de la edificación, BEM (Building Energy Modeling) por sus siglas en inglés, se refiere a una herramienta de simulación para el cálculo de la carga térmica y la utilización de energía en edificios que permite predecir su uso con base en la arquitectura y los sistemas de ventilación, calefacción y aire acondicionado [9]. Por tanto, para realizar una evaluación energética correcta, el modelo de edificio (BIM) tiene que contener al menos las estructuras envolventes y la carpintería, así como todas las estructuras internas principales que representen un volumen de almacenamiento de calor significativo [10].

En relación con la literatura existente respecto al uso de herramientas BIM para el desarrollo de un BEM, se puede mencionar el trabajo de Choi et al. [11], Aljundi et al. [12], Gao et al. [13] y el de Faaq Taha et al. [14]. No obstante, en ninguno de esos desarrollos se aborda la mecánica de trabajo necesaria para la elaboración del BEM como contribución al proceso de diseño integrado, a partir de entender que este último constituye un enfoque sinérgico según el cual se producen mejoras en el desempeño ambiental y funcional del edificio [13].

A nivel mundial, las herramientas BIM más usadas por los profesionales de la construcción son REVIT y ArchiCAD. Al respecto, Llave Zarzuela et al. [15] expone que la herramienta de evaluación energética integrada de Revit es insight 360, pero este motor analítico no está suficientemente testado. No obstante, se puede utilizar la herramienta Green Building Studio. El software de eficiencia energética de ArchiCAD es Ecodesigner, el cual es considerado uno de los más exactos, ya que presenta un rango de error menor al 5% en las evaluaciones

de rendimiento energético. ACCA, utiliza TerMus Plus. Por tanto, es el único software para la simulación energética dinámica que integra la potencia del motor de cálculo EnergyPlus y la sencillez de la modelación BIM/3D.

Cabe destacar que a los efectos de la simulación se adopta como zona 1 el sector A de la figura 5 y como zona 2 el sector B.

RESULTADOS

A los efectos de contrastar los resultados obtenidos en el modelo, se tomará como referencia los resultados alcanzados en un trabajo previo desarrollado en el Software EnergyPlus. Adicionalmente, la Figura 7 expone la mecánica de trabajo necesaria para pasar de un modelo BIM a un modelo BEM.

Asimismo, la Figura 8 y la Tabla 3 exponen los resultados alcanzados en Energy Plus y en el software BIM, en las distintas zonas térmicas que integran el modelo, para invierno y verano conforme a evaluaciones trimestrales (1-3 / 1-6 / 1/9 y 1-12). En ambos análisis, se considera solo la envolvente del LEVS sin la participación del eco panel. Cabe destacar que futuros estudios valoraran el grado de influencia del mismo en el desempeño energético de la zona térmica 2.

Tabla 1: Características Térmicas envolvente LEVS

Materiales LEVS					
ID	Conductividad Térmica (W/mK)	Densidad (kg/m3)	Calor Especifico (J/kgK)	Energía Incorporada (MJ/kg)	Carbon Incorporado (kgCO2/Kg)
Block de Hormigón	0,18	700	1210	0,72	0,088
Capa de Aire	0,18	1,2	1008	0	0
Cerámico	1,3	2300	840	10	0,7
Chapa	60	7800	460	25,1	1,66
Complejo Perlítico	0,19	600	1000	0	0
Hormigón Armado	2,5	2400	1000	2,33	0,242
Hormigón Simple	1,15	1800	1000	0,74	0,107
Lana de Vidrio	0,04	14	1030	26	1,3
Losa Chirino	0,125	742	920	6	0,48
Mortero de cemento y arena	1	1800	1000	1,34	0,213
Placa yeso	0,25	900	1000	6,75	0,39
Poliestireno de alta densidad	0,036	25	1450	86,6	3,29
Pomeca	0,12	400	1000	0,09	0,007

Tabla 2: Características Constructivas envolvente LEVS

Envolvente LEVS		
Tipo	Descripción	Espesor (cm)
M-T1	Pintura Látex	-
	Block Hormigón	20
	Revoque Fino y Grueso	2.5
M-T2	Pintura Látex	-
	Revoque con Perlita	5
	Block de Hormigón Revoque Grueso y Fino	20 2.5
M-T3	Pintura Látex	-
	EPS	5
	Block de Hormigón Revoque Grueso y Fino	20 2.5
M-T4	Revoque Fino y Grueso	2
	Block de Hormigón	10
	Revoque Fino y Grueso	2
M-T5	Placa de Yeso	1.5
	Cámara de Aire	7
	Placa de Yeso	1.5
L-T1	Chapa	0.125
	Cámara de Aire	10
	EPS	5
	Losa Cerámica Cielorraso	21 2
P-T1	Baldosa de Hormigón	5
	Mezcla de Asiento	2
	Platea de Hormigón Perlita suelta	10 5
P-T2	Platea de Hormigón	10

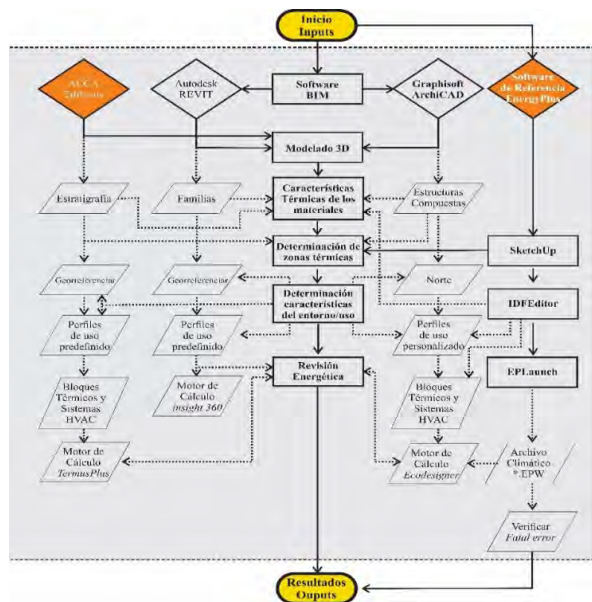


Figura 7: Mecánica de Trabajo para pasar de un modelo BIM a un modelo BEM



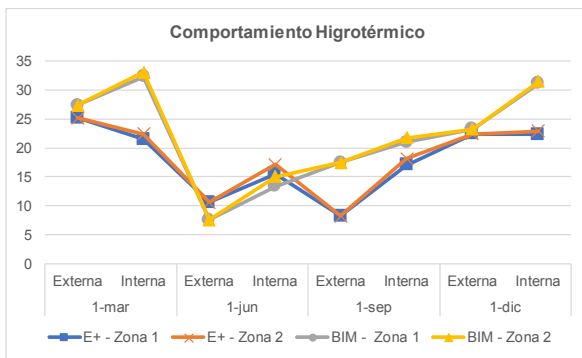


Figura 8: Análisis comparativo de los resultados alcanzados para el LEVS en EnergyPlus y en un software BIM

Tabla 3: resultados alcanzados para el LEVS en EnergyPlus y en un software BIM

Fecha	Temperatura	Energy Plus (E+)		BIM	
		Zona 1	Zona 2	Zona 1	Zona 2
1-mar	Externa	25,18	25,18	27,3	27,3
	Interna	21,49	22,47	32,3	33,0
1-jun	Externa	10,57	10,57	7,6	7,6
	Interna	15,57	17,13	13,3	15,0
1-sep	Externa	8,2	8,2	17,4	17,4
	Interna	17,05	18,15	21,0	21,7
1-dic	Externa	22,44	22,44	23,3	23,3
	Interna	22,35	22,95	31,1	31,5

Del análisis de la Figura 8 se obtiene que la tendencia de comportamiento de las curvas responde a comportamientos higrotérmicos análogos en los modelos realizados en ambos softwares. En particular, se destaca que la simulación del 1-6 cuyos valores difieren en un 14,57% en los resultados de la Zona 1 y un 12,43% para los valores de la Zona 2.

Los resultados cuyo comportamiento es disímil corresponden al 1-3, donde se observa una variación de la temperatura exterior del 0,44%, en tanto la diferencia en los resultados de la temperatura interior son del 33,46% para la zona 1 y del 31,9% para la zona 2. En este sentido, resulta llamativo que para esta simulación en EnergyPlus se obtiene que la temperatura interior es menor a la exterior y en el software BIM la relación es contraria. Esta situación indica que, a futuro debe mejorarse el modelo a los efectos de evaluar una mayor cantidad de datos. Asimismo, deben compatibilizarse los archivos climáticos utilizados en cada simulación a los efectos de evitar errores.

Respecto a las simulaciones correspondientes al 1-9 y al 1-12, se observan comportamientos hi-

gotérmicos similares entre ambos softwares. Al respecto, en promedio se registran variaciones en la temperatura interior de 23,47% para la zona 1 y del 21,75% para la zona 2, en tanto la temperatura exterior varía en el orden del 52% para el 1-9 y del 3,7% para el 1-12.

Adicionalmente, se destaca que la variaciones detectadas en el comportamiento de la zona 1 en relación con la zona 2 es del 4,56% para el 1-3, del 10,01% para el 1-6, del 6,45% para el 1-9 y del 2,68% para 1-12 para el caso de EnergyPlus y del 2,12% para el 1-3, del 11,33% para el 1-6, del 3,23% para el 1-9 y del 1,27% para 1-12 para el caso del software BIM. Al respecto, a partir de dicho análisis se infiere que ambas zonas se comportan análogamente, así como también que el modelo responde a los mismos parámetros para ambos softwares, dado que las diferencias promedio son de 5,93% para las zonas 1 y 2 en EnergyPlus y del 4,49% para el software BIM.

CONCLUSIONES

A partir del análisis precedente se concluye que el desarrollo de un Gemelo Digital construido con herramientas BIM y conforme a la mecánica de trabajo expuesta en esta investigación permite obtener resultados a partir de los cuales puede inferirse la tendencia de comportamiento higrotérmico de las zonas térmicas analizadas. En este sentido, el uso de este tipo de softwares permite la toma de decisiones en tiempo real y en etapa de diseño.

No obstante, a futuro, resulta necesario corregir el modelo y acercar los resultados a la realidad a partir de complementar el análisis con las mediciones in situ realizadas en el LEVS. Asimismo, debe cotejarse, en el comportamiento energético de la zona 2, la influencia del eco panel adosado al muro. Este dicha zona.

Adicionalmente, resulta conveniente mejorar y completar el modelo paramétrico realizado en BIM para facilitar su exportación a softwares tales como SolidWorks conforme al concepto de interoperabilidad (IFC- Industry Foundation Classes), así como también incorporar y analizar las condiciones de entorno.

REFERENCIAS

- [1] Saez V. y Garzón B. (2020). Análisis de la huella de carbono en bloques resuelto con polipropileno post-consumo. *ARQUITECNO* 16. ISSN 0328-0896. E- ISSN 2683-9881
- [2] Affan H., Arairow W., Arayro J. 2023. Mechanical and thermal characterization of bio-sourced mortars made from agricultural and industrial by-products. *Case Studies in Construction Materials* 18 (2023)

- e01939. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01939>
- [3] Schiavi, B., Havard, V., Beddiar, K., & Baudry, D. (2022). BIM data flow architecture with AR/VR technologies: Use cases in architecture, engineering and construction. *Automation in Construction*, 134, 104054. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104054>
- [4] Raza, M. S., Tayeh, B. A., Abu Aisheh, Y. I., & Maglad, A. M. (2023). Potential features of building information modeling (BIM) for application of project management knowledge areas in the construction industry. *Heliyon*, 9(9), e19697. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19697>
- [5] Ynzunza Cortés, C., Izar Landeta, J., Bocarando Chacón J., Aguilar Pereyra F. y Larios Osorio, M. (2017). El Entorno de la Industria 4.0: Implicaciones y Perspectivas Futuras. *Conciencia Tecnológica*, núm. 54. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94454631006>
- [6] Peralta-Abarca J., Martínez-Bahena B. y Enríquez-Urbano J. (2020). Industria 4.0. Revista *INVENTIO*. Año 16, núm. 39, ISSN: 2007-1760 (impreso) 2448-9026 (digital). doi: 10.30973/inventio/2020.16.39/4
- [7] Tavera Romero C., Castro D., Hamilton Ortiz J., Ibrahim Khalaf O. y Vargas M. (2021). Review Synergy between Circular Economy and Industry 4.0: A Literature Review. *Sustainability* 13, 4331. <https://doi.org/10.3390/su13084331>
- [8] Buigues Nollens, A. F. (2021). Sistema Prefabricado de Ecofachada Termoaislante para el Mejoramiento de Viviendas Sociales Construidas en la Zona Árida Centro Oeste de Argentina. *Informes De La Construcción*, 73(561), e377. <https://doi.org/10.3989/ic.74740>
- [9] Jiménez Roberto, Y., Sarmiento, J., Gómez Cabrera, A. y Leal del Castillo, G. (2017). Análisis de sostenibilidad ambiental de edificaciones empleando metodología BIM (Building Information Modeling). *Ingeniería y Competitividad*, 19(1), 230 – 240.
- [10] Graphisoft (2017). Manual de Ayuda ArchiCAD 21 – Archivos de Programa. Recuperado de www.graphisoft.com.
- [11] Choi, J., Shin, J., Kim, M. y Kim, I. (2016). Development of openBIM-based energy analysis software to improve the interoperability of energy performance assessment. *Automation in Construction* 72, 52–64. doi: 10.1016/j.autcon.2016.07.004
- [12] Aljundi, K., Pinto, A. y Rodrigues, F. (2016). Energy analysis using cooperation between bim tools (Revit and Green Building Studio) and Energy Plus. *Actas del 1º Congresso Português de Building Information Modelling*. Guimarães, Portugal: Universidade do Minho.
- [13] Gao, H., Koch, C. y Wu, Y. (2019). Building information modelling based building energy modelling: A review. *Applied Energy*, 238, 320–343 doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.032
- [14] Faaq Taha, F., Amer Hatem, W. y Adnan Jasim, N. (2020). Utilizing BIM technology to improve sustainability analyses for Iraqi Construction Projects. *Asian Journal of Civil Engineering*, 21, 1205–1215. doi: 10.1007/s42107-020-00270-y
- [15] Llave Zarzuela, E., Arco Díaz, J. e Hidalgo García, D. (2019). Estudio comparativo-tecnologías BIM en Edificación: Arquitectura Sostenible Comparative study-BIM technologies in Building: Sustainable Architecture. *Anales de Edificación*, 5(3), 8-14. <http://dx.doi.org/10.20868/ade.2019.4362>