

Desafios de interoperabilidade entre BIM e BEM

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.32.22>

Jairo B. Picott¹, Lucas Vieira²,
Mário Coelho³, José Granja⁴, José C. Matos⁵, Miguel Azenha⁶

¹ Universidade do Minho, IRISE, Guimarães, ORCID: 0000-0002-7943-7584

² Universidade do Minho, IRISE, Guimarães, ORCID: 0000-0003-1157-1362

³ Universidade do Minho, IRISE, Guimarães, ORCID: 0000-0002-6356-6963

⁴ Universidade do Minho, IRISE, Guimarães, ORCID: 0000-0002-0858-4990

⁵ Universidade do Minho, IRISE, Guimarães, ORCID: 0000-0002-1536-2149

⁶ Universidade do Minho, IRISE, Guimarães, ORCID: 0000-0003-1374-9427

Resumo

O intercâmbio de informações entre os domínios *Building Information Modelling* (BIM) e *Building Energy Modelling* (BEM) deveria idealmente ocorrer de forma rápida, precisa e consistente. No entanto, a conversão de modelos BIM para BEM ainda se realiza com limitações, como por exemplo a perda e distorção de informações geométricas e alfanuméricas. Tal processo, além de não contar com normalização específica, requer o uso de ferramentas digitais intermediárias e intervenções manuais morosas, repetitivas e sujeitas a erros. Face ao exposto, este trabalho apresenta uma proposta metodológica, denominada BIEM (*Building Information Energy Modelling*), que permite a conversão da informação armazenada nos modelos BIM para a elaboração de modelos energéticos de maneira automatizada, com o objetivo de reduzir tempos de modelação, uso de plataformas intermediárias, custos e potenciais erros oriundos de ajustes manuais. Como resultado, foram desenvolvidas duas soluções digitais com abordagens distintas. A primeira utiliza modelos no formato *OpenBIM IFC* (Industry Foundation Classes), e a segunda, utiliza modelos nativos da plataforma proprietária *Revit®* 2020. Ambas as soluções fazem uso do motor de código aberto *EnergyPlus®* 9.5 para criar e executar as simulações energéticas. No final do artigo, são comparadas as duas soluções e efetuada a validação face ao método tradicional de conversão e análise feito de forma manual.

1. Introdução

A eficiência e conservação energética na indústria da Arquitetura, Engenharia e a Construção (AEC) representa uma preocupação global, dado que o setor é o maior consumidor de energia no mundo [1]. Adicionalmente, a operação de um edifício consome entre o 80% e 90% da energia empregue no seu ciclo de vida, o que assinala a necessidade de ter edifícios mais sustentáveis e eficientes no âmbito da sua utilização [2]. A preparação de modelos de simulação permite a previsão do comportamento energético dos edifícios através de ferramentas digitais BEM (*Building Energy Modelling*) [1] e requerem, na sua conceção, informações parametrizadas essenciais para a execução das análises energéticas pretendidas, tais como a geometria do edifício/construção, materiais e suas propriedades térmicas, informação climática, tipo de uso das zonas térmicas, ganhos térmicos, sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC), e condições exteriores, entre outras [2].

O processo de análise depende de motores de simulação que utilizam modelos matemáticos para representar a geometria dos edifícios, associada a parâmetros físicos e térmicos, servindo-se dessa informação para calcular os comportamentos energéticos [3]. Alguns exemplos de motores de simulação energética comumente adotados pela indústria AEC são evidenciados de seguida. Com licenças de código aberto podem identificar-se o DOE-2[®] desenvolvido por *James J. Hirsch & Associates* (JH) em colaboração com *Laurance Berkeley National Laboratory* [4] e o EnergyPlus[®] desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* [5]. Estes software permitem a redistribuição, partilha, modificação, e o estudo do seu código fonte, através de licenças de tipo *3-clause BSD licence* [6], o que promove a colaboração entre usuários [7–9]. Com licença paga refere-se aqui o IES-VE[®] desenvolvido por *Integrated Environmental Solutions Limited* [10].

Os modelos BIM permitem guardar e gerir informações geométricas e não geométricas das edificações. Além disso, possibilitam a colaboração interdisciplinar baseada na partilha de dados durante todas as fases do ciclo de vida de um determinado empreendimento, incluindo os requeridos para as análises energéticas. *Industry Foundation Classes* (IFC), desenvolvido por BuildingSmart, e *Green Building XML* (gbXML) desenvolvido por Green Building [1,2,11,12], são dois dos mais importantes modelos de dados para troca de informação, respetivamente para BIM e BEM. O IFC consiste num esquema de dados de carácter aberto, consolidado como o formato padrão para a interoperabilidade entre diferentes plataformas [3]. Este tem uma estrutura hierarquizada que permite a representação de diferentes elementos das construções como objetos, dotados de propriedades e relações com outros objetos/entidades. O gbXML, por sua vez, opera no campo da simulação energética, e é utilizado pela sua capacidade de representar informações úteis para análises de eficiência energética das edificações, bem como de impacto ambiental [11,13,14].

A revisão da bibliografia realizada permitiu a identificação de estudos existentes que oferecem soluções para tornar a interoperabilidade de BIM para BEM mais eficiente e automatizada. Alguns exemplos relevantes incluem: i) metodologias para análises energéticas baseadas em BIM [8,15–17]; ii) abordagem BIM para BEM aplicada à administração pública e renovação de escolas [18]; iii) modelo preditivo para a recalibração contínua de modelo BEM, utilizando informações BIM [2]; iv) ferramenta para a integração de modelos BIM e meta-modelos para a predição de ganhos térmicos em habitações a través de gbXML [19]; v) Revit® *add-in* para a análise preditiva de conforto térmico e consumo energético [20]; vi) metodologia integrada que conecta BIM e ferramentas de análise energética com o sistema de certificação de edificações verdes LEED® [12]; vii) OpenStudio® *add-ins* para o aproveitamento dos esquemas de dados BIM no contexto das análises energéticas [7,9]; viii) detecção de espaços com riscos potenciais de consumo energético elevado, desconforto humano e sobrecarga de sistemas [21]; ix) verificador de modelos BIM no formato IFC para a geração de zonas térmicas [22]; x) metodologia para a extração automática de informações de design de modelos baseados em BIM para analisar a sua relação semântica com dados colecionados de regulamentações energéticas [23].

Os diferentes enquadramentos, metodologias e otimizações apresentadas procuraram, sob diferentes perspectivas, tornar mais eficiente a interoperabilidade BIM-BEM. No entanto, os fluxos de trabalho para conversão de modelos BIM para BEM ainda dependem de intervenções manuais ou semiautomáticas, morosas, repetitivas e sujeitas a erros, além de requererem diferentes plataformas intermediárias [1,3,9,13,24] que exigem mapeamentos e traduções entre modelos de dados de dados distintos, muitas vezes não normalizados [25]. Estas limitações de interoperabilidade podem levar a perda ou distorção de informações. Portanto, ainda há lacunas de conhecimento no que diz respeito à conversão automática e eficiente de modelos BIM para BEM. Adicionalmente, grande parte das ferramentas intermediárias referidas tem caráter proprietário e dessa forma, não partilham os seus códigos fonte livremente à restante comunidade técnico-científica [8,9,15–17,21,22,24,26].

Em resposta ao contexto apresentado, este artigo propõe um enquadramento que possibilita um fluxo de informação unidirecional no processo de interoperabilidade para a constituição de modelos BEM a partir de modelos BIM de forma precisa e automática, sem ferramentas intermediárias, suprimindo a necessidade de intervenções manuais para adequar a informação a passos subsequentes. Denominado *Building Information Energy Modelling* (BIEM), o enquadramento proposto está dividido em duas abordagens. A primeira, denominada abordagem de caráter aberto ou BIEM-IFC, estrutura-se a partir de modelos *openBIM* IFC. A segunda, denominada abordagem de caráter semiaberto ou BIEM-Revit, processa modelos no formato nativo da ferramenta de modelação Autodesk Revit® 2020, funcionando como um *add-in* da referida plataforma. A execução das simulações energéticas em ambas abordagens faz uso do motor de código aberto EnergyPlus®.

2. Metodologia

2.1. Fluxo de trabalho BIEM-IFC

Através da linguagem de programação C#, o fluxo de trabalho da abordagem BIEM-IFC ilustrado na Figura 1(a), converte de forma direta e automática modelos IFC para modelos energéticos na estrutura de dados nativa do EnergyPlus®, o IDF. Isto é realizado sem a necessidade de conversões para formatos utilizados por plataformas intermediárias como o gbXML. Inicialmente, o modelo BIM é criado numa ferramenta de modelação e exportado para IFC. Através da biblioteca xBIM [27], a aplicação BIEM-IFC desenvolvida extrai do ficheiro IFC as informações geométricas e não geométricas relevantes para a análise energética. Em seguida, por meio da sua interface gráfica (Figura 1(b)), a ferramenta desenvolvida permite a definição dos parâmetros de simulação e a seleção do ficheiro de dados climáticos pelo utilizador. A plataforma retém as referidas definições e faz uso de regras semânticas estabelecidas em código para criar o ficheiro IDF [28]. BIEM-IFC aciona internamente o motor EnergyPlus® e executa a simulação energética, permitindo a visualização dos resultados no fim. O processo, a partir deste instante, passa a ocorrer em background no EnergyPlus®, sendo o utilizador informado de qualquer interação que possa ser necessária. Em particular, quando as informações não cumprem os requisitos mínimos para realizar a análise energética, a ferramenta alerta o usuário. Nesse instante, o usuário pode rever o ficheiro IDF ou seguir com a execução utilizando uma configuração por defeito dos parâmetros que estejam em falta.

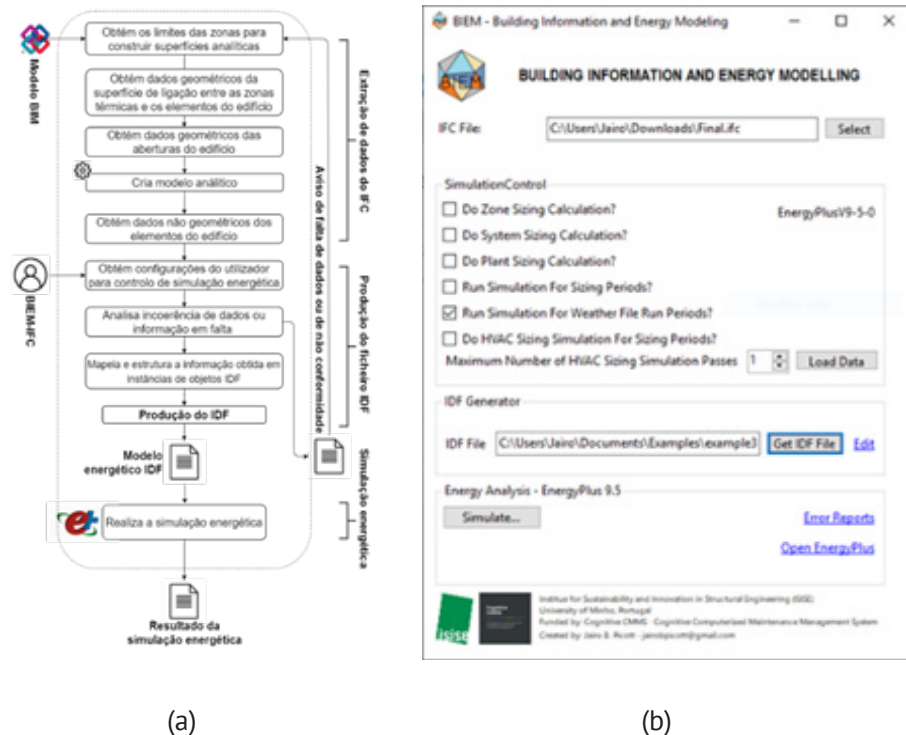


Figura 1
BIEM-IFC: (a) Fluxo de trabalho da abordagem de carácter aberto; (b) Interface gráfica do utilizador.

2.2. Fluxo de trabalho BIEM-Revit

A abordagem BIEM-Revit, semiaberta, compreende uma solução digital na forma de um *add-in* para a ferramenta proprietária de modelação Revit® 2020. Através da linguagem de programação Python e da API da referida ferramenta de modelação, o fluxo de trabalho BIEM-Revit, representado na Figura 2, converte de forma direta e automática modelos BIM em formato proprietário do Revit® 2020 para modelos energéticos na estrutura de dados nativa do EnergyPlus®, o IDF. Isto é também efetuado sem a necessidade de conversões para formatos utilizados por plataformas intermediárias. O processo inicia-se com a criação do modelo BIM no ambiente da ferramenta de modelação. Em seguida, ao ser executado, BIEM-Revit identifica os parâmetros de simulação definidos pelo utilizador para da análise energética e, através da API da plataforma de modelação [29], é produzido um modelo analítico do edifício, organizando as informações necessárias para a simulação (geométricas e não-geométricas) em categorias nativas de objetos: zonas térmicas, superfícies e aberturas analíticas. Os dados obtidos são mapeados, e baseado nas regras semânticas do formato IDF [28], o *add-in* produz o modelo energético em IDF final que será utilizado na análise executada pelo motor EnergyPlus®. Embora o BIEM-Revit crie de forma automática o modelo BEM, diferentemente do BIEM-IFC, ainda não tem a capacidade de executar nem rever os resultados da análise energética e depende da interface gráfica do EnergyPlus® EP-Launch.[30] para essa finalidade.

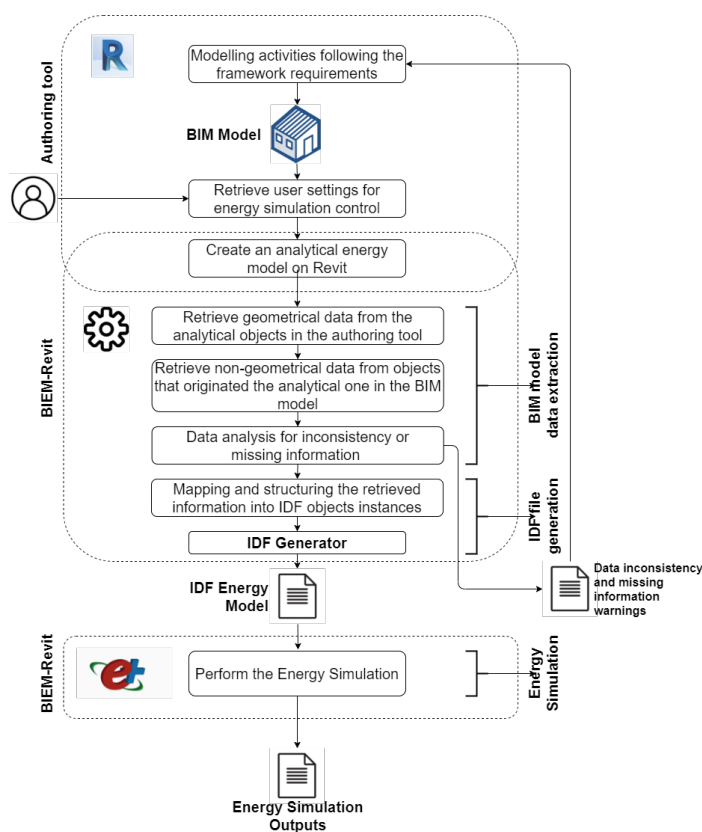


Figura 2
BIEM-Revit: Fluxo de trabalho da abordagem de carácter semiaberto.

2.3. Mapeamento de dados

Os modelos BIM contêm informação necessária e suficiente para a construção de modelos BEM que cumpram com as normalizações energéticas internacionais [23]. Posto isto, um dos processos primordiais no desenvolvimento de soluções para a transposição de BIM para BEM, é o mapeamento dos dados dos modelos baseados em BIM e a sua conversão para o modelo de dados energéticos IDF, nativo do EnergyPlus®. Para ilustrar como a informação é traduzida nas duas abordagens do enquadramento proposto, foi utilizado o exemplo de uma parede.

BIEM-IFC faz uso da entidade IFC *IfcRelSpaceBoundary* para coletar dados da parede, da zona térmica e da geometria da superfície de contato entre a parede e a zona. Quando esta superfície de contato com a zona térmica é definida na face interior da parede, BIEM-IFC ajusta a posição da geometria para estabelecer uma superfície analítica que corresponda ao eixo central da parede original. A Figura 3 ilustra graficamente o mapeamento de IFC para IDF.

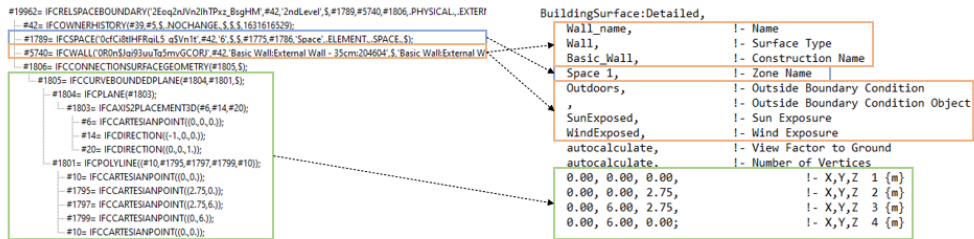


Figura 3
Mapeamento de dados:
de IFC para IDF.

No caso de BIEM-Revit, uma vez criado o modelo analítico pelo código através da API da plataforma de modelação, os dados da superfície analítica são armazenados numa variável, que depois é utilizada para fornecer as informações necessárias para representar a parede no formato IDF, conforme ilustrado na Figura 4.

doc --> Variável que contem o modelo baseado em BIM no formato nativo do Revit 2020®
surface --> Variável que contem a superfície analítica da parede

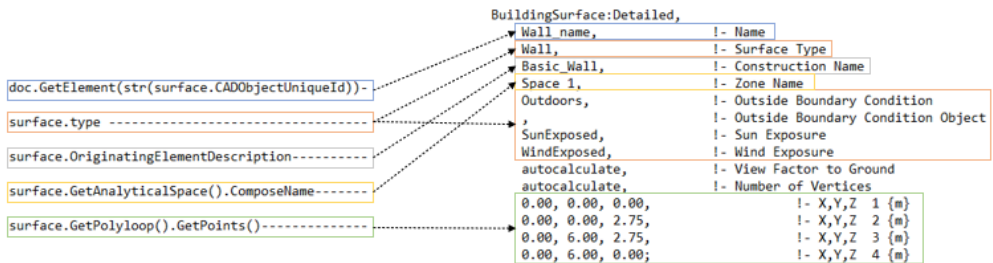


Figura 4
Mapeamento de dados:
modelo nativo Revit
para IDF.

3. Caso de estudo para validação das ferramentas digitais propostas

O estudo de caso implementado consistiu numa hipotética moradia térrea, unifamiliar, hipoteticamente localizada na cidade do Porto, com área total de 236.5 m², pé-direito interno de 2.6 m e onze zonas térmicas (ambientes). A Figura 5 apresenta a planta e uma perspetiva 3D da moradia.

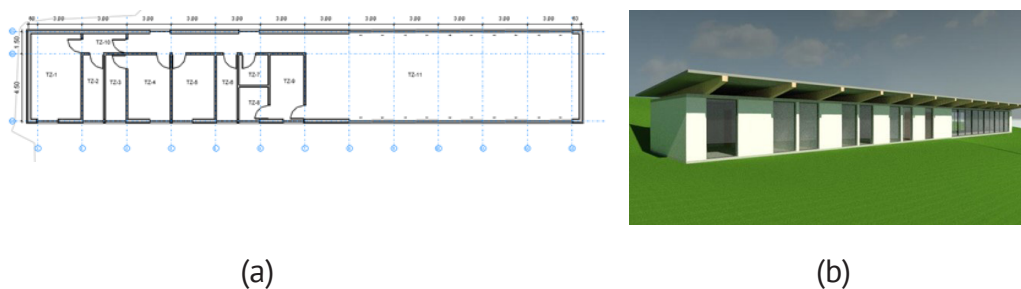


Figura 5
Casa de estudo: (a)
planta; (b) perspetiva
3D.

As condições climáticas da localização da moradia foram obtidas a partir da estação climatológica mais próxima, identificada pelo número 085450. Assim, a temperatura exterior, dados dos ganhos solares, velocidade do ar, direção do ar e os registos de precipitação histórica podem ser utilizados pelo motor EnergyPlus® para a execução da simulação energética dentro de um período de tempo, o qual pode ser definido pelo usuário nos parâmetros da simulação.

3.1. Avaliação da interoperabilidade

As duas abordagens, demonstraram a capacidade de traduzir as informações de modelos BIM para o modelo de dados energéticos nativo do EnergyPlus®, o IDF, de maneira automática, rápida e precisa. Os dois modelos IDF finais produzidos pelo BIEM-IFC e BIEM-Revit foram comparados com o um modelo BEM de referência, também em IDF, criado manualmente pela abordagem tradicional. A comparação permitiu confirmar que o número de instâncias das diferentes classes de objetos do EnergyPlus®, mapeadas e produzidas através das informações obtidas dos modelos BIM, como *Material*, *WindowMaterial:SimpleGlazingSystem*, *Construction*, *Zone*, *BuildingSurface:Detailed* e *FenestrationSurface:Detailed*, foi o mesmo. A confirmação da geometria analítica nos modelos IDF, gerados a partir da simplificação dos elementos da moradia, não revelou nenhuma diferença geométrica. No entanto, especificamente na abordagem BIEM-IFC, foram encontradas algumas limitações relativas às propriedades térmicas dos materiais associados aos elementos construtivos. Estas foram devidas à ferramenta de exportação IFC da plataforma de modelação utilizada (Revit® 2020).

Os ficheiros IFC obtidos do Revit® 2020 não contêm dados térmicos individuais dos materiais aplicados a cada uma das camadas internas que compõem os elementos compostos do edifício. Em vez disso, a plataforma de modelação exporta as propriedades térmicas do sistema de camadas como um todo para estes elementos.

Sendo assim, foi preciso explorar outras plataformas de modelação BIM e as suas ferramentas de exportação IFC para se obter a informação necessária para a análise energética com o motor EnergyPlus®. Nesse contexto, o software de modelação Archicad® 24 demonstrou-se mais eficiente no processo de exportação, uma vez que o seu tradutor IFC, possibilitou customizar a exportação para conseguir as informações necessárias. Dessa forma, o ficheiro IFC obtido do Revit® 2020 foi importado no ambiente Archicad® 24 e exportado novamente em IFC, para se conseguir os dados necessários à abordagem BIEM-IFC. Salienta-se que, no contexto da metodologia apresentada no presente trabalho, o modelo BIM no formato IFC e um input necessário. No entanto, a forma como este é obtido é independente da metodologia, devendo apenas garantir que o modelo IFC contem toda a informação necessária.

4. Resultados

Utilizando o mesmo caso de estudo, foram executadas simulações energéticas para cada um dos ficheiros IDF gerados (BIEM-IFC, BIEM-Revit e modelo de referência), para prever a temperatura média mensal, em cada uma das zonas térmicas do edifício. Os resultados demonstraram que os comportamentos da temperatura em todas as zonas da edificação foram similares. Para a simulação foram utilizados os dados climáticos coletados da estação climatológica referida na Secção 3, descarregados da base de dados do clima do EnergyPlus®, disponível online [31]. As simulações incorporaram, para cada zona, um sistema de admissão de ar e saída de retorno. Os ganhos térmicos foram definidos pelo mesmo cronograma de acesso de luz solar ao interior das diferentes zonas nos três modelos BEM. A simulação teve um período de análise de 365 dias. A Figura 6 apresenta a comparação das temperaturas médias mensais na zona número 1 e 11 (ver Figura 5 [a]), obtidas nas simulações para os três modelos energéticos. A temperatura média anual prevista no modelo de referência foi de 26.36°C. O resultado da mesma variável para a simulação com o modelo BEM produzido por BIEM-IFC e por BIEM-Revit foi de 26.83°.

A diferença encontrada nos resultados obtidos está relacionada com um aspeto específico. Na Figura 5 (b), é possível observar que a laje do teto, cuja função é definir a fronteira superior das zonas térmicas, está sob a sombra do telhado, que no caso da moradia em questão, não constitui superfície delimitadora de zona térmica, uma vez que o espaço entre a laje de cobertura e o telhado é aberto ao exterior. No processo de criação manual do modelo de referência, este aspeto foi considerado. Porém, BIEM-IFC e BIEM-Revit, ainda não têm a capacidade de identificar estas condições de sombreamento. Assim, nos modelos IDF produzidos nas duas abordagens, a laje encontra-se simulada como exposta ao sol, enquanto no modelo de referência não. Esta diferença resultou nas variações das temperaturas previstas nas simulações energéticas, e foi identificada com facilidade na zona térmica 11, devido à extensão em área ser a maior.

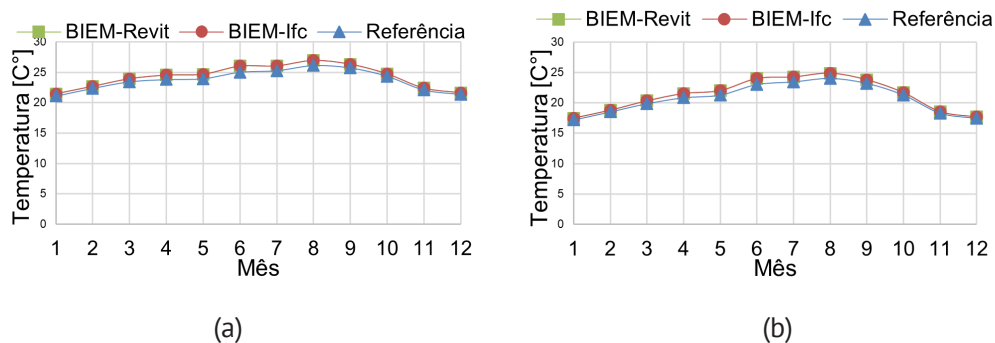


Figura 6
Temperatura média mensal na zona número: (a) 1; (b) 11.

5. Conclusões

Este artigo apresentou uma metodologia alternativa, materializada por duas abordagens distintas, para mitigar alguns dos desafios associados ao processo de interoperabilidade BIM para BEM, tornando-o mais automatizado. Foi possível tirar as seguintes conclusões:

- As duas abordagens, BIEM-IFC e BIEM-Revit, conseguiram produzir modelos BEM em formato IDF a partir de modelos BIM que permitiram simulações energéticas bem-sucedidas com o motor EnergyPlus®;
- As duas abordagens, BIEM-IFC e BIEM-Revit, conseguiram recriar a geometria da edificação satisfatoriamente. A conversão das superfícies da edificação em superfícies analíticas para a análise energética coincidiu exatamente com modelo de referência. No entanto, ainda é preciso validar o enquadramento com geometrias de maior complexidade;
- As duas abordagens, BIEM-IFC e BIEM-Revit, ainda apresentam limitações para identificar e representar no ficheiro IDF as condições de sombreamento nas superfícies da edificação, o que resultou numa pequena diferença de temperatura média identificada em relação ao modelo de referência. No futuro esta limitação será abordada com o objetivo de melhorar a precisão das simulações energéticas feitas com a metodologia BIEM;
- Duas plataformas distintas de modelação BIM (Revit® 2020 e Archicad® 24) e suas respectivas ferramentas de exportação IFC foram analisadas. O exportador IFC do Revit® 2020 não forneceu as informações requeridas para a análise energética, no que diz respeito às propriedades térmicas e físicas dos materiais que compõem os elementos da edificação compostos por camadas. O exportador IFC do Archicad® 24, por sua vez, não teve a mesma limitação, e permitiu exportar o ficheiro IFC conforme objetivo.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) sob a unidade de P & D do Instituto para Sustentabilidade e Inovação em Engenharia Estrutural (ISISE), com referência UIDB / 04029/2020. Agradece-se também o apoio financeiro providenciado pelo projeto *Cognitive CMMS – Cognitive*

Computerized Maintenance Management System (POCI-01-0247-FEDER-033574), financiado pelos programas COMPETE2020, Portugal2020 e FEDER. Por fim, agradece-se o apoio dado pelo programa *European Master em Building Information Modelling* (BIM A+).

Referências

- [1] Z. Pezeshki, A. Soleimani, A. Darabi, Application of BEM and using BIM database for BEM: A review, *J. Build. Eng.* 23 (2019) 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.01.021>.
- [2] A. Chong, W. Xu, S. Chao, N.T. Ngo, Continuous-time Bayesian calibration of energy models using BIM and energy data, *Energy Build.* 194 (2019) 177-190. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.017>.
- [3] V. Pereira, J. Santos, F. Leite, P. Escórcio, Using BIM to improve building energy efficiency – A scientometric and systematic review, *Energy Build.* 250 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111292>.
- [4] James J. Hirsch & Associates (JH), Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), U.S. Department of Energy's (DOE), DOE-2, (1998).
- [5] National Renewable Energy Laboratory (NREL), Building Technologies Office (BTO), U.S. Department of Energy's (DOE), EnergyPlus, (2001).
- [6] Opensource.org, Open Source Initiative, (2021). <https://opensource.org/licenses>.
- [7] I.J. Ramaji, J.I. Messner, R.M. Leicht, Leveraging building information models in IFC to perform energy analysis in openstudio®, *ASHRAE IBPSA-USA Build. Simul. Conf.* (2016) 251-258.
- [8] V. Dimitriou, S.K. Firth, T.M. Hassan, F. Fouchal, BIM enabled building energy modelling: development and verification of a GBXML to IDF conversion method, *lbsa.* (2016) 12-14. <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/22818>.
- [9] N. Yu, Information interoperability between Building Information Modeling authoring tools and simulation tools to support energy efficient building design, Pennsylvania State University, 2014.
- [10] Integrated Environmental Solutions Limited, IES-VE, (n.d.). <https://www.iesve.com/products/ve>.
- [11] E. Kamel, A.M. Memari, Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions, *Autom. Constr.* 97 (2019) 164-180. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.008>.

- [12] F. Jalaei, A. Jrade, Integrating Building Information Modeling (BIM) and energy analysis tools with green building certification system to conceptually design sustainable buildings, *J. Inf. Technol. Constr.* 19 (2014) 494-519. <https://doi.org/10.1007/s12273-013-0120-0>.
- [13] M. Bonomolo, S. Di Lisi, G. Leone, Building Information Modelling and Energy Simulation for Architecture Design, (2021). <https://doi.org/10.3390/app11052252>.
- [14] E. El Asmi, S. Robert, B. Haas, K. Zreik, A standardized approach to BIM and energy simulation connection, 22 (2015).
- [15] M. Sušnik, L.C. Tagliabue, M. Cairoli, BIM-based energy and acoustic analysis through CVE tools, *Energy Reports.* 7 (2021) 8228-8237. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.013>.
- [16] E.I. Samuel, E. Joseph-Akwara, A. Richard, Assessment of energy utilization and leakages in buildings with building information model energy, *Front. Archit. Res.* 6 (2017) 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2017.01.002>.
- [17] V. Bazjanac, Interoperability for Building Energy Performance Simulation – OGC AECOO-1 Testbed, *Int. BIM Act.* 7 (2009) 39-42.
- [18] L.C. Tagliabue, S. Maltese, F. Re Cecconi, A.L.C. Ciribini, E. De Angelis, BIM-based interoperable workflow for energy improvement of school buildings over the life cycle, in: *ISARC 2018 – 35th Int. Symp. Autom. Robot. Constr. Int. AEC/FM Hackathon Futur. Build. Things*, 2018. <https://doi.org/10.22260/isarc2018/0058>.
- [19] M.K. Bracht, A.P. Melo, R. Lamberts, A metamodel for building information modeling-building energy modeling integration in early design stage, *Autom. Constr.* 121 (2021) 103422. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103422>.
- [20] G. Ma, Y. Liu, S. Shang, A building information model (BIM) and artificial neural network (ANN) based system for personal thermal comfort evaluation and energy efficient design of interior space, *Sustain.* 11 (2019). <https://doi.org/10.3390/su11184972>.
- [21] F. Shalabi, Y. Turkan, BIM-Energy simulation approach for detecting building spaces with faults and problematic behavior, 25 (2020) 342-360. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2020.020>.
- [22] P. Sanguinetti, C. Eastman, Automated Energy Performance Visualization for BIM, in: *Build. Inf. Model.*, 2015: pp. 119-128. <https://doi.org/10.1002/9781119174752.ch9>.
- [23] P. Zhou, N. El-Gohary, Automated matching of design information in BIM to regulatory information in energy codes, *Constr. Res. Congr. 2018 Constr. Inf.*

- Technol. – Sel. Pap. from Constr. Res. Congr. 2018. 2018-April (2018) 75-85. <https://doi.org/10.1061/9780784481264.008>.
- [24] B.-J. He, A. Mahdiyar, M.H. Elnabawi, Building Information Modeling-Based Building Energy Modeling: Investigation of Interoperability and Simulation Results, *Front. Built Environ. | Www.Frontiersin.Org*. 6 (2020) 573971. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.573971>.
- [25] G. Bastos Porsani, K. Del Valle de Lersundi, A. Sánchez-Ostiz Gutiérrez, C. Fernández Bandera, Interoperability between Building Information Modelling (BIM) and Building Energy Model (BEM), *Appl. Sci.* 11 (2021) 2167. <https://doi.org/10.3390/app11052167>.
- [26] J. H. Woo, C. Diggelman, B. Abushakra, BIM-based energy monitoring with XML parsing engine, *Proc. 28th Int. Symp. Autom. Robot. Constr. ISARC 2011*. (2011) 544-545. <https://doi.org/10.22260/isarc2011/0098>.
- [27] S. Lockley, C. Benghi, M. Černý, Xbim.Essentials: a library for interoperable building information applications, *J. Open Source Softw.* 2 (2017) 473. <https://doi.org/10.21105/joss.00473>.
- [28] U.S. Department of Energy's (DOE), Input Output Reference, 2021.
- [29] Autodesk, Revit API 2020, (2020). <https://www.revitapidocs.com/2020/>.
- [30] U.S. Department of Energy's (DOE), Building Technologies Office (BTO), National Renewable Energy Laboratory (NREL), EP-Launch Program, (2021). <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/9-5/getting-started/ep-launch-program.html>.
- [31] National Renewable Energy Laboratory (NREL), Building Technologies Office (BTO), U.S.D. of E. (DOE), Weather Data, (2021). <https://energyplus.net/weather>.