

INTEGRAÇÃO BIM-BES PARA ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: UM ESTUDO DE CASO EM UMA EDIFICAÇÃO ESCOLAR NO BRASIL

Luísa Lopes de Freitas Guilherme¹
Ana Carolina Fernandes Maciel¹

¹Universidade Federal de Uberlândia

DOI: 10.47168/rbe.v29i3.811

RESUMO

O setor da construção civil impacta expressivamente o consumo energético mundial, de recursos naturais e as emissões de carbono na atmosfera. Enquanto as tecnologias têm se tornado cada vez mais eficazes, as alterações nos hábitos de consumo, aliado à redução nos investimentos e das políticas públicas, tornam a questão energética crítica no cenário mundial e brasileiro. O desenvolvimento de edificações com menor consumo energético se apresenta como desafio na indústria de Arquitetura, Engenharia e Construção Civil (AEC) diante dos novos padrões de consumo, assim como as avaliações energéticas, uma vez que para análises são interligados diferentes parâmetros como sistema de iluminação, ventilação natural, ar-condicionado (HVAC) e envoltórias. Sob essa perspectiva, a integração da metodologia BIM (*Building Information Modeling*) com a metodologia BES (*Building Energy Simulation*) surge como potencializadora em estudos energéticos, uma vez que, a partir da modelagem parametrizada é possível estudar diferentes soluções projetuais, estimando as necessidades de uma edificação e auxiliando nos processos de certificação. Esta pesquisa objetivou avaliar a eficiência energética de uma edificação escolar utilizando a metodologia BIM aliada a metodologia BES, por meio de um estudo de caso na edificação intitulada Bloco 5T, localizada na Universidade Federal de Uberlândia, Brasil. As simulações energéticas foram realizadas a partir dos softwares Revit® e DesignBuilder® a fim de obter etiquetagem de acordo com as diretrizes do manual INI-C (INMETRO). Como resultado, conforme o INI-C, a classificação de eficiência energética do Bloco 5T foi Classe A, sendo 72% mais eficiente do que o limite inferior da etiqueta, conceituando assim como uma edificação eficiente energeticamente. Observou-se diversas lacunas de interoperabilidade entre os programas utilizados, ainda que a metodologia adotada tenha se demonstrado satisfatória para análises de eficiência energética.

Palavras-chave: Eficiência energética; BIM; BES; Simulação energética.

ABSTRACT

The civil construction sector impacts significantly the world's energy consumption, natural resources and carbon emissions into the atmosphere. While technologies have become increasingly effective, changes in consumption habits, combined with a reduction in investments and public policies, make the energy issue critical in the world and in the Brazilian scene. The development of buildings with lower energy consumption is presented as a challenge in the Architecture, Engineering and Civil Construction (AEC) industry in face of new consumption patterns, as well as energy certifications, since different parameters are interconnected for analysis, such as the lighting system, natural ventilation, air conditioning (HVAC) and envelopes. From this perspective, the integration of BIM (Building Information Modeling) methodology with the BES (Building Energy Simulation) methodology emerges as a potentiator in energy studies, since, based on parameterized modeling, it is possible to study different design solutions, estimating the needs of a building and assisting in the certification processes. The purpose of this research was to evaluate the energy efficiency of a school building using BIM methodology combined with BES methodology, through a case study in the building entitled Bloco 5T, located at the Federal University of Uberlandia, Brazil. Energy simulations were carried out using Revit® and DesignBuilder® software to obtain labeling in accordance with the guidelines of the INI-C manual (INMETRO). As a result, according to INI-C, the energy efficiency rating of Block 5T was Class A, being 72% more efficient than the lower limit of the label, being considered as an energy efficient building. Several interoperability gaps were observed between the softwares used, even though the adopted methodology proved to be satisfactory for energy efficiency analyses.

Keywords: Energy efficiency; BIM; BES; Energy simulation.

1. INTRODUÇÃO

O consumo energético é um fator de relevância no estudo das edificações, uma vez que aproximadamente 40% da demanda energética na Europa ocorre em edificações, enquanto a demanda do setor industrial é de cerca de 30%. Ainda, em 2021 cerca de 37% das emissões de CO₂ na Europa ocorreram no segmento identificado como *buildings*. No Brasil, os setores industrial e residencial são os maiores consumidores de energia elétrica, correspondendo a 37,4% e 26,4%, respectivamente (BEN, 2022).

A crise energética provocada pela guerra entre a Ucrânia e a Federação Russa tornou o cenário mundial crítico, visto que aumentou

a insegurança de suprimento energético e inflacionou os preços de energia. A pandemia da COVID-19 reduziu o avanço dos esforços para eficiência energética, mas mesmo antes de seu início essas iniciativas já estavam enfraquecidas. As questões climáticas também favorecem o aumento do consumo de energia, visto que eventos extremos e dias mais quentes levam ao aumento do uso de sistemas HVAC (*Heat, Ventilation and Air-conditioned*). O investimento em eficiência energética ainda é a melhor alternativa para garantir o acesso a sistemas de climatização, aumentar a segurança energética e minimizar os efeitos das mudanças climáticas (IEA, 2023).

O setor industrial representa muito do consumo energético brasileiro e mundial, e nele a maior eficiência depende da melhoria de motores e máquinas (LAMBERTS et al., 2014). Já nos setores residencial, comercial e público, por sua vez, cabe a atuação do profissional projetista para aumentar a eficiência energética de edificações. Halawa et al. (2018) mencionam que por meio do estudo arquitetônico é possível potencializar o desempenho térmico e, conseqüentemente, energético da edificação, investigando seu *design* e as condições climáticas nas quais está inserida. Acrescido a isso, a maior parte dos custos envolvidos na ocupação e manutenção das edificações ao longo do ciclo de vida corresponde a aproximadamente três ou quatro vezes o custo inicial da construção, sendo que parte deste custo se relaciona com o consumo energético (DAVIS, 2013).

Sob essa perspectiva, o *Building Information Modeling* (BIM) surgiu como uma tecnologia revolucionária na indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção Civil (AEC), por ser uma metodologia de melhoria da qualidade da edificação, que aliada ao *software Building Energy Simulation* (BES), torna possível simular e avaliar o desempenho térmico e energético, e ainda auxiliar na obtenção de certificados ambientais (PEREIRA et al., 2021). Além disso, a partir de uma modelagem paramétrica é possível analisar diferentes soluções, facilitando processos de *retrofit* que atendam aos critérios de sustentabilidade. Dessa forma, a partir de simulação é possível garantir o entendimento do desempenho energético da edificação e obter resultados da interação dos seus elementos aliados ao clima e a envoltória (SORGATO et al., 2014).

Com o aumento dos impactos ambientais devido ao uso dos recursos energéticos, diversas regulamentações foram estabelecidas a fim de que se reconheça a importância da eficiência energética, disseminando programas e ações. Entre essas, destaca-se o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), regulamentação internacional, e o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), regulamentação brasileira.

O LEED é uma regulamentação internacional para certificação

ambiental, cujo objetivo é orientar e incentivar projetos e a operação de edificações com foco na sustentabilidade. É utilizada em mais de 160 países e possui quatro tipologias. Há pré-requisitos, isto é, ações obrigatórias para a certificação, sendo as ações focadas em melhoria de desempenho (GBC BRASIL, 2023).

No Brasil, em substituição e para aperfeiçoamento do antigo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível da Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), publicou-se em 2018 a Instrução Normativa do INMETRO (INI-C), que estabelece critérios e métodos para a classificação quanto à eficiência energética de edificações comerciais, de serviços e públicas, a fim de se obter a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE). O INI-C define a etiqueta da edificação considerando o grupo climático em que está localizada, bem como sua tipologia, sendo essas classificadas em: escritórios, educacionais, hospedagem, hospitalares, varejo-comércio, varejo-mercado, alimentação e gerais (INMETRO, 2021).

Esta pesquisa visou aplicar a integração BIM-BES em um estudo de caso, para verificar a classificação da eficiência energética de uma edificação pública e escolar: bloco 5T, localizado na Universidade Federal de Uberlândia, no campus Santa Mônica, seguindo as diretrizes propostas pela normativa INI-C vigente.

2. FLUXO BIM-BES PARA ANÁLISES ENERGÉTICAS

Foi realizada uma revisão da literatura a respeito da temática e nesta seção são apresentadas as considerações dos diferentes autores sobre a aplicação do fluxo BIM-BES para simulações energéticas. O BIM surgiu como uma metodologia de representação digital e parametrização das edificações, sendo também um ponto de comunicação entre as disciplinas de arquitetura, engenharia, construção e gerenciamento de informações ao longo de seu ciclo de vida (YANG et al., 2022). Nas últimas décadas a metodologia tem sido utilizada na construção civil, principalmente para o desenvolvimento de projetos, melhoria da comunicação entre os diferentes profissionais e para minimizar as dificuldades para se alcançar maior eficiência (PORSANI et al., 2021).

Para Porsani et al. (2021), o BIM se consolidou como um elo entre o ambiente digital e o ambiente físico, otimizando e controlando as informações desde a fase de projeto até a manutenção das edificações (LANGE, 2017). Também se tornou uma tecnologia de relevância para a avaliação de eficiência energética, visto que pode armazenar dados como consumo energético de sistemas, agenda de ocupação de equipamentos e ambientes, e melhorar a qualidade das edificações (PEREIRA et al., 2021).

Tendo em vista o potencial da metodologia na indústria AEC,

estudos foram desenvolvidos visando sua aplicação aliada a outras tecnologias, dentre as quais o BES, focado nas análises energéticas. Pan et al. (2017) afirmam que o processo de análise energética das edificações em *softwares* BES pode ser realizado mediante três perspectivas. A primeira é a perspectiva convencional, na qual o usuário importa um modelo 3D para um *software* de simulação de energia, em que as informações volumétricas e dados energéticos (zonas, sistema HVAC, tipo de ocupação, etc.) são inseridos nos *softwares* de análises, e na sequência são gerados os resultados da simulação.

A segunda perspectiva é utilizar *softwares* ditos *all-in-one*, como o DesignBuilder®. Nessa, o usuário pode definir a geometria, os dados energéticos de cada elemento e o espaço da edificação no *software* BES. E, por fim, a terceira perspectiva, escolhida para o estudo, é a da utilização de ferramentas com a metodologia BIM para criar a envoltória construtiva e o modelo analítico de energia e, por meio dos formatos de interoperabilidade, exportar para o *software* de simulação.

Nesse último caso o BIM facilitaria e agilizaria a criação dos modelos analíticos de energia, armazenando informações essenciais para a simulação (CHON et al., 2016) e permitindo a compreensão da interação de cada ambiente com o consumo energético. O BES é uma ferramenta inerente para identificar oportunidades de redução do consumo energético das edificações.

Segundo Pereira et al. (2021) os *softwares* BIM mais utilizados para estudos de análises termo energéticas por meio do fluxo BIM/BES são: o Revit, Archicad, Allplan e Edificius, ao passo que entre os *softwares* BES, para Ka'bi (2020) e Sanhudoa et al. (2018), os mais utilizados são o Ecotec, Energyplus, GBS, IES-ve, DesignBuilder, IDA-ICE, eQUEST, TRNSYS, Riuska e Vip-Energy.

Contudo, ainda há complicações de interoperabilidade entre aplicativos BIM e BES, dificultando a troca de informações para as análises de eficiência energética. Isto é, não existe uma troca de informações fluida, visto que há obstáculos e perda de informações essenciais dos dados de entrada na passagem entre aplicativos (BRACHT, 2021), sendo esse um dos principais fatores limitantes na consolidação do fluxo BIM-BES na indústria AEC (SHEHZAD et al., 2021).

A fim de reverter a restrição, foram desenvolvidos diferentes formatos para facilitar a troca de dados: Industry Foundation Class (IFC) e Green Building Extensible Markup Language (gbXML) são os principais padrões abertos (DIMITRIOU et al., 2016), além de outros padrões, como *hypertext markup language* (HTML), *extensible hypertext markup language* (XHTML), e o *building construction extensible markup language* (bcXML). O IFC é o principal protocolo usado e seu principal objetivo é permitir a troca de dados ao longo do ciclo de vida das edificações (BRACHT et al., 2021), contudo, tornou-se muito com-

plexo e abrangente. Os principais empecilhos desse formato, para Ying e Lee (2019), são não suportar certas transferências, bem como a perda de algumas informações essenciais para a avaliação da eficiência energética, tais como localização da edificação em estudo, zonas térmicas, dados climáticos e outros aspectos fundamentais.

Como alternativa, surgiu o Model View Definition (MVD) criado pela indústria buildingSMART® para suportar a definição de requisitos personalizados de troca de dados. Porém, a principal limitação desse formato é que os *softwares* BIM ainda não suportam MVD e versões mais recentes do IFC (BRACHT et al., 2021). Dessa forma, para troca de dados entre BIM e BES o mais recomendado é o gbXML na realização de análises e simulações.

O gbXML foi desenvolvido em 1999 pelo Green Building Studio (GBS) e tem por objetivo facilitar a exportação de dados entre BIM (Revit®) e aplicativos de análises energéticas (BES). Além disso, é uma linguagem computacional que permite o compartilhamento de informações entre *softwares* com poucas interferências e alterações, facilitando o uso de tecnologias de construção responsáveis ambientalmente (MOON et al., 2011). Esse formato é o mais utilizado nos estudos de desempenho térmico e energético, visto que vários *softwares* BIM e BES o reconhecem dentro de suas interfaces (DONG, 2007).

Dessa forma, tendo em vista as considerações dos diferentes autores sobre a potencialidade do fluxo BIM-BES para as análises energéticas, essas metodologias foram utilizadas neste estudo, tendo como representante BIM o *software* Revit, e representante BES o *software* DesignBuilder®. Ainda, foi utilizado o formato .gbXml para a troca de informações.

3. METODOLOGIA

Este estudo visou aplicar a integração BIM-BES em um estudo de caso, com a análise de eficiência energética de uma edificação escolar localizada na Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, e para isso, foram seguidas as diretrizes propostas pela instrução brasileira INI-C, do INMETRO.

Fez-se necessário, primeiramente, uma modelagem arquitetônica simplificada da edificação, em um *software* BIM, e como escolha foi utilizado o Autodesk Revit®. Na sequência, foram configurados os diferentes materiais que compõem a edificação, obtenção do arquivo climático, definição e configuração de cada espaço e zonas do sistema HVAC, agenda de ocupação e cargas internas.

Com base nas instruções presentes na normativa brasileira INI-C faz-se necessário a modelagem de uma edificação de referência, que deve possuir a mesma geometria da edificação na condição real,

entretanto, diferenciando-se na inserção de alguns parâmetros de entrada padronizados pela normativa, a fim de se obter uma edificação de classificação D.

Após a configuração, o modelo analítico foi gerado e exportado em .gbxml. Na sequência, o arquivo foi aberto no software BES e os parâmetros configurados no modelo BIM foram verificados integralmente antes de iniciar as simulações energéticas. As etapas adotadas nesta metodologia pode ser visualizada na Figura 1.

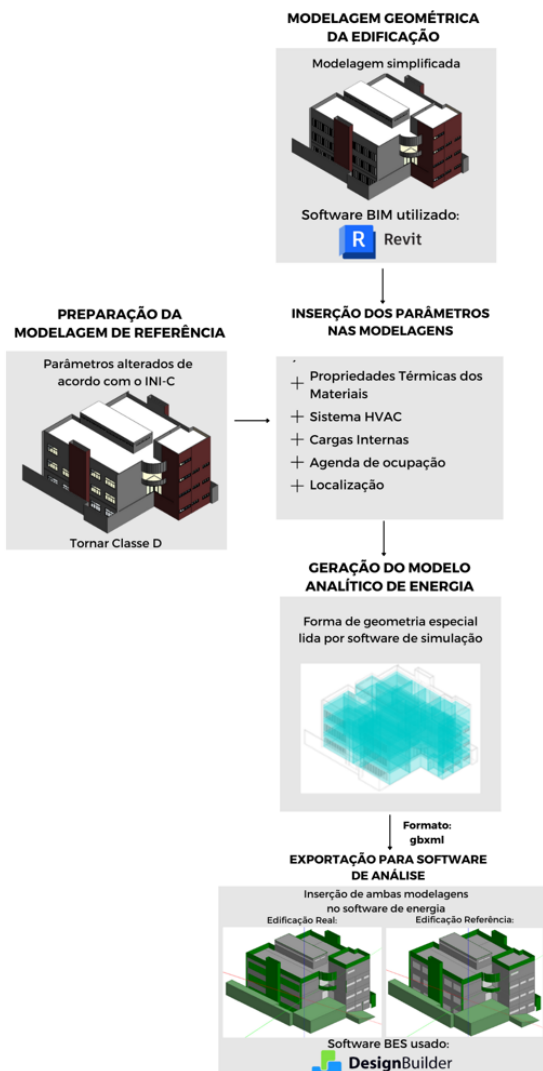


Figura 1 – Fluxograma da metodologia aplicada para a simulação dos modelos

3.1 Escolhas dos softwares

Os *softwares* escolhidos para desenvolver esta pesquisa foram o Autodesk Revit® e o DesignBuilder®. A escolha do *software* BIM Revit® decorreu da licença estudantil gratuita, e a do *software* BES DesignBuilder® devido aos resultados dos estudos realizados no grupo de pesquisa MOBI¹, com objetivo na análise da transferência de dados em *software* BES por meio de um estudo de caso com três modelos distintos, sendo esses uma residência unifamiliar de 58m², de geometria simples, e duas edificações escolares de geometria complexas.

Os resultados dos estudos de caso do Grupo MOBI demonstraram que a melhor interoperabilidade BIM-BES, nos diferentes quesitos analisados, foi com o Design Builder®, tendo sido analisados além deste o e-QUEST e o IES-VE. Com isso, foi escolhido o *software* de melhor integração BIM-BES, no qual foi possível simular e fazer as análises energéticas necessárias para esta pesquisa.

3.2 Estudo de caso

A edificação analisada, denominada Bloco 5T, consiste no Instituto de Laboratórios de Física e Química, localizado na Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, e conta com laboratórios, sala de professores e sala de técnicos para realização dos experimentos de Física e Química. A edificação contém área aproximada de 567 m² em três pavimentos, sendo esses: subsolo, térreo e primeiro pavimento. A modelagem arquitetônica é apresentada na Figura 2.

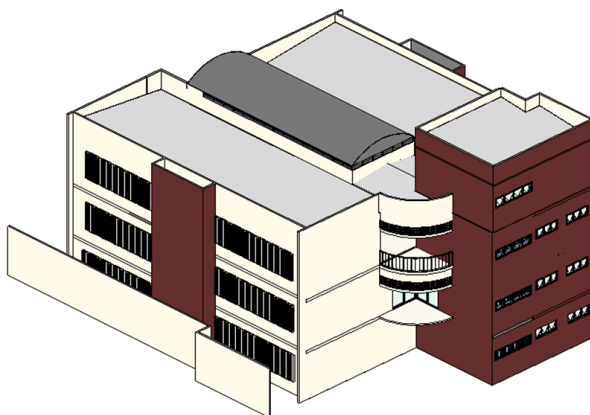


Figura 2 – Modelagem 3D arquitetônica do Bloco 5T localizado na Universidade Federal de Uberlândia

1 Grupo MOBI – Grupo de pesquisa focado em Modelagem Baseado em Informação do Laboratório Informa 3D UFU.

3.3 Parâmetro de entrada

Os parâmetros de entrada são todas as variáveis inseridas no modelo, necessárias para a simulação energética nos *softwares* BES. Os dados inseridos seguem os mesmos critérios estabelecidos em um estudo prévio realizado pelo grupo MOBI UFU, cujo objetivo foi analisar a interoperabilidade entre *softwares* BIM e BES. Os parâmetros configurados foram: localização, propriedade térmica dos materiais, dados de uso e ocupação, ganhos de calor interno e sistema HVAC.

A localização foi georreferenciada no programa BIM, no *campus* Santa Mônica, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, com latitude e longitude -18,42 e -48,28, respectivamente.

Como o objeto de estudo localiza-se no Brasil e, consequentemente, faz-se uso de técnicas construtivas brasileiras, os índices de propriedades térmicas de cada material e componente construtivo seguiram a normativa brasileira vigente, ABNT NBR 15220-2:2005, e são apresentados na Tabela 1. Nesta norma determinam-se todos os procedimentos para cálculo das propriedades térmicas dos elementos construtivos, bem como são apresentados parâmetros como densidade, condutividade térmica, calor específico, absorvância e emissividade de alguns materiais.

Tabela 1 - Camadas e propriedades térmicas dos materiais construtivos atribuídos no Revit®

| Sistema | Material | Espessura | λ | c | ρ |
|--|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|---------|
| | | (mm) | (W/m/K) | (J/kg/C°) | (kg/m³) |
| Paredes ¹ | Argamassa | 25 | 1,15 | 1000 | 2000 |
| | Bl.Cerâmico | 90 | 0,9 | 920 | 1600 |
| | Argamassa | 25 | 1,15 | 1000 | 2000 |
| Piso Subsolo ² | Cerâmica | 10 | 0,9 | 920 | 1600 |
| | Contrapiso | 20 | 1,15 | 1000 | 2200 |
| | Camada reguladora | 100 | 1,75 | 1000 | 2200 |
| Laje Treliçada | Azulejo cerâmico ⁴ | varia | 1,2 | 850 | 2000 |
| | Camada reguladora | varia | 1,75 | 1000 | 2200 |
| | Capeamento de concreto | varia | 1,75 | 1000 | 2200 |
| | Enchimento de EPS | varia | 0,04 | 1420 | 35 |
| Esquadrias alumínio e vidro ² | Vidro liso incolor | — | 1 | 880 | 2500 |
| Porta Madeira ² | Madeira Compensada | — | 230 | 880 | 2700 |
| Cobertura ² | Telha termoacústica | 10 | 0,9 | 920 | 1300 |
| Forro ³ | Poliestireno | 20 | 0,035 | 1420 | 25 |
| | Fibra mineral | 16 | 0,053 | 960 | 183 |

Notas: ¹ sistema construtivo equivalente a um bloco cerâmico de oito furos, conforme Weber et al. (2018)

² Conforme NBR 15220.2(2005)

³ Conforme Weber et al. (2018)

Quanto ao uso e ocupação de cada ambiente, determinou-se a quantidade de alunos permitida pela universidade, na qual o bloco está localizado, em uma disciplina, que é de 40, sendo possível uma ampliação da turma em até 10% para adequar os repetentes. Assim, para as salas dos laboratórios de Física e Química adotou-se um valor máximo de 44 pessoas de acordo com os horários de aula do Instituto de Física e Química, considerando períodos matutino, vespertino e noturno. A partir disso, e seguindo as diretrizes da norma ASHRAE 55 (2020), foram definidas as porcentagens de ocupação (ver Figura 3, baseada em DesignBuilder, 2022).

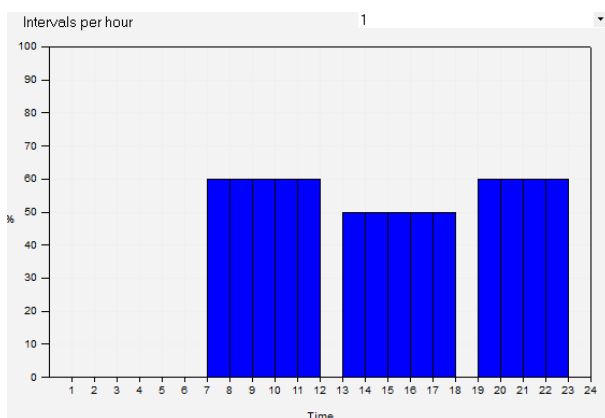


Figura 3 – Configuração de agenda de ocupação obtida no DesignBuilder

Para os demais espaços, como banheiros e átrio, mantiveram-se os valores padrão de número de pessoas para os respectivos espaços definidos pelo próprio programa, que segue os parâmetros da ASHRAE 90.1.

Quanto às cargas internas, os valores utilizados foram os da definição dos espaços do próprio programa, mas, devido às limitações dos *softwares* e da transferência de dados, esses valores já eram pré-configurados e não permitiam alterações. Dessa forma, configurou-se, dentro dos softwares, as situações “*Light office work/Standing/Walking*”, que corresponde as atividades mais semelhantes às salas de aula.

A partir de visitas in loco, verificou-se a potência das lâmpadas de cada ambiente, bem como a presença de equipamentos como ares-condicionados, computadores e impressoras. Nos ambientes que possuíam sistema HVAC foi checado o COP, isto é, o coeficiente de performance, de cada aparelho. Ainda, o sistema foi configurado no

Revit como gás dividido/compactado residencial 14 SEER/0.9 afue<5,5 t, visto que é a configuração que melhor representa o sistema utilizado no local, ar *split* com gás.

3.4 Método para determinação da eficiência energética

A classificação geral da edificação quanto a eficiência energética, conforme a INI-C, é baseada no consumo de energia primária. Esse é definido pelo consumo de energia elétrica estimado, multiplicado por um fator de conversão (F_{ce}). Dessa forma, a partir dos resultados de simulação das edificações, os consumos de ambas (real e referência) são convertidos, conforme as Equações 1 e 2.

$$CEP,real = (CEE,real \cdot f_{CE}) + (CET,real \cdot FCT) - (GEE \cdot f_{CE}) \quad (1)$$

Sendo,

$CEP,real$ = consumo de energia primária da edificação real (kWh/ano)

$CET,real$ = consumo de energia térmica da edificação real (kWh/ano)

GEE = energia gerada por fontes locais de energia renovável (kWh/ano)

f_{CE} = fator de conversão de energia elétrica em primária

$$CEP,ref = (CEEref \cdot f_{CE}) \quad (2)$$

Sendo,

CEP,ref = consumo de energia primária da edificação de referência (kWh/ano)

CEE,ref = consumo de energia térmica da edificação de referência (kWh/ano)

f_{CE} = fator de conversão de energia elétrica em primária

Por não possuir sistema de aquecimento e geração local de energia renovável na edificação, desconsiderou-se o cálculo das cargas térmicas e do consumo de energia elétrica renovável para este estudo.

Conforme a normativa INI-C, o fator de forma (FF) relaciona-se com as proporções da edificação e é calculado por meio da razão entre a área da envoltória e o volume total da edificação. Definido o FF e o grupo climático (GC10), verificado no Anexo G para diferentes cidades

brasileiras, obtém-se o coeficiente de redução do consumo de energia primária (CRC_{EPD-A}) da classificação D para a classificação A pelas Tabelas do Anexo A do INI-C.

Dessa forma, a partir das equações apresentadas na Tabela 2, são sintetizados os parâmetros necessários para o cálculo dos consumos limites para cada etiqueta.

Tabela 2 - Resultados dos parâmetros necessários para a classificação da eficiência energética conforme o INI-C

| Parâmetro | Real | Referência (D) | Unidade |
|---------------------|--------|----------------|--------------|
| FCE | 1,6 | 1,6 | Adimensional |
| CRC_{EPD-A} | 50,925 | | kWh/ano |
| FF (fator de forma) | 0,3828 | | Adimensional |

Tendo calculado a variável (CRC_{EPD-A}) e o parâmetro $C_{EP,ref}$, obtido pela Equação 2, é possível estimar o intervalo (i), por meio da Equação 3, sendo este utilizado na determinação dos limites superiores e inferiores de cada classe de eficiência energética, conforme Tabela 3 (INI-C, 2021).

$$i = \frac{C_{EP,REF} * CR_{CEPD} - A}{3} \tag{3}$$

Tabela 3 – Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética

| Classif. de eficiência | A | B | C | D | E |
|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|----------------|
| Limite superior | - | $> C_{EP,ref} - 3i$ | $> C_{EP,ref} - 2i$ | $> C_{EP,ref} - i$ | $> C_{EP,ref}$ |
| Limite inferior | $\leq C_{EP,ref} - 3i$ | $\leq C_{EP,ref} - 2i$ | $\leq C_{EP,ref} - i$ | $\leq C_{EP,ref}$ | - |

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Atendendo as diretrizes do manual INI-C, dois modelos foram criados, configurados e simulados para comparação de consumos energéticos: Edificação Real (Figura 4, a esquerda) e Edificação de Referência (Figura 4, a direita).

A Edificação de Referência corresponde, conforme as diretrizes da INI-C, a edificação real com algumas características alteradas de acordo com a tipologia contida no anexo A, para tornar a classificação dessa em etiqueta D.

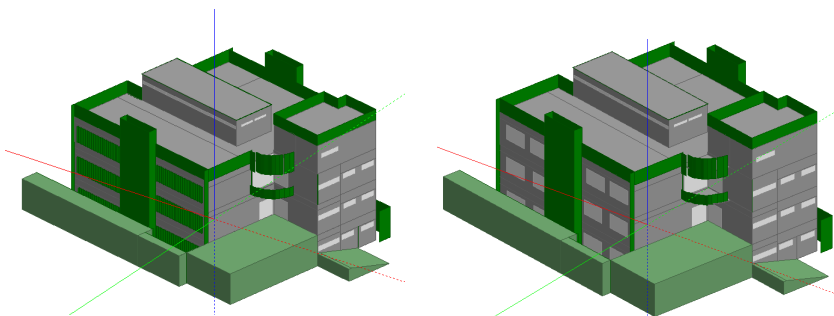


Figura 4 – Representação do Bloco 5T na condição real (a esquerda) e referência (a direita) no *software* DesignBuilder®

Na Tabela 4 são apresentados os resultados dos parâmetros necessários para determinação dos consumos limites de cada etiqueta.

Tabela 4 - Resultados dos parâmetros necessários para a classificação da eficiência energética conforme o INI-C

| Parâmetro | Real | Referência (D) | Unidade |
|---|-----------|----------------|--------------|
| CEP (consumo de energia primária) | 54.283,17 | 110.602,44 | kWh/ano |
| CEE (Energia gerada por fontes locais renováveis) | - | - | kWh/ano |
| FCE | 1,6 | 1,6 | Adimensional |
| i (intervalo) | 18.286,27 | | kWh/ano |

Conforme os resultados obtidos nas simulações tem-se que o consumo de energia elétrica da Edificação Real é de 54.283,17 kWh/ano, enquanto o consumo da Edificação de Referência foi de 110.602,44 kWh/ano, correspondendo a 103% do consumo da Edificação Real.

A partir do consumo primário da Edificação de Referência e a redução do consumo de energia primária, resulta o intervalo (i) que, comparado ao consumo energético primário real, indica a classificação de eficiência energética, apresentada na Tabela 5. Com os cálculos a edificação real ficou com $C_{EP\text{real}} = 86.853,07$ kWh/ano, enquanto a edificação referência ficou com $C_{EP\text{referência}} = 176.963,90$ kWh/ano.

Tabela 5 - Limites superior e inferior de cada classe de eficiência

| Classe da eficiência | Limite Superior (kWh/ano) | Limite Inferior (kWh/ano) |
|----------------------|---------------------------|---------------------------|
| A | - | 122.105,09 |
| B | 122.105,09 | 140.391,36 |
| C | 140.391,36 | 158.677,63 |
| D | 158.677,63 | 176.963,90 |
| E | 176.963,90 | - |

Dessa forma verificou-se que o consumo de energia da Edificação Real (86.853,07 kWh/ano) é 75% melhor que o limite inferior da etiqueta A, 122.105,09 kWh/ano, ou seja, a Edificação Real analisada, Bloco 5T, do Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, foi classificada como eficiência energética A, conforme parâmetros do INI-C.

5. CONCLUSÃO

Este estudo visou a análise da eficiência energética de uma edificação pública escolar utilizando a integração das metodologias BIM e BES, e como essa combinação pode auxiliar nas análises de sustentabilidade ambiental. Por meio de um estudo de caso no Bloco 5T na Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, avaliou-se o desempenho energético a partir dos programas Revit® e DesignBuilder® para se obter a etiquetagem de acordo com as diretrizes do manual INI-C do INMETRO.

As considerações de diferentes autores revelaram a importância do estudo das edificações e dos parâmetros que contribuem para a melhoria da eficiência energética. A integração BIM-BES surge como possibilidade de realizar avaliações energéticas fidedignas, estimando as necessidades das edificações. Embora a combinação das metodologias seja benéfica, as falhas de interoperabilidade entre programas ainda não foram totalmente solucionadas, mesmo após diversas pesquisas nesse tópico ao longo dos últimos anos. Importante ressaltar que, apesar das lacunas encontradas neste quesito, é possível sanar as limitações de transferência entre os *softwares*.

Uma das soluções encontradas foi a simplificação da geometria para fins de transferência de dados, por meio do protocolo .gbxml. Quanto mais complexa for a geometria a ser analisada (presença de átrios, *sheds*, etc.), maior o nível de simplificação a ser adotado, isso porque a geometria complexa tende a ser desconstruída na transferência entre BIM e BES.

Entre os programas Revit® e DesignBuilder®, a transferência

da geometria simplificada e das propriedades térmicas pode ser classificada como bem-sucedida. Todos os parâmetros configurados foram comparados, verificados e validados. Para alguns dados foi necessária a reconfiguração dentro da plataforma BES, como sistema HVAC, cargas térmicas e localização, para que a simulação energética tivesse êxito. Desse modo, pode-se concluir que o fluxo BIM-BES ainda não é explorado em sua potencialidade na indústria AEC, sendo necessárias intervenções no aplicativo BES escolhido. Portanto, é relevante afirmar que melhorias, pelas desenvolvedoras, nos protocolos de interoperabilidade e mais estudos em torno da temática, a fim de solucionar de forma definitiva os desafios encontrados, são necessários, inclusive para que o tempo dispendido nessas correções seja reduzido, ou até mesmo eliminado.

Como resultado energético, o Bloco 5T apresentou, mesmo após 10 anos de sua inauguração, ótimo desempenho energético, sendo classificado com etiqueta A de eficiência energética, segundo as instruções do INI-C. A utilização de ar-condicionado classe A, lâmpadas LED em todos os ambientes e um estudo adequado da envoltória são indicativos deste resultado.

Frente às problemáticas energéticas e às questões climáticas, o BIM se apresentou como alternativa ideal na busca por soluções eficientes na indústria AEC, visto que, tanto nas etapas conceituais quanto no fim da vida útil das edificações, possui a capacidade de aferir e intervir nos níveis de eficiência energética. O mercado da construção civil visa projetos rápidos e com baixo custo, e por isso, muitas vezes as questões de desempenho energético não são levadas em consideração, resultando em desperdícios econômicos, consumo energético exacerbado, baixo desempenho térmico e desconforto do usuário, indo em oposição à construção de ambientes mais sustentáveis.

Conclui-se que é de extrema relevância mais investigações e estudos de casos que avaliem o potencial econômico e ambiental da utilização de modelagens energéticas, a fim de convencer não somente projetistas como também integrantes da indústria AEC, de forma ampla, a adotar o fluxo BIM-BES nas construções, manutenção e reformas das edificações. Com isso, a utilização combinada das duas metodologias será ampliada e consolidada, comprovando a proposição de soluções econômicas e corroborando na construção de edificações ambientalmente mais sustentáveis.

Apesar deste estudo ser uma análise de eficiência energética, a partir de um estudo de caso utilizando o fluxo BIM-BES, a metodologia empregada não se limita a esse tipo de estudo, sendo possível obter resultados de emissão de carbono, consumo de água quente, análise de desempenho térmico, entre outros. Portanto, recomenda-se, como sugestão para trabalhos futuros, a aplicação da metodologia em outros tipos de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRACHT, M. K.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. A metamodel for building information modeling-building energy modeling integration in early design stage. *Automation In Construction*, [S.L.], v. 121, p. 103422, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103422>.

BRASIL. MINISTÉRIO DA ECONOMIA. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, Qualidade e Tecnologia. Portaria Nº 42, de 24 de fevereiro de 2021. Brasília, DF, 24 fev. 2021. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002707.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2022.

CHOI, J.; SHIN, J.; KIM, M.; KIM, I. Development of openBIM-based energy analysis software to improve the interoperability of energy performance assessment. *Automation In Construction*, [S.L.], v. 72, n. , p. 52-64, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.07.004>.

DAVIS, D. *Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*. 2013. 243 f. Tese (Doutorado) - Curso de Filosofia, School Of Architecture And Design College Of Design And Social Context, Rmit University, Melbourne, 2013. Disponível em: https://www.danieldavis.com/papers/danieldavis_thesis.pdf. Acesso em: 4 jun. 2023

DIMITRIOU, V.; Firth, S. K.; Hassan, T. M.; Fouchal, F. BIM enabled building energy modelling: Development and verification of a GBXML to IDF conversion method. In *Proceedings of the 3rd IBPSA-England Conference BSO, Great North Museum, Newcastle, 12–14 September 2016*; p. 1126.

_____. NBR 15220-2. Desempenho Térmico de Edificações. Parte 2: Os métodos de cálculo das propriedades térmicas, como transmitância, capacidade térmica, atraso térmico e fator solar dos elementos e componentes da edificação. ABNT, 2005. 23 p.

DONG, B., Lam, K. P., Huang, Y. C., Dobbs, G. M. 2007. A comparative study of the IFC and gbXML informational infrastructures for data exchange in computational design support environments. *Proceedings: Building Simulation 2007*. 1530-1537.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] Balanço Energético Nacional (BEN) 2022: Ano base 2021, 2022. Disponível em < <https://www.epe.gov.br> >. Acesso em maio/2023.

GBC Brasil. Leadership in Energy and Environmental Design. Disponível em: <https://www.gbcbrazil.org.br/certificacao/certificacao-leed/>. Acesso em: 23 abr. 2023.

HALAWA, E.; GHAFARIANHOSEINI, A.; GHAFARIANHOSEINI, A.; TROMBLEY, J.; HASSAN, N.; BAIG, M.; YUSOFF, S. Y.; ISMAIL, M. A. A review on energy conscious designs of building façades in hot and humid climates: Lessons for (and from) Kuala Lumpur and Darwin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, p. 2147-2161. Elsevier Science Ltd, 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (org.). Eficiência Energética: O primeiro combustível de um sistema de energia global sustentável. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/energy-efficiency>. Acesso em: 05 maio 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Energy Technology Perspectives 2019: catalysing energy technology transformations. *Catalysing Energy Technology Transformations*. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/energy-technology-perspectives>. Acesso em: 02 jan. 2020.

KA'BI, A. H. Al. Comparison of energy simulation applications used in green building. *Annals Of Telecommunications*, [S.L.], v. 75, n. 7-8, p. 271-290, 2 jun. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12243-020-00771-6>.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R.. Eficiência Energética na Arquitetura. 3. ed. São Paulo: Pw Editores, 2014. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf. Acesso em: 23 abr. 2023.

LANGE, P.; Bähre, B.; Finetti-Imhof, C.; Klamma, R.; Koch, A.; Oppermann, L. Socio-technical Challenges in the Digital Gap between Building Information Modeling and Industry 4.0. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Socio-Technical Perspective in IS Development (STPIS@ CAiSE)*, Essen, Germany, 13 June 2017, pp. 33–46.)

MOON, H. J.; CHOI, M. S.; KIM, S. K.; RYU, S. H. Case studies for the evaluation of interoperability between a BIM based architectural model and building performance analysis programs. In: *CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION*, 12., 2011, Sidney. *Proceedings [...]*. Sidney: *Proceedings Of Building Simulation*, 2011. p. 14-16.

PAN, W.; QIN, H.; ZHAO, Y. Challenges for energy and carbon modeling of high-rise buildings: The case of public housing in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling* 123, p. 208-218. Elsevier Science Ltd, 2017.

PEREIRA, V.; SANTOS, J.; LEITE, F.; ESCÓRCIO, P. Using BIM to improve building energy efficiency – A scientometric and systematic review. *Energy And Buildings*, [S.L.], v. 250, p. 111292, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111292>.

PORSANI, G. B.; LERSUNDI, K. V.; GUTIÉRREZ, A. S.; BANDERA, C.F. Interoperability between Building Information Modelling (BIM) and Building Energy Model (BEM). *Applied Sciences*, [S.L.], v. 11, n. 5, p. 2167, 1 mar. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app11052167>.

SANHUDO, L.; RAMOS, N. M. M.; MARTINS, J. P.; ALMEIDA, R. M.s.F.; BARREIRA, E.; SIMÕES, M. L. CARDOSO, V. Building information modeling for energy retrofitting – A review. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, [S.L.], v. 89, p. 249-260, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.064>.

SHEHZAD, H. M. F.; IBRAHIM, R. B.; YUSOF, A. F.; KHAIDZIR, Khairul Anwar Mohamed; IQBAL, Muhammad; RAZZAQ, Saad. The role of interoperability dimensions in building information modelling. *Computers In Industry*, [S.L.], v. 129, p. 103444, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2021.103444>.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. Análise do procedimento de simulação da NBR 15575 83 Para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 83-101, out./dez. 2014.

WEBER, F. S. Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus. 2018. 101 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

YANG, Y.; PAN, Y.; ZENG, F.; LIN, Z.; LI, C. A gbXML Reconstruction Workflow and Tool Development to Improve the Geometric Interoperability between BIM and BEM. *Buildings*, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 221, 16 fev. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings12020221>.

YING, H.; LEE, S. An algorithm to facet curved walls in IFC BIM for building energy analysis. *Automation In Construction*, [S.L.], v. 103, p. 80-103, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.004>.