

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo



Dissertação

**Utilização da ferramenta *Systems Analysis* do *software* Revit na etiquetagem
de edificações de acordo com a INI-C**

Cesar Marzullo Aguiar Centeno Rodrigues

Pelotas, 2023

Cesar Marzullo Aguiar Centeno Rodrigues

**Utilização da ferramenta *Systems Analysis* do software Revit na etiquetagem
de edificações de acordo com a INI-C**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Antônio César Silveira Baptista da Silva

Pelotas, 2023

Cesar Marzullo Aguiar Centeno Rodrigues

Utilização da ferramenta *Systems Analysis* do *software* Revit na etiquetagem de edificações de acordo com a INI-C

Dissertação aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 30/08/2023

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antônio César Silveira Baptista da Silva (Orientador)

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha

Doutor em Arquitetura pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.^a Dr.^a Ana Paula Melo

Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Luciano de Vasconcellos Corrêa

Doutor em Educação pela Universidade Federal de Pelotas

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

R696u Rodrigues, Cesar Marzullo Aguiar Centeno

Utilização da ferramenta systems analysis do software revit na
etiquetagem de edificações de acordo com a INI-C [recurso eletrônico] /
Cesar Marzullo Aguiar Centeno Rodrigues ; Antônio César Silveira
Baptista da Silva, orientador. — Pelotas, 2023.
153 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo,
Universidade Federal de Pelotas, 2023.

1. Etiquetagem. 2. INI-C. 3. Simulação energética. 4. Systems
analysis. 5. Revit. I. Silva, Antônio César Silveira Baptista da, orient. II.
Título.

CDD 725.9

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo apoio, suporte e incentivo durante toda a minha trajetória estudantil.

Ao Prof. Dr. Antônio Cesar, por ter aceitado orientar este trabalho, tendo sido incansável durante as inúmeras orientações realizadas ao longo dos últimos dezoito meses.

Aos membros da banca examinadora, por aceitarem o convite para participar da avaliação deste trabalho e pelas contribuições apresentadas.

Aos professores e colegas do PROGRAU que contribuíram para a construção desta pesquisa.

Em especial, à minha esposa Marcia, pela paciência e companheirismo ao longo da minha jornada profissional e acadêmica.

Resumo

RODRIGUES, Cesar Marzullo Aguiar Centeno. **Utilização da ferramenta *Systems Analysis* do software Revit na etiquetagem de edificações de acordo com a INI-C.** 2023. 153 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2023.

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de analisar as condições de utilização da ferramenta “*Systems Analysis*”, do Autodesk Revit 2023, para realização de simulação de eficiência energética, a partir de modelos concebidos no Revit, utilizando o procedimento de etiquetagem de edificações pelo método de simulação, conforme a Instrução Normativa do Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas - INI-C. A metodologia adotada se baseou em estudos de caso exploratórios para avaliação das potencialidades e limitações da ferramenta. Os estudos exploratórios foram divididos em três etapas de testes: simulações de desempenho, simulações geométricas e simulações para etiquetagem. Foram criados modelos de controle no EnergyPlus para a comparação dos resultados obtidos. Nas simulações de desempenho foram testados os casos 600 e 610 da ASHRAE *Standard* 140. Foi possível identificar que o Revit apresenta dois modos de exportação que impactam diretamente na criação do modelo de energia: “*Rooms or Spaces*” e “*Building Elements*”. As propriedades térmicas dos materiais e as camadas dos componentes foram exportadas corretamente para o programa de simulação energética em ambos os modos. No entanto, se evidenciou problemas na criação e aplicação das agendas de uso e na insolação das janelas sombreadas. A correção desses problemas foi realizada dentro do EnergyPlus (versão 9.1) e dentro do Sketchup 2020, através do *plug-in* Euclid (versão 0.9.4.1). Após as correções, os resultados de carga térmica obtidos foram compatíveis com o esperado, sendo constatada uma variação entre 1,5% e 2,8% para as cargas térmicas totais do caso 600 e 2,6% e 2,9% para o caso 610. Nas simulações geométricas foram testadas 18 complexidades construtivas adaptadas do *Research Project* 1810, financiado pela ASHRAE para aprimoramento da interoperabilidade entre os programas BIM e BEM. Ao final, 83,33% dos casos tiveram sua geometria corretamente exportada pelo Revit considerando os dois modos de exportação testados. Por último, foram realizadas as etiquetagens de quatro edificações, sendo três tipologias comerciais, onde foi realizada a etiquetagem da envoltória, e uma tipologia educacional, que foi simulada para a etiqueta geral. Após as correções das agendas de utilização e dos dados de entrada de ar, no EnergyPlus, e da “ativação” dos brises, no Sketchup, os modelos criados pelo “*Systems Analysis*” apresentaram resultados compatíveis com o esperado, obtendo a mesma etiqueta, com uma diferença nos percentuais de redução de carga térmica inferior a 2,46%. Os testes realizados demonstraram que ainda não é possível utilizar diretamente a simulação realizada via “*Systems Analysis*” para fins de etiquetagem pela INI-C, sem antes realizar algumas correções. Entretanto, as correções foram simples, além de terem sido encontradas soluções para a maioria dos problemas geométricos de interoperabilidade identificados, demonstrando que a ferramenta pode ser considerada um avanço tecnológico e uma possibilidade de otimização no processo de etiquetagem por simulação.

Palavras-chave: Etiquetagem. INI-C. Simulação energética. *Systems Analysis*. Revit.

Abstract

RODRIGUES, Cesar Marzullo Aguiar Centeno. **Use of Revit Systems Analysis tool for labeling buildings according to INI-C.** 2023. 153 f. Dissertation (Masters in Architecture and Urbanism) – Post Graduate Program in Architecture and Urbanism, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2023.

This work was developed aiming to analyze the conditions for using the Revit “Systems Analysis” tool, to carry out energy simulations based on models designed in Revit, applying the simulation’s method from the building labeling procedure, according to the Inmetro’s new normative instruction (INI-C). The methodology adopted was based on exploratory case studies to assess the potentialities and limitations of the tool. The exploratory studies were divided into three test stages: performance simulations; geometric simulations; labeling simulations. In the performance simulations, cases 600 and 610 of ASHRAE Standard 140 were tested. It was possible to identify that Revit has two export modes that directly impact the energy model’s creation: “Rooms or Spaces” and “Building Elements”. The thermal properties of the materials and the component layers were correctly exported to the energy simulation program in both modes. However, problems were found in the creation and application of the schedules and in the sunlit fractions in the shaded windows. These problems were corrected in EnergyPlus (version 9.1) and Sketchup 2020, through the Euclid plug-in (version 0.9.4.1). After these corrections, the thermal load results obtained were compatible with what was expected, with a variation between 1.5% and 2.8% for the total thermal loads of case 600 and 2.6% and 2, 9% for the case 610. In the geometric simulations, 18 constructive complexities adapted from the Research Project 1810, financed by ASHRAE to improve the interoperability between BIM (Building Information Modeling) and BEM (Building Energy Modeling) programs. In the end, 83.33% of the cases had their geometry correctly exported by Revit considering the two tested export modes. Finally, the labeling of four buildings was carried out, three commercial typologies for the envelope labeling, and one educational typology, which was simulated for the general label. After correcting the schedules and the air intake data, in EnergyPlus, and the “activation” of the shading device, in Sketchup, the models created by “Systems Analysis” presented results compatible with what was expected and all models obtained the same label, with a difference in the percentages of thermal load reduction of less than 2.46%. Considering the tests carried out, it was concluded that it is still not possible to directly use the simulation performed via “Systems Analysis” for labeling purposes by INI-C, without first making some corrections. However, the corrections are very simple and there are solutions for most geometric interoperability problems found, indicating that the tool can be considered a technological advance and a possibility of optimization in the simulation labeling process.

Palavras-chave: Labeling. INI-C. Energy simulation. Systems Analysis. Revit.

Lista de Figuras

Figura 1– Gráfico de consumo de energia elétrica no Brasil em 2020.	25
Figura 2 – Limites dos parâmetros de avaliação da envoltória atendidos pelo método simplificado.....	28
Figura 3 – Limites de PAZ e fator solar de vidros para coberturas na condição de referência.	31
Figura 4 – Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética geral da edificação.	34
Figura 5 - Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética da envoltória.....	35
Figura 6 – Defeitos típicos das geometrias BIM.	42
Figura 7 – Vista isométrica do Caso 600 destacando as janelas da fachada sul.	44
Figura 8 – Corte esquemático do caso 610 com destaque para o brise na fachada sul (ASHRAE, 2017).	44
Figura 9- Simulação energética em diferentes estágios de projeto.....	47
Figura 10- Fluxograma de funcionamento da ferramenta " <i>Systems Analysis</i> ".	48
Figura 11 – Localização e Arquivos climáticos.....	49
Figura 12 - Fluxograma das etapas de pesquisa.	53
Figura 13 – Tipologias utilizadas como base para as simulações para etiquetagem: a) Pequenas Edificações; b) Grandes Edificações; c) Edificações Verticais.....	56
Figura 14- Representação digital do Anexo FAUrb.	57
Figura 15 - Janela de definição da localização do modelo a ser simulado.....	61
Figura 16 - Modelagem geométrica do Caso 600 dentro do Revit (à esquerda); – Exemplo de adequação das características dos materiais (à direita).....	61
Figura 17- Janela de configuração das características de acordo com o tipo de espaço.	63
Figura 18 - Menu de configurações de energia (à esquerda) e menu de configurações avançadas de energia (à direita).	65

Figura 19 – Modelo de energia do caso 600 exportado no modo “ <i>Rooms or Spaces</i> ”.	69
Figura 20 – Configuração final utilizada na simulação.	70
Figura 21- Dados anuais referentes ao modelo gerado no Revit utilizando o modo <i>Building Elements</i> .	71
Figura 22 – Agendas semanais exportadas pelo Revit.	72
Figura 23– Agendas diárias exportadas pelo Revit.	73
Figura 24 – Gráfico de variação das cargas térmicas de aquecimento e resfriamento para as correções cumulativas realizadas no caso 600 (BE padrão).	75
Figura 25 – Gráfico comparativo das cargas térmicas anuais de resfriamento e aquecimento dos modelos do caso 600.	76
Figura 27 – Visualização do Caso 610 (BE padrão) em três programas diferentes: a) Sketchup (2020) / Euclid (0.9.4); b) OpenSutdio (2.8.1); c) Spider IDF Viewer (v-2020-10-09).	80
Figura 28 - Gráfico comparativo das cargas térmicas anuais de resfriamento e aquecimento dos modelos do caso 610.	81
Figura 29 - Erros comuns utilizando múltiplas camadas de parede: a) modelo energético com estruturas desconectadas; b) modelo energético com uma face de sombreamento sobre a cobertura.	82
Figura 30 – Modelo analítico gerado no Revit com múltiplas camadas: a) camada limítrofe externa; b) camada limítrofe interna.	83
Figura 31 – Modelo com separador virtual de espaços: a) planta baixa; b) erro comum de exportação, com estruturas dissociadas.	84
Figura 32 – Modelos analíticos exportados no Revit com separação virtual entre os espaços: a) método “ <i>Rooms or Spaces</i> ”; b) método “ <i>Building Elements</i> ”; c) método “ <i>Building Elements</i> ” com parede de ar de 1 mm.	85
Figura 33 – Modelos analíticos exportados no Revit com meia parede dentro do ambiente: a) planta baixa do modelo; b) método “ <i>Rooms or Spaces</i> ”, com a parede interna como superfície de sombreamento; c) método “ <i>Building Elements</i> ”, com parede interna com variações dimensionais.	86

Figura 34 – Modelo criado no Revit com forro de diferentes alturas: a) corte; b) modelo analítico – método “Building Elements”; c) modelo analítico – método “Rooms or Spaces” com o forro partindo da face interna das paredes; d) modelo analítico – método “Rooms or Spaces” com o forro partindo do centro das paredes;	87
Figura 35 – Modelos analíticos exportados no Revit com piso elevado e forro rebaixado: a) corte do modelo; b) método “Building Elements”, superfícies analíticas; c) método “Building Elements”, espaços analíticos em corte (alinhados com as faces externas dos ambientes).	88
Figura 36 - Modelos analíticos exportados no Revit com piso elevado e forro rebaixado: a) corte do modelo; b) método “Room and Spaces”, superfícies analíticas; c) método “Rooms and Spaces”, espaços analíticos em corte (alinhados com as faces internas dos ambientes).	88
Figura 37 - Modelos analíticos exportados no Revit um ambiente dentro de outro ambiente: a) planta baixa do modelo; b) método “Rooms or Spaces”; c) método “Building Elements”.	89
Figura 38 - Modelos analíticos exportados no Revit com forro anexo a estrutura de entrepiso: a) corte; b) método “Rooms or Spaces” com o forro como delimitador de ambiente; c) método “Rooms or Spaces” com o forro com o “room bounding” desmarcado; d) método “Building Elements” com o forro como delimitador de ambiente; e) método “Building Elements” com o forro com o “room bounding” desmarcado.....	90
Figura 39 - Modelos analíticos exportados no Revit com janela interna: a) planta baixa; b) método “Rooms or Spaces”; c) método “Building Elements”	91
Figura 40 - Modelos analíticos exportados no Revit com pé-direito elevado: a) corte; b) método “Rooms or Spaces”; c) método “Building Elements”	92
Figura 41 - Modelo criado no Revit com telhado inclinado e mansarda: a) corte; b) perspectiva; c) modelo analítico - método “Rooms or Spaces”; d) modelo analítico - método “Building Elements”.	93
Figura 42 - Modelo criado no Revit com ambiente côncavo: a) planta baixa; b) modelo analítico criado a partir do método “Rooms or Spaces”; c) modelo analítico criado a partir do método “Building Elements”.	94

Figura 43 – Diferentes tipos de modelagem da sacada: a) piso único; b) piso a partir do eixo das paredes; c) piso a partir da face externa das paredes.	95
Figura 44 - Modelos analíticos exportados no Revit com sacada: a) método “ <i>Building Elements</i> ” considerando as três formas de modelagem da Figura 43; b) método “ <i>Rooms or Spaces</i> ” considerando as formas a) e b) de modelagem da Figura 43; c) método “ <i>Rooms or Spaces</i> ” considerando a forma c) de modelagem da Figura 43.	96
Figura 45 - Modelos analíticos exportados no Revit com beiral: a) planta baixa; b) método “ <i>Rooms or Spaces</i> ”; c) método “ <i>Building Elements</i> ”.....	97
Figura 46 - Modelos analíticos exportados no Revit com pele de vidro: a) método “ <i>Rooms or Spaces</i> ”, complexidade de exportação “ <i>Simple with Shadings</i> ”; b) método “ <i>Rooms or Spaces</i> ”, complexidade de exportação “ <i>Complex with Shadings</i> ”; c) método “ <i>Building Elements</i> ”.....	98
Figura 47 - Modelos analíticos exportados no Revit com abertura vertical: a) corte; b) método “ <i>Rooms or Spaces</i> ”; c) método “ <i>Building Elements</i> ”.....	99
Figura 48 - Modelos analíticos exportados no Revit com parede curva: a) planta; b) método “ <i>Rooms or Spaces</i> ”; c) método “ <i>Building Elements</i> ”.....	100
Figura 49 - Modelos analíticos exportados no Revit com janela: a) planta; b) método “ <i>Building Elements</i> ”; c) arquivo IDF gerado pelo “ <i>Systems Analysis</i> ” e aberto no Sketchup com demonstrando as dimensões da janela exportada.	100
Figura 50 – Gráfico comparativo entre os métodos de exportação do Revit.	102
Figura 51 – Valores de referência para edificações de escritório extraídas da INI-C.	105
Figura 52 – Modelagem da parede de referência dentro do Revit.	107
Figura 53 – Modelagem da cobertura de referência dentro do Revit.	108
Figura 54 – Modelagem do vidro de referência dentro do Revit.....	109
Figura 55 – Modelo Pequenas Edificações: a) planta baixa; b) corte.....	110
Figura 56 – Parâmetros de configuração utilizados para as tipologias de escritório.	110
Figura 57 – Modelos de energia gerados pelo Revit para Pequenas Edificações: a) modelo de energia da edificação real; b) modelo de energia da edificação de referência.	111

Figura 58 – Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais para os modelos de referência: Pequenas Edificações.	112
Figura 59 - Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais por área condicionada para os modelos de referência: Pequenas Edificações.	113
Figura 60 – Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais para os modelos reais: Pequenas Edificações.	113
Figura 61 - Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais por área condicionada para os modelos de reais: Pequenas Edificações.	114
Figura 62 – Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais e variação percentual de redução das cargas térmicas entre os modelos reais e de referência: Pequenas Edificações.	115
Figura 63 - Modelo Grandes Edificações: a) planta baixa; b) corte; c) Perspectiva.	116
Figura 64 – Comparativo de consumo anuais gerado pelo <i>Systems Analysis</i> nos modos: a) “ <i>Rooms or Spaces</i> ”; b) “ <i>Building Elements</i> ”.	117
Figura 65 – Modelos analíticos para a tipologia Grandes Edificações: a) modelo criado dentro do Revit no modo “ <i>Rooms or Spaces</i> ”; b) arquivo IDF criado pelo <i>Systems Analysis</i> e visualizado no Sketchup, através do <i>plug-in</i> Euclid.	118
Figura 66 - Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais para os modelos de referência: Grandes Edificações.	119
Figura 67- Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais por área condicionada para os modelos de referência: Grandes Edificações.	119
Figura 68 - Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais para os modelos reais: Grandes Edificações.	120
Figura 69 - Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais por área condicionada para os modelos reais: Grandes Edificações.	120
Figura 70 – Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais e variação percentual de redução das cargas térmicas entre os modelos reais e de referência: Grandes Edificações.	121

Figura 71 - Modelo Edificações Verticais: a) planta baixa; b) corte; c) Perspectiva.	123
Figura 72 – Procedimento de modelagem da parede cortina dentro do Revit: a) pele de vidro faceando a face externa do piso e com o seu eixo centralizado; b) pele de vidro faceando a face externa do piso e com o seu eixo deslocado de forma a estar alinhado com o eixo da parede externa;	124
Figura 73 – Arquivo IDF criado pelo <i>Systems Analysis</i> e visualizado no Sketchup através do <i>plug-in</i> Euclid. Ampliações ilustram aberturas entre a pele de vidro e as paredes externas.....	125
Figura 74 – Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais para os modelos reais: Edificações Verticais.	126
Figura 75 - Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais por área condicionada para os modelos de referência: Edificações Verticais.	127
Figura 76 - Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais por área condicionada para os modelos reais: Edificações Verticais.	127
Figura 77 – Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais e variação percentual de redução das cargas térmicas entre os modelos reais e de referência: Edificações Verticais.....	128
Figura 78 – Projeto do Anexo FAUrb adaptado de Muta (2022): a) planta baixa do primeiro pavimento; b) corte transversal; c) planta baixa do segundo pavimento; d) corte longitudinal; e) planta baixa do terceiro pavimento; f) perspectiva.....	130
Figura 79 - Arquivos IDF criados pelo <i>Systems Analysis</i> a partir do modelo de Muta (2022) e visualizado no Sketchup através do <i>plug-in</i> Euclid, utilizando diferentes modos de exportação no Revit: a) “ <i>Building Elements</i> ”; b) “ <i>Rooms or Spaces</i> ”.	131
Figura 80 – Arquivo IDF criado pelo <i>Systems Analysis</i> a partir do modelo adaptado pelo autor utilizando o modo de exportação “ <i>Rooms or Spaces</i> ” e visualizado no Sketchup através do <i>plug-in</i> Euclid: a) fachadas norte e oeste; b) fachadas sul e leste. Modelo adaptado pelo autor e utilizado para as simulações de etiquetagem: c) fachadas norte e oeste; d) fachadas sul e leste.	134
Figura 81– Valores de referência para edificações educacionais extraídas da INI-C.	136

Figura 82 – Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética geral da edificação.	137
Figura 83- Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais por área condicionada para os modelos reais: Anexo FAUrb.	139
Figura 84 – Gráfico comparativo entre os percentuais de redução de cargas térmicas totais entre os modelos reais e de referência, com destaque para a diferença entre os percentuais de redução obtidos pelos modelos do Sketchup e do Revit (corrigido).	140

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Estudos recentes sobre interoperabilidade BIM-BEM.	39
Tabela 2 – Alterações geométricas adicionadas conforme a tipologia.	56
Tabela 3 – Características construtivas do Anexo FAUrb.	57
Tabela 4 - Características térmicas da Parede Externa	62
Tabela 5 - Características térmicas da Cobertura	62
Tabela 6 - Características térmicas do Piso	62
Tabela 7- Parâmetros de criação das estruturas analíticas observadas no modo de exportação “ <i>Building Elements</i> ”.....	64
Tabela 8 - Parâmetros de criação das estruturas analíticas observadas no modo de exportação “ <i>Rooms or Sapces</i> ”.....	64
Tabela 9 - Tabela comparativa dos dados de entrada e saída para os modos de exportação “ <i>Building Elements</i> ” e “ <i>Rooms or Spaces</i> ”, a partir do relatório de análise criado no Revit.	66
Tabela 10 – Comparativo do impacto das resoluções analíticas de superfícies e espaço nos modelos considerando os modos de exportação “ <i>Building Elements</i> ” e “ <i>Rooms or Spaces</i> ”.	67
Tabela 11 – Comparativo de parâmetros divergentes entre o IDF gerado pelo Revit e o configurado pelo autor a partir do Sketchup.....	73
Tabela 12 – Tabela comparativa dos modelos elaborados para o caso 610, com suas respectivas frações de insolação nas janelas.	77
Tabela 13 – Síntese dos resultados obtidos após a realização das simulações geométricas,.....	101
Tabela 14 – Relação de materiais utilizados na modelagens dos modelos reais....	106
Tabela 15 - Relação de materiais utilizados na modelagens dos modelos de referência.	107
Tabela 16 – Síntese da propriedades térmicas dos componentes utilizados nas simulações.	109

Tabela 17 – Abordagens utilizadas para a criação dos modelos no Revit e no Sketchup.	111
Tabela 18 – Tabela de classificação energética dos modelos reais: Pequenas Edificações.	115
Tabela 19 – Tabela de classificação energética dos modelos reais: Grandes Edificações.	121
Tabela 20 - Tabela de classificação energética dos modelos reais: Edificações Verticais.	128
Tabela 21 – Síntese das adaptações realizadas no modelo de Muta (2022) para realização das simulações.	132
Tabela 22 - Relação de materiais utilizados na modelagens dos modelos reais do Anexo FAUrb.	133
Tabela 23 – Consumo elétrico anual do Anexo FAUrb para o modelo criado no Sketchup (Anexo_SME).	137
Tabela 24 – Parâmetros de classificação aplicados na etiquetagem do Anexo_SME, conforme a INI-C, e a classificação obtida.	137
Tabela 25 – Consumo elétrico anual do Anexo FAUrb para o modelo criado no Sketchup (Anexo_REV).	138
Tabela 26 - Parâmetros de classificação aplicados na etiquetagem do Anexo_REV, conforme a INI-C, e a classificação obtida.	138

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	QUESTÕES DE PESQUISA	22
1.2	OBJETIVO GERAL.....	23
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ETIQUETAGEM DE EDIFICAÇÕES.....	25
2.1.1	INI-C – Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas.....	27
2.1.1.1	Método de Simulação	29
2.1.1.1.1	Simulação Termoenergética	29
2.1.1.2	Procedimentos para a determinação da classificação de eficiência energética de Edificações comerciais, de serviços e públicas.....	32
2.1.1.2.1	Classificação da eficiência energética geral da edificação	32
2.1.1.2.2	Classificação de eficiência energética da envoltória	34
2.2	SIMULAÇÃO ENERGÉTICA COMPUTACIONAL E BIM.....	35
2.2.1	Interoperabilidade BIM-BEM	37
2.2.2	ASHRAE <i>Standard</i> 140	42
2.2.3	ASHRAE <i>Research Project</i> 1810.....	45
2.2.4	Ferramenta <i>Systems Analysis</i>	46
2.3	CONSIDERAÇÕES	50
3	METODOLOGIA	52
3.1	ETAPA DE REVISÃO	53
3.2	ETAPA DE DELINEAMENTO	54
3.2.1	Definição dos modelos a serem testados	54
3.2.1.1	Simulações exploratórias	54
3.2.1.2	Simulações para etiquetagem.....	55
3.2.2	Definição da forma de verificação dos resultados	58
3.3	ETAPA DE DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE.....	59
3.4	ETAPA DE CONCLUSÃO	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
4.1	SIMULAÇÕES EXPLORATÓRIAS DE DESEMPENHO.....	60
4.1.1	Caso 600	60
4.1.1.1	Conferência preliminar de dados	66
4.1.1.2	Resultados preliminares e cruzamento de dados	70
4.1.1.3	Resultados.....	74

4.1.2	Caso 610	77
4.2	SIMULAÇÕES EXPLORATÓRIAS GEOMÉTRICAS	82
4.2.1	GBXML.ORG – Caso 01 (paredes externas de múltiplas camadas)	82
4.2.2	GBXML.ORG – Caso 02 (separação virtual de espaços)	84
4.2.3	GBXML.ORG – Caso 03 (meia parede)	85
4.2.4	GBXML.ORG – Caso 04 (forro de alturas diferentes)	86
4.2.5	GBXML.ORG – Caso 05 (piso elevado e forro rebaixado).....	87
4.2.6	GBXML.ORG – Caso 06 (informações do envelope)	89
4.2.7	GBXML.ORG – Caso 07 (ambiente dentro de outro ambiente)	89
4.2.8	GBXML.ORG – Caso 08 (piso e forro adjacentes)	90
4.2.9	GBXML.ORG – Caso 09 (janela interna)	91
4.2.10	GBXML.ORG – Caso 10 (átrio)	92
4.2.11	GBXML.ORG – Caso 11 (mansarda).....	92
4.2.12	GBXML.ORG – Caso 12 (ambiente côncavo)	94
4.2.13	GBXML.ORG – Caso 13 (sacada).....	95
4.2.14	GBXML.ORG – Caso 14 (beiral).....	96
4.2.15	GBXML.ORG – Caso 15 (pele de vidro).....	97
4.2.16	GBXML.ORG – Caso 16 (abertura vertical / <i>shaft</i>)	98
4.2.17	GBXML.ORG – Caso 17 (parede curva).....	99
4.2.18	GBXML.ORG – Caso 18 (moldura da janela).....	100
4.2.19	Análise dos resultados – Simulações Geométricas	101
4.3	SIMULAÇÕES PARA ETIQUETAGEM	103
4.3.1	Tipologias Comerciais (escritório)	103
4.3.1.1	Pequenas Edificações	109
4.3.1.2	Grandes Edificações	116
4.3.1.3	Edificações Verticais.....	122
4.3.2	Tipologia Educacional.....	129
4.3.2.1	Anexo FAUrb (UFPeI).....	129
4.3.3	Análise dos resultados – Simulações para etiquetagem	139
5	CONCLUSÕES	141
5.1.1	Limitações da pesquisa	143
5.1.2	Recomendações para trabalhos futuros	144
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146

1 INTRODUÇÃO

O processo de etiquetagem de edificações no Brasil se desenvolveu através do Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações - PROCEL EDIFICA e do Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE. Essa política pública objetiva incentivar a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais (água, luz, ventilação, entre outros) nas edificações, reduzindo os desperdícios e os impactos sobre o meio ambiente. O consumo de energia elétrica nas edificações residenciais e comerciais, de serviços e públicas corresponde a aproximadamente 45% do total da eletricidade consumida no Brasil, com um potencial estimado de economia de 50% para novas edificações (PBE EDIFICA, 2021b). Segundo Fossati *et al.* (2016), uma forma de diminuir o consumo energético dos edifícios é o estabelecimento de políticas de regulação, de avaliação e de classificação do desempenho energético desses.

Em 2009, com a promulgação da Portaria INMETRO nº 163 - Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos - RTQ-C, foi definido seu marco legal. Desde então, alterações e contribuições vêm sendo discutidas no intuito de melhorar a metodologia de avaliação do consumo das edificações.

A principal motivação para o desenvolvimento de um novo método simplificado para avaliar e classificar a eficiência energética das edificações foi a discrepância de resultados existentes entre o método prescritivo e o método de simulação, conforme demonstrado por Melo (2012). Além disso, o método prescritivo do RTQ-C apresenta outras limitações: não considera orientação solar das áreas envidraçadas e proteções solares, o entorno edificado, o uso de vidros de controle solar, a iluminação natural e as variações de sistema de condicionamento de ar; apresenta limitação volumétrica; uso de um único padrão de carga térmica interna e uso e ocupação; levantamento de dados não significativos na avaliação e exigência de especialização técnica para aplicação do método (VERSAGE, 2015; SIRTULI *et al.*, 2022). O fato de o indicador de desempenho do método prescritivo do RTQ-C ser adimensional também contribuiu para a adoção de um método que fosse capaz de quantificar de forma mais direta a eficiência da edificação.

Como resultado desse trabalho foi promulgada a Portaria nº 42 de 24 de fevereiro de 2021, onde foi aprovada a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas - INI-C, aperfeiçoando o RTQ-C e especificando os critérios e os métodos para a classificação de edificações comerciais, de serviços e públicas quanto à sua eficiência energética. Em 06 de setembro de 2022 foi aprovada a Portaria nº 309 instituindo em um só documento a Instrução Normativa Inmetro para as Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C), a Instrução Normativa Inmetro para as Edificações Residenciais (INI-R), os Requisitos de Avaliação da Conformidade (RAC) e as Especificações para o Selo de Identificação da Conformidade, na forma da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), para Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas, e Edificações Residenciais, e revogando a portaria anterior (BRASIL, 2022).

O novo regramento possui obrigatoriedade de aplicação a partir de 1º de maio de 2024, mas sua aplicação já vem sendo estudada desde suas primeiras versões e algumas dificuldades já são projetadas com relação à sua aplicabilidade. Diversos avanços foram constatados em relação ao regramento anterior, como a melhor caracterização do entorno, melhor representação da volumetria, maior precisão no sistema HVAC utilizado, possibilidade de avaliação da iluminação natural e ventilação natural, adoção do consumo de energia como parâmetro de avaliação e utilização dos dados do zoneamento bioclimático nos cálculos (SIRTULI, 2022). Nos estudos de caso realizados por Pimentel *et al.* (2021), tanto a utilização do método simplificado como a utilização do método de simulação obtiveram a mesma ENCE Geral com diferenças entre 1,37 e 9,82% no consumo. Leite e Hackenberg (2020) também afirmam que o instrumento de certificação proposto na INI-C é um avanço em relação ao anterior. No entanto, constataram que a maior precisão do novo método está atrelada à maior quantidade de dados necessários para a análise e a dificuldade de extração de algumas dessas variáveis para a avaliação no método simplificado tornou o processo mais complexo, gerando um aumento de 33% no tempo necessário para desenvolver a análise. Rodrigues (2020) corrobora o aumento da complexidade no processo, indicando um aumento de tempo de análise estimado em 41%.

Além disso, apesar de manter dois métodos de análise: simplificado e de simulação, a nova legislação alterou os parâmetros de enquadramento para a aplicação do método simplificado, antigo método prescritivo, diminuindo as edificações que poderão utilizá-lo. Analisando as Etiquetas Nacionais de Conservação de Energia – ENCE emitidas no âmbito do RTQ-C até julho de 2021, aproximadamente 80% delas utilizaram o método prescritivo como forma de análise (PBE EDIFICA, 2021a), corroborando para esse fato o alto custo de análise cobrado pelo método de simulação. Assim, é possível inferir uma tendência de sobrecarga para os organismos avaliadores, tanto pela maior complexidade do método simplificado, como pelo provável aumento nas avaliações pelo método de simulação.

Considerando que a celeridade no processo de etiquetagem está diretamente ligada ao sucesso da política de efficientização das edificações do país, destaca-se a importância de se encontrar alternativas para agilizar o processo de etiquetagem no futuro. Nesse contexto, a Modelagem da Informação da Construção - BIM, que vem sendo largamente difundida na indústria da construção civil (EASTMAN *et al.*, 2018) e tendo seu uso estimulado pelo próprio governo federal para ser adotada pelos órgãos públicos (BRASIL, 2020), surge como alternativa para a otimização desse processo. Os sistemas fundamentados na tecnologia BIM são considerados a evolução dos sistemas CAD tradicionais, pois gerenciam as informações do ciclo de vida de uma construção por meio de um conjunto de informações essenciais a um projeto integrados à modelagem em três dimensões e ao modelo paramétrico da edificação que fornece dados relativos às propriedades, comportamentos e interações dos componentes construtivos (CRESPO; RUSCHEL, 2007). O BIM tem permitido que o mercado da Arquitetura, Engenharia e Construção - AEC alcancem a interoperabilidade e integração de dados entre os diferentes componentes do sistema construtivo. Permite integrar as descrições de uma edificação, tais como geometria 3D, materiais, estruturas, sistemas de ar-condicionado, elétrica, hidrossanitário, entre outros, em um formato que pode ser usado para analisar o desempenho energético do edifício (PINHA, 2017).

Todavia, a análise do desempenho energético de uma edificação é realizada através de software específicos, conhecida como Modelagem Energética da Edificação – BEM (GERRISH *et al.*, 2017). Ainda na fase de projeto, o BEM permite a criação de alternativas relacionadas à eficiência energética da edificação. Os

resultados possibilitam que os profissionais do ramo da construção e usuários façam melhores escolhas de materiais para: o envelope do edifício, janelas, iluminação, entre outros (GARCIA; ZHU, 2015).

Para que seja possível a conversa entre os sistemas BIM-BEM é essencial que os programas reconheçam os dados gerados entre eles. Essa interoperabilidade, exclui a necessidade de reprodução de dados, facilitando a automatização e a resolução de obstáculos envolvidos no fluxo de trabalho entre diferentes aplicativos (ANDRADE; RUSCHEL, 2009). A baixa interoperabilidade entre os sistemas restringe a utilização da análise energética durante a concepção do projeto. Além disso, o tempo necessário para ler e reconstruir a geometria de um arquivo BIM em um programa de análise energética pode chegar a 50% do tempo necessário para executar a simulação energética (KIM; ANDERSON, 2013).

1.1 Questões de pesquisa

O desenvolvimento do BEM baseado em BIM ainda se encontra em estágio inicial e diversos estudos têm tentado buscar alternativas para que essa tecnologia possa ser utilizada, com diferentes abordagens para tentar alcançar a interoperabilidade necessária. Segundo GAO *et al.* (2019) existe um grande potencial para melhorar a interoperabilidade, velocidade e confiabilidade das simulações de energia, além de integrar de forma orgânica as estratégias de eficiência energética no projeto de edifícios.

Por se tratar de um tema diretamente ligado aos avanços dos programas baseados em BIM existentes no mercado, ressalta-se a importância acadêmica de acompanhar seus avanços e testar seus resultados. No final de 2019, o programa Autodesk Revit 2020.1, consolidado como o programa BIM mais utilizado para elaboração de projetos segundo a National Building Specification (NBS, 2020), incorporou a ferramenta “*Systems Analysis*” e possibilitou a realização de simulações energéticas diretamente a partir do modelo BIM. De acordo com o desenvolvedor, a ferramenta é capaz de gerar relatórios diretamente no ambiente do Revit, permitindo que o projetista obtenha resultados sem precisar manipular outros programas, o que representaria um grande ganho de tempo e, conseqüentemente, produtividade.

Considerando a aplicação dessa nova ferramenta ao processo de etiquetagem de edificações no Brasil, diversas questões de pesquisa foram levantadas:

- Como é realizada a simulação energética realizada pela ferramenta?
- Como ocorre a interoperabilidade de dados entre a ferramenta do Revit e o programa de simulação energética?
- Qual a capacidade de análise da ferramenta e seu grau de confiabilidade?
- A ferramenta contempla as variáveis mínimas para etiquetagem de edificações pelo método de simulação da INI-C?
- Os resultados das simulações energéticas encontrados na ferramenta são compatíveis com os resultados de outros programas já reconhecidos no mercado atual?
- Os problemas de interoperabilidade relativos à exportação da geometria para os programas de simulação energética foram solucionados?

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a possibilidade de utilização da ferramenta “*Systems Analysis*”, do Revit, na otimização do processo de etiquetagem de edificações, conforme a INI-C.

1.3 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos destacam-se:

- a) Identificar o método de funcionamento da ferramenta, bem como suas características e limitações;
- b) Identificar as variáveis disponibilizadas pela ferramenta e como suas pré-configurações impactam nos resultados;
- c) Avaliar se os dados de entrada informados na ferramenta são corretamente carregados pelo simulador energético;
- d) Avaliar se a complexidade geométrica do modelo interfere nos resultados gerados pela ferramenta;

- e) Avaliar a relevância numérica dos resultados obtidos pela ferramenta em comparação com o programa EnergyPlus;
- f) Avaliar a possibilidade de utilização da ferramenta para etiquetagem de edificações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Eficiência energética e etiquetagem de edificações

Uma edificação pode ser considerada energeticamente eficiente quando é capaz de proporcionar condições de conforto ao usuário com o baixo consumo de energia, quando comparada a outra edificação similar (LAMBERTS *et al.*, 2014). Considerando que a maior parte do impacto ambiental de um edifício está diretamente relacionado com seu uso e operação, foram desenvolvidas certificações que avaliam a eficiência energética e detectam potenciais reduções do consumo com mudanças no projeto, implantação de novas tecnologias e mudanças no comportamento do usuário (GONÇALVES; BODE, 2015). Com o aumento da eficiência energética, há uma redução no incremento do consumo de energia e, logo, obtém-se uma redução da demanda de investimentos em novas fontes de geração (GELLER, 2003).

Segundo a EPE (2021), o consumo de energia elétrica no Brasil no ano de 2020 teve 51,2% de participação dos setores residencial (27,6%), comercial (15,7%) e público (7,90%), como pode ser observado na Figura 1. No Brasil, existe um potencial estimado de economia de 50% para novas edificações (PBE EDIFICA, 2021b).

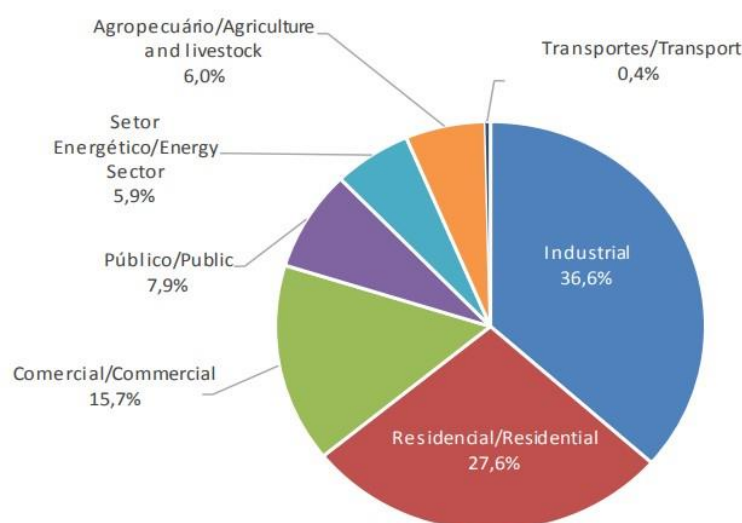


Figura 1– Gráfico de consumo de energia elétrica no Brasil em 2020.

Fonte: EPE (2021).

Nos setores comercial e público, o consumo de energia é fortemente influenciado pela grande quantidade de calor gerado no interior do edifício. Ao contrário da arquitetura residencial, os edifícios comerciais e públicos possuem maior densidade de usuários, de equipamentos e de lâmpadas que levam à tendência ao sobreaquecimento dos ambientes (LAMBERTS *et al.*, 2014).

Como forma de incentivar e impulsionar a racionalização do uso de energia no Brasil, em 2009 foi instituído o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C). Em 2010, dando continuidade ao processo, foi instituído o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). A etiquetagem de edificações faz parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBE-Edifica), sendo intitulada de Etiqueta Nacional de Eficiência Energética (ENCE), e tem como propósito incentivar o planejamento de projetos de edificações que aproveitem a capacidade de iluminação e ventilação natural, com um menor consumo de energia elétrica, proporcionando conforto ambiental. O processo de etiquetagem de edificações se configura como um processo de avaliação da eficiência energética da edificação.

Em 2022 um novo roteiro de avaliação, chamado de Instrução Normativa Inmetro para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) e que tem o objetivo de aperfeiçoar e substituir o RTQ-C, foi publicado pelo INMETRO (BRASIL, 2022). Essa avaliação baseia-se no consumo de energia primária. Para sua aplicação, são analisadas as características da edificação real existente, que são comparadas com as características da mesma edificação considerando-a com componentes construtivos de baixa eficiência, equivalentes à classe “D” de eficiência energética, chamada de edificação de referência. A classificação energética da edificação é obtida a partir do percentual de redução de consumo gerado, comparando as duas situações, na condição real e na condição de referência.

2.1.1 INI-C – Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas

A INI-C é o resultado de uma série de pesquisas realizadas pelo Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações (PROCEL EDIFICA) em conjunto com o Centro Brasileiro de Eficiência Energética de Edificações – CB3E. A INI-C visa aperfeiçoar o método de avaliação e classificação de eficiência energética das edificações comerciais, de serviços e públicas (BRASIL, 2022).

De acordo com a INI-C a classificação da nova ENCE é realizada em função do desempenho térmico da envoltória e do consumo de energia primária (CEP) dos equipamentos e sistemas da edificação. Um dos principais aspectos da INI-C, em comparação ao RTQ-C, é o novo método simplificado, baseado em equações, tabelas e em dois metamodelos, um para edificações condicionadas artificialmente e outro para edificações ventiladas naturalmente ou híbridas. A INI-C também apresenta o método de simulação, baseado em programas de simulação termoenergética e iluminação natural (BRASIL, 2022).

A classificação de eficiência energética de edificações comerciais, de serviços e públicas pode ser geral ou parcial. A classificação parcial da edificação é possível para os seguintes sistemas: a) Envoltória completa (obrigatória em todas as avaliações); b) Envoltória completa e sistema de condicionamento de ar; c) Envoltória completa e sistema de iluminação; d) Envoltória completa e sistema de aquecimento de água; e) Envoltória completa e outros dois sistemas citados acima.

Considerando que o foco do trabalho está na avaliação de uma ferramenta de simulação para análise energética, esse foi o método de etiquetagem avaliado, considerando apenas as edificações na fase de projeto. Qualquer edificação pode ser avaliada a partir do método de simulação termoenergética, no entanto o método é obrigatório para as edificações que não atendem às condições definidas na Figura 2.

Parâmetros	Limites	
	Valor mínimo	Valor máximo
Absortância solar da cobertura (α_{cob})	0,2	0,8
Absortância solar da parede (α_{par})	0,2	0,8
Ângulo de obstrução vizinha (AOV)	0°	80°
Ângulo horizontal de sombreamento (AHS)	0°	80°
Ângulo vertical de sombreamento (AVS)	0°	90°
Capacidade térmica da cobertura (CT_{cob})	0,22 kJ/(m ² .K)	450 kJ/(m ² .K)
Capacidade térmica da parede externa (CT_{par})	0,22 kJ/(m ² .K)	450 kJ/(m ² .K)
Densidade de potência de equipamentos (DPE)	4 W/m ²	40 W/m ²
Densidade de potência de iluminação (DPI)	4 W/m ²	40 W/m ²
Fator solar do vidro (FS)	0,21	0,87
Pé-direito (PD)	2,6 m	6,6 m
Percentual de área de abertura da fachada (PAF)	0%	80%
Transmitância térmica da cobertura (U_{cob})	0,51 W/(m ² .K)	5,07 W/(m ² .K)
Transmitância térmica da parede externa (U_{par})	0,50 W/(m ² .K)	4,40 W/(m ² .K)
Transmitância térmica do vidro (U_{vid})	1,9 W/m ²	5,7 W/m ²

Figura 2 – Limites dos parâmetros de avaliação da envoltória atendidos pelo método simplificado.

Fonte: BRASIL (2022).

Além disso, edificações que possuem aquecimento artificial, aberturas zenitais, bem como vidro em frente das paredes da fachada, fachadas ventiladas, ambientes de elevada geração de carga interna, dispositivos móveis de sombreamento interno automatizados, vidros com comportamento dinâmico a exemplo dos eletrocromicos ou outras soluções de desempenho inovadoras, devem ser avaliadas pelo método de simulação termoenergética (BRASIL, 2022).

Antes de ser publicada em 2021, o texto da normativa foi disponibilizado para consulta pública em 2018. A partir dele foram desenvolvidas pesquisas buscando analisar e comparar o novo regramento com o RTQ-C vigente à época. Embora seja um procedimento recente e ainda não esteja completamente dominado pelos usuários, o acréscimo na complexidade e no tempo de análise do processo, juntamente com o aumento das restrições para a utilização do modelo simplificado, pode resultar em um incremento das etiquetas por simulação. É precisamente nesse contexto que esta pesquisa se insere, buscando identificar abordagens para agilizar o processo de etiquetagem sem comprometer a precisão dos resultados.

2.1.1.1 Método de Simulação

O método de simulação pode ser aplicado em duas situações, nas simulações termoenergéticas e nas simulações de iluminação natural. Neste trabalho será tratado apenas da simulação termoenergética, que foi o método utilizado para a classificação de eficiência energética das edificações.

2.1.1.1.1 Simulação Termoenergética

Qualquer edificação pode ser avaliada a partir do método de simulação termoenergética. A partir das simulações termoenergéticas obtém-se o consumo final por uso dos sistemas individuais em energia elétrica. Os resultados obtidos pelos dados de saída da simulação devem ser utilizados no cálculo do consumo de energia primária da condição real (CEP_{real}) e condição de referência (CEP_{ref}), para posterior identificação da classificação de eficiência energética desta INI-C (BRASIL, 2022).

No método de simulação, assim como no simplificado, a edificação deve ser avaliada sob duas condições: a condição real, com as características reais da edificação; e a condição de referência, com as características listadas nas tabelas do Anexo A da INI-C, que variam conforme a tipologia avaliada. Para tanto, deve-se elaborar um modelo representando a edificação real e um modelo representando a condição de referência (BRASIL, 2022).

O modelo do edifício real e o modelo do edifício de referência devem apresentar as seguintes características (BRASIL, 2022):

- a) Mesmo programa de simulação;
- b) Mesma versão do programa de simulação;
- c) Mesmo arquivo climático;
- d) Mesma condição de contato com o solo do pavimento inferior;
- e) Mesma condição de contato com o exterior do pavimento superior;
- f) Mesma orientação com relação ao Norte Geográfico;
- g) Mesmo geometria, número de pavimento e divisão de zonas térmicas;
- h) Mesmas considerações de carga interna em cada zona térmica;

- i) Mesma condição de troca de calor para os elementos construtivos;
- j) Mesma área total de piso condicionada;
- k) Mesmo padrão de uso de pessoas, com o mesmo valor de calor dissipado por pessoa da edificação real (deve estar acordo com tipologia do Anexo A da INI-C);
- l) Mesmo padrão de uso e operação dos sistemas da edificação real;
- m) Mesmo valor de DCI em equipamentos da edificação real;
- n) Mesmo *setpoint* de refrigeração e aquecimento para o sistema de condicionamento de ar adotado;
- o) Mesma taxa de renovação de ar para o sistema de condicionamento de ar;
- p) Mesmo valor da taxa de infiltração de ar.

O modelo que representa o edifício real deve seguir as características descritas abaixo (BRASIL, 2022):

- a) Utilizar todas as características da edificação de acordo com o projeto proposto (por exemplo: transmitância térmica de paredes e coberturas; propriedades do vidro, PAF, PAZ, absorptância térmica de paredes e coberturas, dispositivos de sombreamento das aberturas, sistemas e suas respectivas características);
- b) No caso de o edifício real possuir diferentes sistemas de condicionamento de ar, todos os diferentes sistemas existentes de cada zona térmica devem ser representados;
- c) Considerar o coeficiente de eficiência energética do sistema de condicionamento de ar para refrigeração e aquecimento (CEER) do sistema de condicionamento de ar estabelecido em projeto;
- d) Utilizar a densidade de potência de iluminação do projeto proposto;
- e) O aproveitamento energético da iluminação natural pode ser contabilizado pelo método de simulação e, quando contabilizado, deve ser incluído somente no modelo do edifício real, de acordo com o item C.II;
- f) Considerar os dispositivos de sombreamento das aberturas quando os mesmos estiverem acoplados no edifício real;

g) O sombreamento proveniente do entorno pode fazer parte do método de simulação (uso opcional quando avaliado apenas o desempenho térmico – AOV, e obrigatório quando avaliada a iluminação natural); quando utilizados, devem ser incluídos em ambos os modelos, edifício real e de referência;

h) No caso do modelo do edifício real, possibilitar o uso do sistema de condicionamento de ar em somente alguns períodos do ano. A simulação poderá incluir a opção de abertura de janelas com ventilação natural, desde que seja comprovado o conforto térmico no período total em que o sistema de condicionamento de ar não foi utilizado nas horas de ocupação;

i) Adotar as características dos dados de entrada da ventilação natural de acordo com o projeto proposto.

Para a condição de referência, deve-se calcular somente a carga térmica de refrigeração anual total da edificação de referência (CgTR), adotando um sistema de carga ideal (“*ideal loads*”), no programa de simulação. Para calcular o consumo da edificação de referência, deve-se dividir a carga térmica de refrigeração e aquecimento anual total da edificação de referência (CgTR) por 2,6 W/W, que é o valor do coeficiente de eficiência energética do sistema de condicionamento de ar para refrigeração (CEER) definido para a edificação de referência (BRASIL, 2022).

Caso a edificação real possua aberturas zenitais, a condição de referência deve ser simulada com base na Figura 3. Quando o Percentual de Abertura Zenital - PAZ da edificação real estiver dentro do intervalo especificado na Figura 3, para o referido grupo climático e Fator Solar - FS, a condição de referência deve seguir a condição real. Se o PAZ da condição real extrapolar o limite proposto, deve-se adotar o percentual máximo para a condição de referência, bem como o FS máximo (BRASIL, 2022).

Classificação Climática	PAZ	FS
Zonas bioclimáticas 1 a 3	0 a 2%	0,87
Zonas bioclimáticas 4 a 8	0 a 2%	0,87
	2,1 a 3%	0,67

Figura 3 – Limites de PAZ e fator solar de vidros para coberturas na condição de referência.

Fonte: BRASIL (2022).

2.1.1.2 Procedimentos para a determinação da classificação de eficiência energética de Edificações comerciais, de serviços e públicas

A classificação de eficiência energética geral das edificações, e dos sistemas individuais, deve ser realizada por meio do seu percentual de redução do consumo estimado de energia primária (RedCEP), comparando-se a edificação real com a edificação em sua condição de referência, equivalente à classificação "D". A classificação pode ser obtida para todos os sistemas em conjunto, ou para as diferentes combinações entre os sistemas, ou somente para a envoltória da edificação. A classificação geral somente pode ser obtida por meio da avaliação de todos os sistemas parciais aplicáveis à edificação (BRASIL, 2022).

A seguir foram descritas apenas as classificações utilizadas no trabalho: classificação geral da edificação e classificação da envoltória.

2.1.1.2.1 Classificação da eficiência energética geral da edificação

A classificação de eficiência energética geral da edificação deve ser feita com base no percentual de redução do consumo de energia primária (RedCEP) da edificação real em comparação com a mesma edificação em sua condição de referência. O percentual de redução deve ser calculado com base na equação abaixo:

$$\text{RedCEP} = ((C_{EP,\text{refD}} - C_{EP,\text{real}}) / C_{EP,\text{refD}}) \cdot 100$$

Onde:

RedCEP é o percentual de redução do consumo de energia primária entre a edificação real e a condição de referência (%);

CEP,refD é o consumo de energia primária da edificação em sua condição de referência (kWh/ano);

CEP,real é o consumo de energia primária da edificação em sua condição real (kWh/ano).

O consumo de energia primária da edificação real (CEP,real) é definido pela soma de seu consumo estimado de energia elétrica (CEE,real) e térmica (CET,real), multiplicados pelos respectivos fatores de conversão (1,6 para energia elétrica e 1,1 para energia térmica), descontando-se a parcela de energia primária referente à geração local de energia renovável, quando existente. Já o consumo de energia primária da edificação em sua condição de referência (CEP,refD) é definido pelo consumo estimado de energia elétrica (CEE,refD) multiplicado pelo seu respectivo

fator de conversão. Na condição de referência não deve ser considerada a parcela de energia primária referente à geração local de energia renovável (BRASIL, 2022).

O consumo total de energia elétrica da edificação em sua condição real (CEE_{real}), e condição de referência (CEE_{ref}) é composto pela soma dos consumos de refrigeração e aquecimento (CR_{real} e ref), iluminação (CIL_{real} e $refD$), aquecimento de água em energia elétrica ($CAAE_{real}$ e ref) e consumo de equipamentos (CEQ), conforme descrito, enquanto o consumo total de energia térmica da edificação é exclusivo da condição real (CET_{real}) (BRASIL, 2022).

Para a definição da escala de eficiência energética, e classificação geral da edificação, devem ser determinados os intervalos entre uma classificação e outra, de “A” a “E”. Para isso, deve ser obtido o coeficiente de redução do consumo de energia primária da classificação “D” para A ($CRCEPD-A$). Este coeficiente baseia-se no fator de forma da edificação, juntamente com a classificação climática da cidade onde se encontra a edificação (BRASIL, 2022).

O coeficiente de redução do consumo de energia primária da classificação “D” para a classificação “A” ($CRCEPDA$) varia, ainda, de acordo com a tipologia da edificação descrita pelas Tabelas do Anexo A da INI-C. Os intervalos de classificação com base no percentual de redução do consumo de energia primária são definidos a partir de uma variável “i”, determinada por meio fórmula abaixo (BRASIL, 2022):

$$i = \frac{(CRCEPD_{D-A} \cdot 100)}{3}$$

Onde:

i é o valor calculado que representa o intervalo entre as classes, em %;

$CRCEPD-A$ é o coeficiente de redução do consumo de energia primária da classificação D para a A.

A escala de classificação de eficiência energética deve seguir os limites calculados conforme apresentado na Figura 4.

Classificação de Eficiência	Red _{CEP} (%)				
	A	B	C	D	E
	Red _{CEP} > 3i%	3i% ≥ Red _{CEP} > 2i%	2i% ≥ Red _{CEP} > i%	1% ≥ Red _{CEP} ≥ 0%	Red _{CEP} < 0%

Figura 4 – Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética geral da edificação.

Fonte: BRASIL (2022).

A classificação geral da edificação é determinada por meio da comparação entre o percentual de redução de energia primária da edificação real e os intervalos calculados, identificando assim a classificação de eficiência energética geral. Caso o valor de Red_{CEP} seja negativo, a classificação geral da edificação será E (BRASIL, 2022).

2.1.1.2.2 Classificação de eficiência energética da envoltória

A envoltória deve ser classificada de acordo com o percentual de redução da carga térmica total anual da edificação real em comparação com a mesma edificação em sua condição de referência (Red_{CgTT}). A escala relativa à classificação de eficiência energética da envoltória baseia-se no coeficiente de redução da carga térmica total anual da classificação “D” para a “A” (CRC_{CgTTD-A}), conforme a equação abaixo (BRASIL, 2022):

$$i = \frac{(\text{CRC}_{\text{CgTTD-A}} \cdot 100)}{3}$$

Onde:

i é o valor calculado que representa o intervalo entre as classes, em %;

CRC_{CgTTD-A} é o coeficiente de redução de carga térmica total anual da classificação “D” para a “A”.

O coeficiente de redução da carga térmica total anual da classificação “D” para a “A” deve ser determinado a partir do fator de forma da edificação (FF), e classificação climática no qual a edificação está inserida. O coeficiente de redução difere para cada tipologia, devendo ser obtido por meio das Tabelas 8.12 a 8.19 da INI-C. A partir do valor calculado de “i”, deve-se preencher a Figura 5. Na sequência, deve-se comparar o valor do percentual de redução da carga térmica total anual da edificação (Red_{CgTT}) com os limites definidos, identificando a classificação de eficiência energética da envoltória da edificação em questão. Caso a edificação real apresente Red_{CgTT} negativo, sua classificação final será “E” (BRASIL, 2022).

	RedCgTT (%)				
	A	B	C	D	E
Classificação de Eficiência	$\text{RedCgTT} > 3i$	$3i \geq \text{RedCgTT} > 2i$	$2i \geq \text{RedCgTT} > i$	$i \geq \text{RedCgTT} \geq 0$	$\text{RedCgTT} < 0$

Figura 5 - Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética da envoltória.

Fonte: BRASIL (2022).

2.2 Simulação Energética Computacional e BIM

As simulações oferecem a oportunidade da realização de testes em contextos em que muitas vezes não é seguro, razoável ou até mesmo possível de serem realizados na vida real (BECKER; PARKER, 2009). Todas as simulações acontecem através de simplificações da realidade e seus resultados estão diretamente ligados à precisão de especificações do modelo a ser simulado. Dependendo do objetivo da simulação o modelo poderá ser mais ou menos complexo (ROBINSON, 2008).

As simulações computacionais são importantes para diferentes alternativas de projeto, na avaliação do desempenho térmico e energético de edificações, sejam elas opções do desenho arquitetônico, componentes construtivos, sistemas de iluminação ou sistemas de condicionamento de ar. A simulação computacional, permite estimar o consumo, o custo de energia e até mesmo o impacto ambiental provocado pela alternativa de projeto antes mesmo de sua execução (MENDES *et al.*, 2005). Além disso, a simulação possibilita a identificação do efeito de fatores isoladamente, o que nem sempre é possível durante a análise de um caso real. A utilização de ferramentas computacionais pode ocorrer tanto na fase de projeto como durante a construção da edificação, fornecendo a vantagem e a possibilidade de testar soluções mais eficientes sem a necessidade de intervir na edificação. Desse modo, a facilidade de manipulação das variáveis envolvidas na edificação, o baixo custo e a redução do tempo de simulação contribuem ainda mais para uma maior utilização destes programas computacionais (LABEEE, 2022).

Na etapa de projeto ou ainda na fase inicial de construção, são tomadas as decisões mais eficazes relacionadas ao desenho sustentável de um edifício. As decisões feitas após estas etapas, quase sempre, levam ao ineficiente e dispendioso processo de retrabalho e alteração do projeto do edifício para conseguir um conjunto de critérios de desempenho (SCHLUETER; THESSELING, 2009).

A análise do consumo de energia dos edifícios é uma tarefa complexa, visto que as mudanças e condições meteorológicas, o comportamento dinâmico do edifício e a presença de múltiplas variáveis em seu funcionamento, requerem a ajuda de simuladores na etapa de projeto das edificações na busca do melhor desempenho no consumo de energia (SHOUBI *et al.*, 2015). Estes programas consideram as características do projeto de construção, tais como isolamento térmico, vidros, sombreamento, ganho solar, penetração solar, vedação de ar, ventilação natural, ventilação mecânica, sistemas HVAC, dinâmica de construção e massa térmica.

Normalmente, modelos geométricos em 3D contêm poucas informações, ao contrário dos modelos BIM que contêm grande quantidade de informação. Um modelo 3D inclui uma representação geométrica tridimensional do edifício, enquanto um modelo BIM é organizado como um protótipo da construção, com andares do edifício, espaços, paredes, portas, janelas, e uma grande variedade de informações, parâmetros e regras associados com cada um desses elementos. Conceitualmente o BIM é um conjunto de tecnologias, políticas e processos que juntos geram uma metodologia para gerenciar o projeto de construção por meio de dados em formato digital ao longo do ciclo de vida das construções (SUCCAR, 2009). Justamente essa capacidade de armazenar informações de diferentes áreas faz com que o BIM seja a tecnologia mais apropriada para ser utilizada como base para os mais diversos tipos de análises dentro de uma construção.

O BIM tem permitido que a Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) alcancem a interoperabilidade e integração de dados entre os diferentes componentes do sistema construtivo. Permite integrar as descrições de uma edificação, como sua forma tridimensional, estrutura, componentes, sistemas elétricos, de ar-condicionado, hidrossanitários e outros, em um formato aplicável para avaliar o rendimento energético do edifício (PINHA, 2017). Nesse processo de compartilhamento, as informações armazenadas nos modelos de projeto de construção são transferidas para ferramentas de eficiência energética da edificação, de modo que a simulação e análise do desempenho ocorram sem a necessidade de correção de erros oriundos do processo de compartilhamento das informações (GARCIA; ZHU, 2015). No entanto, dois fatores afetam a comunicação: a troca de dados entre o projeto e modelos de análise e a agregação dos resultados da simulação para alcançar a transparência no processo de avaliação do projeto. Como o modelo de informações

de construção muda continuamente durante o processo do ciclo de vida do edifício, a interoperabilidade deve ser facilitada através de intercâmbios de dados estruturados (SANGUINETTI *et al.*, 2009).

2.2.1 Interoperabilidade BIM-BEM

A interoperabilidade pode ser entendida como a capacidade de dois sistemas entenderem um ao outro e usarem a funcionalidade um do outro. A palavra “interoperar” implica que um sistema realize uma operação para outro sistema. Do ponto de vista da informática, é a capacidade de dois sistemas de computador heterogêneos funcionarem em conjunto e darem acesso aos seus recursos de forma recíproca (VERNADAT *et al.*, 2008).

Para Eastman *et al.* (2018), nenhum programa pode realizar sozinho todas as tarefas associadas ao projeto, necessitando de interoperabilidade de dados entre as aplicações para que diferentes processos possam ser realizados. Além da capacidade de suportar o *layout* da geometria, existem outras análises (estruturais, energéticas, custos, entre outros) que também necessitam suporte. Nesse sentido, a interoperabilidade permite a leitura de dados entre diferentes aplicações, eliminando a necessidade de replicar esses dados a cada processo.

O openBIM é uma iniciativa que atua justamente nesse contexto, procurando ampliar os benefícios do BIM ao facilitar a interoperabilidade dos arquivos através da criação e adoção de padrões internacionais abertos para a indústria AEC. O openBIM procura eliminar os problemas relacionados aos dados proprietários dos *softwares*, utilizando uma linguagem compartilhável e permitindo fluxos de trabalho através de formatos digitais como IFC, BCF, COBie, CitGML, gbXML, entre outros. A buildingSMART International é a organização que tem liderado e incentivado a utilização desses padrões internacionais abertos, com destaque para o uso do IFC (BUILDINGSMART, 2023).

No entanto, o BEM não está suficientemente integrado e sincronizado com o planejamento digital e o processo de design. Como resultado, estratégias energéticas não são implementadas no estágio inicial de projeto. Além disso, o BEM ainda não se beneficia do fluxo contínuo de informações na modelagem digital. Por exemplo, as

informações relacionadas ao BEM devem ser reinseridas manualmente nas ferramentas BEM, o que é considerado demorado, caro e trabalhoso, embora essas informações sejam já disponíveis em modelos de design digital BIM. Apesar dos esforços de pesquisa, a interoperabilidade total entre as ferramentas BIM e BEM ainda não foi completamente alcançada. Perdas de dados e informações, inconsistências nas transformações geométricas e diversas técnicas de modelagem de elementos construtivos ainda são barreiras comuns nos processos de troca de dados entre BIMs e BEMs (GAO *et al.*, 2019).

O BEM baseado em BIM usa o modelo BIM pré-projetado (incluindo as informações de projeto arquitetônico e cargas mecânicas, materiais propriedades e sistema HVAC) para criar a entrada para ferramentas BEM e oferece uma oportunidade de tornar o BEM uma ferramenta de economia de tempo, baixo custo e fácil de usar, processo mais prático, consistente e preciso. Designers podem utilizar a abordagem do BEM baseado em BIM para avaliar as opções de projetos e tomar decisões de projeto de forma eficiente durante o processo de projeto de construção, tornando o objetivo de construir com eficiência energética mais fácil de ser alcançado (GAO *et al.*, 2019).

Existem diversos formatos de arquivos que são utilizados para a transferência de informações do modelo BIM para o programa de análise energética, como o *hypertext markup language* (HTML), *extensible hypertext markup language* (XHTML), *building construction extensible markup language* (bcXML), *industry foundation classes extensible markup language* (IFCXML), *industry foundation classes* (IFC), e o *green building extensible markup language* (gbXML) (PORSANI *et al.*, 2021). Os dois tipos de arquivos BIM de padrão aberto mais utilizados nas simulações energéticas são o *Industry Foundation Classes* (IFC) e o *Green Building XML* (gbXML), implantados pela BuildingSmart e pelo Green Building Studio Inc., respectivamente. Existe uma discussão em andamento sobre qual o melhor formato para ser utilizado nas simulações energéticas. Enquanto o IFC reproduz um projeto de construção completo e, portanto, gera um esquema de dados complexo e arquivos de dados de tamanho maior, o gbXML fornece uma abordagem mais flexível e direta para análise de energia (ELAGIRY *et al.*, 2020). Ambos são capazes de transferir as propriedades do material, dados para sistemas HVAC e zonas térmicas, mas apenas o gbXML fornece dados de localização (KAMEL; MEMARI, 2019).

As ferramentas BEM podem ser compostas por dois componentes, incluindo um Interface Gráfica do Usuário (GUI) e um mecanismo de simulação. GUIs como OpenStudio, BEopt, DesignBuilder e eQuest facilitam o processo de modelagem, fornecendo interface gráfica para os usuários. No entanto, o segundo componente, que são os motores de simulação de energia, como EnergyPlus e DOE2, trabalham por trás dessas ferramentas. (KAMEL; MEMARI, 2019).

No caso dos dados de geometria, conforme o tamanho do edifício fica maior, sua estrutura fica mais complexa e a quantidade de dados aumenta exponencialmente. A extração dos dados de geometria é uma fase inicial do processo de simulação, por isso é um desafio para o executor da simulação reconhecer a ocorrência de erros durante o procedimento para aumentar a credibilidade do processo (CHOI *et al.*, 2019).

Outro aspecto interessante diz respeito à forma como são realizadas as simplificações das geometrias tridimensionais por partes dos programas BIM, já que os motores de simulação de energia utilizam modelos compostos por faces bidimensionais. Não existe consenso a respeito da melhor forma de realizar essa simplificação, mas dependendo do modelo, pode haver impacto nos resultados obtidos. Para OPENSTUDIO (2023), a melhor prática de modelagem é a utilização da face externa das paredes externas e o eixo das paredes internas, enquanto o EnergyPlus não estabelece uma regra, deixando a cargo do projetista tomar essa decisão (ENERGYPLUS ESSENTIALS, 2021). Já o DesignBuilder apresenta alternativas de configuração internas e externas para o modelador escolher (DESIGN BUILDER, 2023).

A interoperabilidade total entre BIM e ferramentas de simulação de energia ainda não foi totalmente alcançada e, nessa busca, a constante proposição de métodos e o estudo de ferramentas torna-se essencial para que essa interoperabilidade possa ser cada vez mais aprimorada. A Tabela 1 apresenta uma relação de estudos recentes realizados a respeito da interoperabilidade BIM-BEM, demonstrando os métodos utilizados, bem como os problemas encontrados.

Tabela 1 – Estudos recentes sobre interoperabilidade BIM-BEM.

Autores	Programa BIM	Programas BEM	Método utilizado	Modelo Analisado	Problemas encontrados nos arquivos
Gourlis and Kovacic, 2017	Revit 2014	EnergyPlus 8.1 / Openstudio / SketchUp plugin	Exportar / Importar (gbXML)	Duas edificações industriais (uma existente e uma a ser construída)	superfícies duplicadas, propriedades dos materiais não exportadas; erros nos limites das zonas térmicas, vão entre espaços e paredes,
Chen et al., (2018)	Revit 2015	Ecotec 2011 / eQuest / Design Builder / IES-VE 2015	Exportar / Importar / Ferramenta Energy Analysis (gbXML)	Duas edificações residências térreas: uma de forma oval e outra de forma retangular, totalizando 162 m².	Informações não-geométricas não foram transmitidas para o arquivo gbXML; necessidade de checagem da integridade da geometria da edificação para continuidade do processo; dependendo do programa BEM que está sendo utilizado, são lidas diferentes informações no mesmo arquivo gbXML;
Spiridigliozzi et al., 2019	Revit	IDA ICE / Simplebim add-on	Exportar / Importar / plugin Simplebim	sobrado residencial de 169,3m²	Formas complexas devem ser simplificadas antes da exportação;
Queiróz et al., 2019	Revit 2019	OpenStudio 2.7 / EnergyPlus 8.7 / SketchUp plugin / Insight (Revit)	Exportar / Importar / Ferramenta Insight do Revit (gbXML, IFC e IDF)	BESTEST Case 600 e o Projeto Casa Eficiente (UFSC)	Incapacidade de leitura do arquivo IFC pelo OpenStudio; erro na exportação das estruturas (portas, janelas, sombreamentos, etc.); diferenças dimensionais nas superfícies em função do método de cálculo; zonas térmicas adjacentes sem contato; paredes com vazios; aumento da complexidade da geometria gerou maior distorção nos resultados;
Elnabawi, 2020	Revit 2019	Design Builder v6 / IES-ve 2019 / Aragov Viewer	Exportar / Importar com plugins próprios (gbXML)	Apartamento residencial de 122 m², com 60 m² de área condicionada artificialmente	Erro na leitura da localização da edificação; volume das zonas térmicas até 10% maior; os materiais das janelas e portas não foram corretamente exportados; não reconheceu o sistema HVAC exportado;
Azevedo and Tavares, 2020	Revit 2018	OpensStudio 2.6.0 / SketchUp plugin	Exportar / Importar (gbXML)	Residência unifamiliar de interesse social, com 46,50m² e 3 zonas térmicas	Erro na exportação do contrapiso e fundações (reconhecidos como sombreamento); erro na exportação do material das portas; erro na exportação de paredes com diferentes tipos de montagem
Bracht et al., 2021	Revit / Archicad / OpenBuildings	Revit / Archicad / OpenBuildings	ferramenta de integração para uso do metamodelo de predição (gbXML)	Residência unifamiliar com 3 zonas térmicas	Áreas de fachadas maiores em média 6,34% (Revit); erro de leitura de portas e janelas (Archicad); erro de exportação na estrutura do piso exterior (OpenBuildings);
Porsani et al, 2021	Revit 2020 / Open BIM	Design Builder e OpenStudio (GBXML); Cypetherm HE (IFC)	Exportar / Importar (gbXML e IFC)	Sobrado residencial de 143,60m² e Galpão industrial com 9,677 m²	Diferenças dimensionais nas superfícies e zonas térmicas; vãos em algumas paredes; nem todos os sistemas construtivos foram exportados; faltaram janelas e portas;
Yang et al., 2022	Revit 2020	OpenStudio 3.2 / EnergyPlus 9.5 / Aragov Viewer	ferramenta de correção (algoritmo e plugin) - (gbXML)	Escola de três pavimentos e um prédio de escritórios de 13 pavimentos;	Ausência de janelas; erro na interpretação do tipo de construção; erro no reconhecimento de peles de vidro; falha ao reconhecer espaços semi-abertos;

Fonte: Autor (2023).

Com relação à metodologia utilizada nos estudos tabelados, a maior parte realizou a exportação dos arquivos energéticos (gbXML, IFC e/ou IDF) utilizando as ferramentas nativas do programa BIM ou utilizando *plug-ins* dos programas BEM, como observado em Gourlis e Kovacic (2017), Chen *et al.* (2018), Spiridigliozzi *et al.* (2019), Queiróz *et al.*, (2019), Elnabawi (2020), Azevedo e Tavares (2020) e Porsani *et al.*, (2021).

Spiridigliozzi *et al.* (2019), propõem uma metodologia de otimização da interoperabilidade BIM-BEM utilizando o add-on Simplebim do programa de simulação energética IDA-CE para a obtenção de arquivos IFC otimizados e com erros minimizados em relação à geometria da edificação. Para validação dos resultados foi realizada a simulação energética de uma edificação residencial de 169 m² criando dois cenários: simulação utilizando o arquivo IFC exportado do Revit e corrigido pelo Simplebim; simulação realizada diretamente no programa IDA-CE. Os resultados obtidos indicaram uma variação na demanda energética anual de 5% entre os modelos simulados, sendo considerado pelos autores como uma metodologia aplicável.

Bracht *et al.* (2021) desenvolveram uma ferramenta de integração para utilização em um metamodelo de predição. O algoritmo desenvolvido na linguagem Python é capaz de ler e analisar os parâmetros de entrada dos arquivos gbXML gerados pelos diferentes programas BIM, auxiliando na extração dos dados. Mesmo assim, foram relatados problemas de interoperabilidade entre os programas, sendo necessária a realização de ajustes manuais antes da exportação em alguns casos.

Yang *et al.* (2022) desenvolveram um fluxo de trabalho capaz de criar um modelo gbXML mais leve e com os limites mais estanques. No artigo foram identificados alguns típicos defeitos geométricos dos modelos BIM que acabam gerando arquivos gbXML defeituosos, como paredes curvas, superfícies de sombreamento sobre a cobertura, componentes desconectados, faces de sombreamento redundantes, entre outros, como pode ser observado na Figura 6.

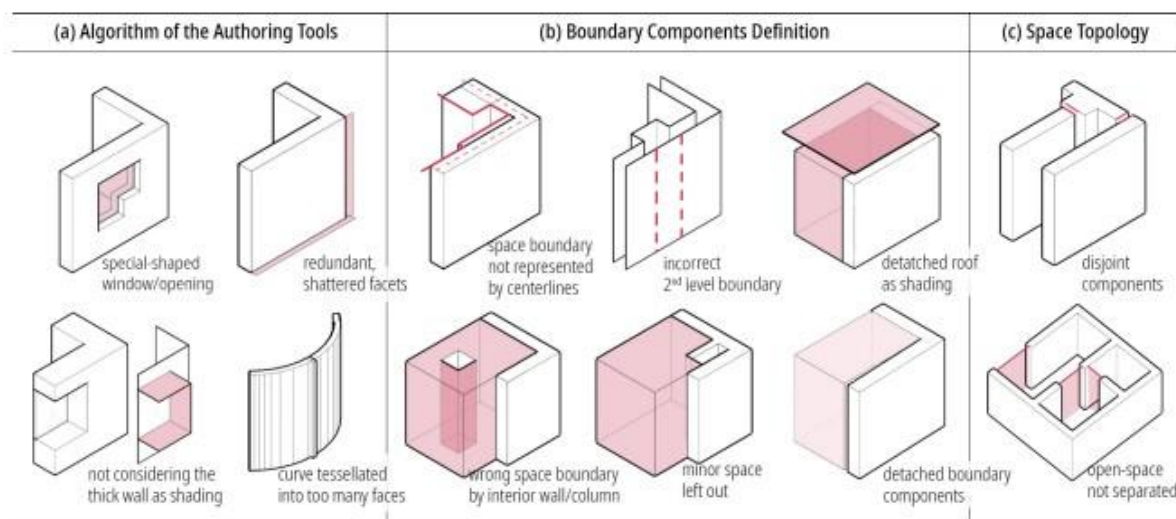


Figura 6 – Defeitos típicos das geometrias BIM.

Fonte: Yang *et al.* (2022).

Finalmente, através da inclusão de aberturas e sombreamentos, a geometria é serializada para o gbXML padrão. Todos os cálculos geométricos são dentro do plano 2D, com algoritmos de precisão de flutuação aplicados. Esta abordagem pode tolerar modelos defeituosos sem definição de espaço, elementos desconectados ou sobrepostos e garante que todos os espaços sejam herméticos. A partir desses algoritmos elaborados foi criado o plugin Gingerbread como uma interface de dados para os programas BIM, que é um projeto de código aberto. Quando testada em dois projetos de grande porte, a ferramenta foi capaz de exportar modelos mais leves e simples, que foram aceitos pelo EnergyPlus, enquanto os modelos gerados diretamente pelo Revit apresentaram erro.

2.2.2 ASHRAE Standard 140

Os programas modernos de simulação energética de edificações podem conter meio milhão de linhas de código. Portanto, é importante o desenvolvimento de métodos de testagem e diagnóstico para identificar possíveis erros e facilitar suas correções. A Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Resfriamento e Condicionamento de Ar – ASHRAE, desenvolveu um procedimento padrão de testagem das possíveis falhas e limitações dos programas BEM. Esse procedimento foi publicado pela primeira vez em 2001, sob o título de ASHRAE Standard 140, *Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer*

Programs e utiliza os casos teste desenvolvidos pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos Estados Unidos - NREL, em parceria com a Agência Internacional de Energia – IEA, denominados IEA BESTEST - *Building Energy Simulation Test* e publicados originalmente em 1995 (JUDKOFF; NEYMARK, 1995) (JUDKOFF; NEYMARK, 1998).

Existem 40 casos distintos no IEA BESTEST, que partem de baixa complexidade térmica até se aproximar de uma simulação realística, aumentando um parâmetro de cada vez. Os casos são definidos de forma que as propriedades térmicas, as proporções geométricas e as respostas térmicas sejam significativas em edifícios onde o envelope é o principal determinante. (JUDKOFF; NEYMARK, 1998).

Os testes estão divididos em duas categorias: “*Basic Tests*” e “*In-depth Tests*”. Para cada caso teste são fornecidos os resultados obtidos pelos programas considerados como estado da arte para simulações energéticas em edificações. Os resultados obtidos por esses programas formam um intervalo de confiança para a comparação com novos programas (YUAN; O’NEILL, 2008).

Os casos 600 e 610 presentes na ASHRAE *Standard* 140 (ASHRAE, 2017) representam edificações de baixa massa térmica e foram utilizados como base comparativa nas simulações de desempenho realizadas nesta pesquisa. Ambos os casos se localizam em Denver, EUA, e as simulações devem ser realizadas utilizando o arquivo climático DRYCOLD.TMY fornecido junto com a norma. O caso 600 apresenta planta retangular com 8 x 6 metros e pé-direito de 2,7 metros, totalizando uma área de 48 m² e um volume de 129,6 m³. Possui duas janelas com vidros duplos voltadas para o sul e utiliza estruturas leves de parede, piso e cobertura (Figura 7).

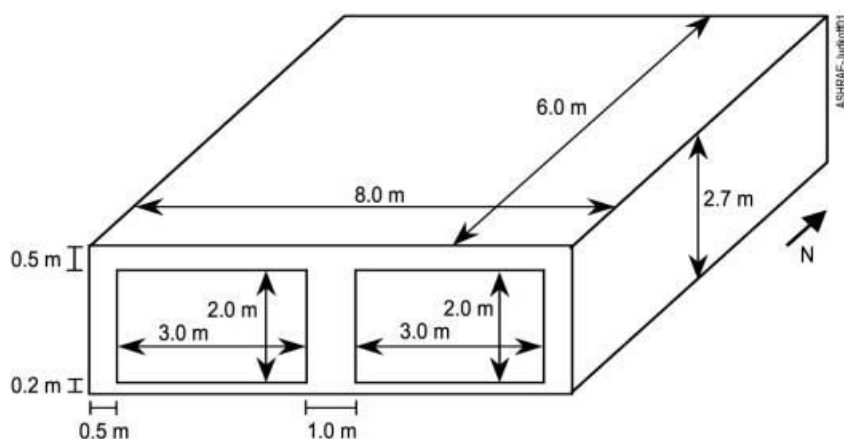


Figura 7 – Vista isométrica do Caso 600 destacando as janelas da fachada sul.

Fonte: ASHRAE (2017).

Entre as principais características do caso 600 estão: taxa de infiltração de 0,5 trocas por hora, 24 horas por dia, ao longo do ano; ganho interno constante de 200W ao longo do ano; temperatura do solo de 10°C; termostatos de controle de temperatura configurados para aquecimento quando as temperaturas forem menores do que 20°C e para resfriamento quando as temperaturas forem maiores do que 27°C.

O caso 610 é exatamente igual ao caso 600, com o acréscimo de um dispositivo de sombreamento de 1 metro de largura cobrindo toda a fachada sul, conforme Figura 8.

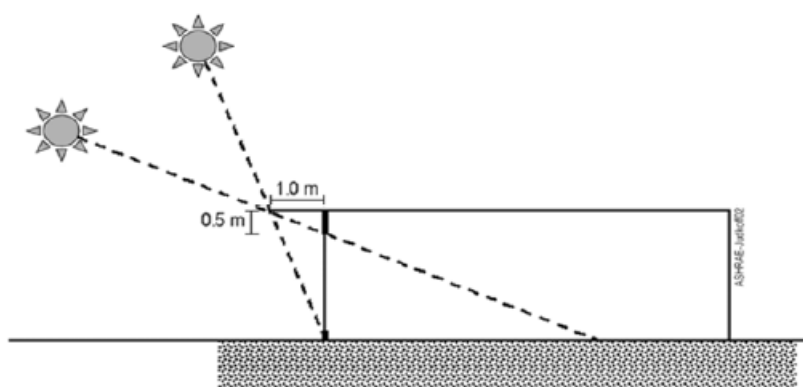


Figura 8 – Corte esquemático do caso 610 com destaque para o brise na fachada sul (ASHRAE, 2017).

2.2.3 ASHRAE Research Project 1810

Em 2019 a gbXML.org, uma organização sem fins lucrativos com a finalidade de desenvolver e promover o gbXML *schema* e financiada por organizações como o Departamento de Energia dos Estados Unidos, o NREL, a Autodesk, a ASHRAE, entre outros, desenvolveu o projeto de pesquisa 1810, denominado “*Development of Reference Building Information Model (BIM) Test Cases for Improving Usage of Software Interoperability Schemas*” (GBXML.ORG, 2023). Essa pesquisa foi financiada pela ASHRAE e deu sequência ao projeto de pesquisa anterior RP 1468 - *Automating Building Thermal Model Creation: Interoperability from BIM to Energy Simulation Software*. O *Research Project* 1810 teve como objetivo aprimorar a interoperabilidade entre os programas BIM e os programas de análise energética, buscando atingir um fluxo de trabalho BIM-BEM sem a necessidade de intervenções para correção de erros (XU, 2021).

A equipe do projeto procurou desenvolver um processo de validação que minimizasse os problemas encontrados na comunicação entre os *softwares* de construção e de avaliação energética. O projeto foi dividido em três fases: na primeira etapa foram realizadas entrevistas com profissionais que trabalhavam com BIM e/ou BEM; na segunda etapa foram desenvolvidos 19 casos teste baseados nos problemas relatados pelos entrevistados na primeira etapa; na terceira fase foi desenvolvida uma plataforma online para o processo de validação dos casos da etapa anterior (GBXML.ORG, 2023). No início de 2021 foi apresentado o relatório final da pesquisa, onde foram desenvolvidos 19 casos teste que englobam diversos erros geométricos que abrangem paredes, telhados, espessura de forros, janelas, formas dos edifícios, propriedades térmicas do envelope e sistemas HVAC. Cada caso documenta um possível problema na leitura do arquivo gbXML e demonstra o resultado ideal esperado (XU, 2021). Os 19 casos teste elaborados pelo projeto foram utilizados como referência para as simulações geométricas desta pesquisa, sendo eles:

1. Paredes externas de múltiplas camadas;
2. Separação virtual de espaços;
3. Meia parede;
4. Forro de alturas diferentes;
5. Piso elevado e forro rebaixado;
6. Informações do envelope;

7. Ambiente dentro de outro ambiente;
8. Piso e forro adjacentes;
9. Janela interna;
10. Átrio;
11. Mansarda;
12. Ambiente côncavo;
13. Sacada;
14. Beiral;
15. Pele de vidro;
16. Shaft / Poço de iluminação;
17. Parede curva;
18. Moldura da janela;
19. Sistema HVAC e agenda;

2.2.4 Ferramenta *Systems Analysis*

A ferramenta “*Systems Analysis*” fornece uma maneira rápida, simples e flexível para um engenheiro mecânico definir todos os componentes principais e um conjunto de relacionamentos que compõem um sistema HVAC mecânico, sem precisar modelar fisicamente nenhuma parte dele. Ela permite a criação e simulação de equipamentos por zona, sistemas de ar e ciclos de água, mesmo quando a edificação ainda está nas fases iniciais do projeto, permitindo diferentes níveis de detalhamento (AUTODESK REVIT, 2023).

Segundo a Autodesk Building Solutions (2019) a principal característica da ferramenta é permitir a interoperabilidade BIM-BEM dentro do próprio programa Revit, criando mais uma camada de documentação interna e permitindo sua constante edição e atualização. Outra característica importante é a capacidade de se trabalhar em diferentes níveis de detalhamento do projeto, podendo simular desde massas conceituais até modelos extremamente detalhados, como exemplificado na Figura 9.

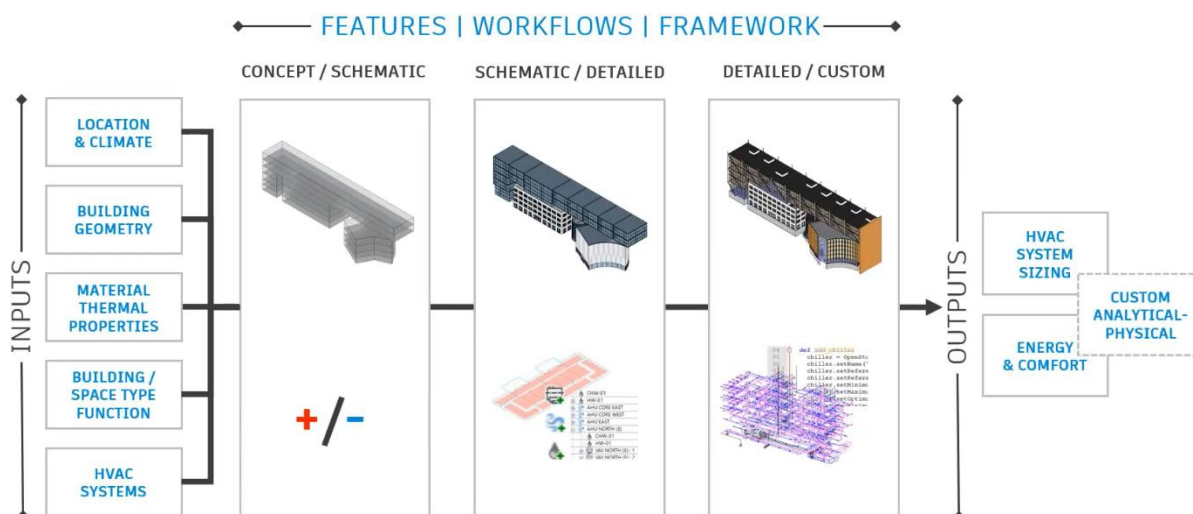


Figura 9- Simulação energética em diferentes estágios de projeto.

Fonte: Autodesk Building Solutions (2019).

A ferramenta “*Systems Analysis*” foi concebida através de uma integração entre os programas Revit e o EnergyPlus. Para que isso fosse possível, duas etapas intermediárias foram necessárias, a transformação da geometria em uma linguagem gbXML e sua leitura pelo programa OpenStudio, que também é o responsável pelas “*measures*” que comandam a simulação dentro do EnergyPlus (AUTODESK BUILDING SOLUTIONS, 2021).

Toda essa troca de informações entre os programas acontece em segundo plano (*background*), com a disponibilização dos resultados através de relatórios dentro do próprio Revit e de arquivos HTML (Figura 10). Por ser uma ferramenta incorporada ao programa há pouco tempo, as opções de edição são limitadas. No momento existem apenas dois fluxos de trabalho disponíveis: “*Annual Building Energy Simulation*” e “*HVAC Systems Loads and Sizing*”. No entanto, através do conhecimento de programação no OpenStudio, existe a possibilidade de inserção de novos parâmetros, medidas e fluxos de trabalho, que podem ser salvos em arquivos modelo para uso futuro.

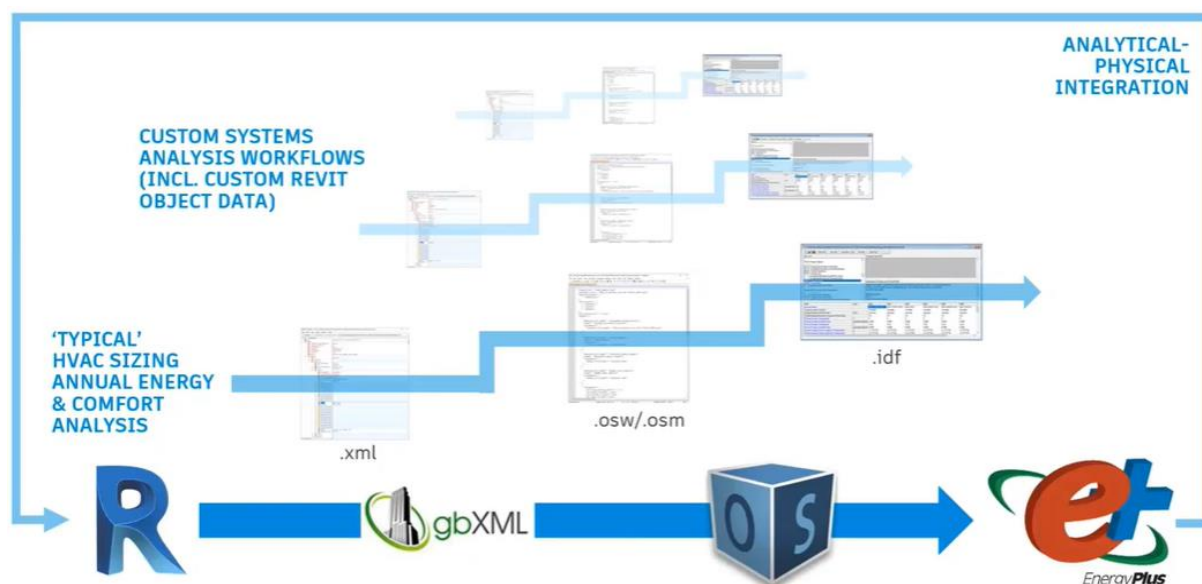


Figura 10- Fluxograma de funcionamento da ferramenta "Systems Analysis".

Fonte: Autodesk Building Solutions (2019).

Para o correto funcionamento da ferramenta, uma importante etapa do processo é a transformação das informações do modelo BIM em dados que podem ser lidos pelo software BEM. No Revit, isso acontece quando é gerado o modelo analítico da edificação. A geometria do modelo analítico é produzida através da intersecção dos limites dos espaços / ambientes com uma malha tridimensional chamada "voxel". O tamanho da trama dessa malha é um ponto crítico para criar um modelo otimizado com balanço entre precisão e o tempo de processamento. O modelo analítico é composto por espaços analíticos e superfícies analíticas. Todas as estruturas analíticas do modelo possuem informações associadas que só podem ser atualizadas se um novo modelo analítico for gerado (AUTODESK REVIT, 2023).

Os espaços analíticos são gerados a partir dos espaços criados pelo projetista no modelo arquitetônico e são nesses volumes que ocorrem as trocas de energia. No entanto, os espaços analíticos reportam diferentes áreas e volumes em relação ao espaço original, pois as medidas analíticas são calculadas a partir das linhas centrais das paredes, e do limite superior dos pisos e telhados, enquanto os espaços arquitetônicos são calculados nas faces internas dos ambientes. Além disso, o método de resolução utilizado pelo "voxel" acaba gerando superfícies analíticas ligeiramente menores do que as do modelo original. As superfícies analíticas são geradas a partir de componentes da edificação como paredes, pisos, forros, entre outros. As

superfícies são categorizadas conforme sua função e localização e podem ter suas propriedades térmicas tanto utilizando informações inseridas manualmente como utilizando configurações padrão disponíveis no programa (AUTODESK REVIT, 2023).

Por último, existem os sistemas analíticos, que são utilizados para acrescentar sistemas HVAC ao modelo, permitindo a criação de sistemas de controle de ar, de ciclos de água e de equipamentos de condicionamento de ar que podem ser distribuídos em diferentes zonas do projeto.

Para a definição dos arquivos climáticos que serão utilizados, a Autodesk utiliza os arquivos de um banco de dados conforme esquematizado na Figura 11. Esse banco de dados é o mesmo utilizado pelo programa Green Building Studio e é considerado um canal de distribuição que agrega e entrega arquivos climáticos de diferentes fontes, utilizando diferentes metodologias. Nele estão incluídas mais 1,6 milhões de estações climáticas virtuais, baseadas em previsões numéricas meteorológicas. Essas estações são criadas para trazer mais precisão nas simulações em locais onde não existem estações físicas. Também estão incluídas cerca de 1.800 estações físicas com arquivos climáticos TMY2, normalmente localizadas em aeroportos (AUTODESK, 2022). Para utilização de um arquivo climático específico dentro do Revit é necessário programar essa medida no OpenStudio e introduzi-la como um parâmetro compartilhado.

Location & Climate Data

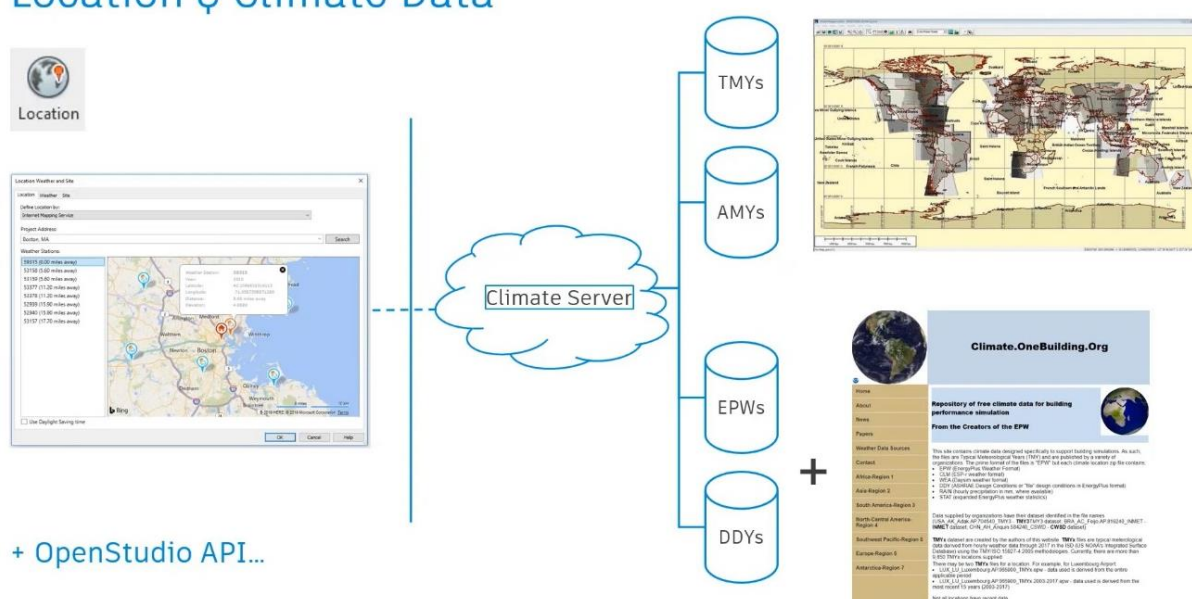


Figura 11 – Localização e Arquivos climáticos.

Fonte: Autodesk Building Solutions (2021).

Por se tratar de uma ferramenta relativamente nova, não foram encontradas muitas referências na literatura pesquisada. Coelho (2020) cita a utilização da ferramenta “*Systems Analysis*” como instrumento de criação de modelos de energia a partir do Revit. Ela foi utilizada em um estudo comparativo juntamente com outras duas ferramentas: Insight (também do Revit), e OpenStudio. No estudo foi utilizado como modelo uma edificação retangular de 10 pavimentos com 800 m² de área por nível (20m x 40m), sendo simuladas com os arquivos climáticos de Curitiba, Brasília e Vitória. Nas simulações realizadas diretamente no Revit, pelo “*Systems Analysis*”, foi observado um consumo total de energia, em média, 34% inferior em relação às simulações realizadas diretamente no OpenStudio. Apesar dessas simulações utilizarem-se do mesmo motor de cálculo, no estudo não foram investigados os motivos dessa discrepância nos resultados.

Barone *et al.* (2021) também utilizaram a ferramenta em seu estudo sobre o terminal de passageiros de Molo Beverello, no porto de Nápoles, na Itália. O trabalho utilizou a ferramenta como instrumento de tomada de decisão na fase de projeto da edificação. Foram simulados diferentes tipos de HVAC, a substituição da pele de vidro por vidros fotovoltaicos e a substituição do sistema de brises por estruturas fotovoltaicas. Todos os testes foram elaborados diretamente no programa OpenStudio a partir do arquivo OSM gerado pelo *Systems Analysis*. Os autores consideraram que o fluxo de trabalho implementado foi bastante apropriado, principalmente para a tomada de decisões em estágios iniciais de projeto e em casos de *retrofit* de edificações. No entanto, mesmo tendo realizado a simplificação geométrica do modelo para a simulação, ocorreram erros na exportação, sendo sua correção bastante trabalhosa e cansativa. Cabe ressaltar que também não foram realizados testes comparativos e avaliativos da ferramenta.

2.3 Considerações

O desenvolvimento da Instrução Normativa do Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas - INI-C, através do método simplificado, foi um avanço importante para o Brasil, garantindo maior eficiência na avaliação de edificações e contribuindo para a construção de

estruturas mais eficientes energeticamente. No entanto, a dificuldade e o tempo dispendidos no processo etiquetagem ainda é um fator limitante para a disseminação do procedimento no país. Com a crescente disseminação e obrigatoriedade do uso de programas BIM, a simulação energética através do BIM se apresenta como uma alternativa interessante de se otimizar o processo de avaliação das edificações, mantendo a precisão dos resultados. No entanto, apesar dos esforços existentes na tentativa de melhorar a interoperabilidade de arquivos BIM-BEM, ainda existem muitos problemas para serem superados, como foi possível se observar na Tabela 1.

Nesse contexto, com o objetivo de encontrar soluções para esses problemas recorrentes, o *software* Autodesk Revit incorporou ao programa a partir da versão 2020.1 a ferramenta “*Systems Analysis*”, capaz de realizar simulações energéticas diretamente a partir do modelo BIM. Mesmo se utilizando de outros programas no *background* (OpenStudio e EnergyPlus), essa ferramenta é capaz gerar arquivos gbXML e IDF, criando relatórios diretamente no ambiente do Revit e permitindo que o projetista obtenha resultados sem precisar manipular outros programas.

Conforme mencionado anteriormente, a ferramenta “*Systems Analysis*” é recente e foram encontrados apenas dois estudos mencionando sua aplicação. Além de escassos, os estudos encontrados não apresentaram profundidade na análise dos resultados apresentados pela ferramenta, deixando em aberto diversas questões que foram abordadas neste trabalho.

3 METODOLOGIA

Para a elaboração deste trabalho foi utilizado o método de pesquisa experimental, que segundo Gil (2007) consiste em determinar um objeto de estudo, e, a partir dele, identificar as variáveis capazes de impactá-lo, observando como elas se comportam quando manipuladas. Segundo Fonseca (2002), o propósito da pesquisa experimental é entender as relações de causa e efeito conforme são realizadas variações aplicadas ao objeto estudado. Este trabalho foi dividido em quatro grandes etapas: (i) etapa de revisão; (ii) etapa de delineamento; (iii) etapa de desenvolvimento e análise; (iv) etapa de contribuições e conclusões. A Figura 12 representa esquematicamente o método de pesquisa utilizado.

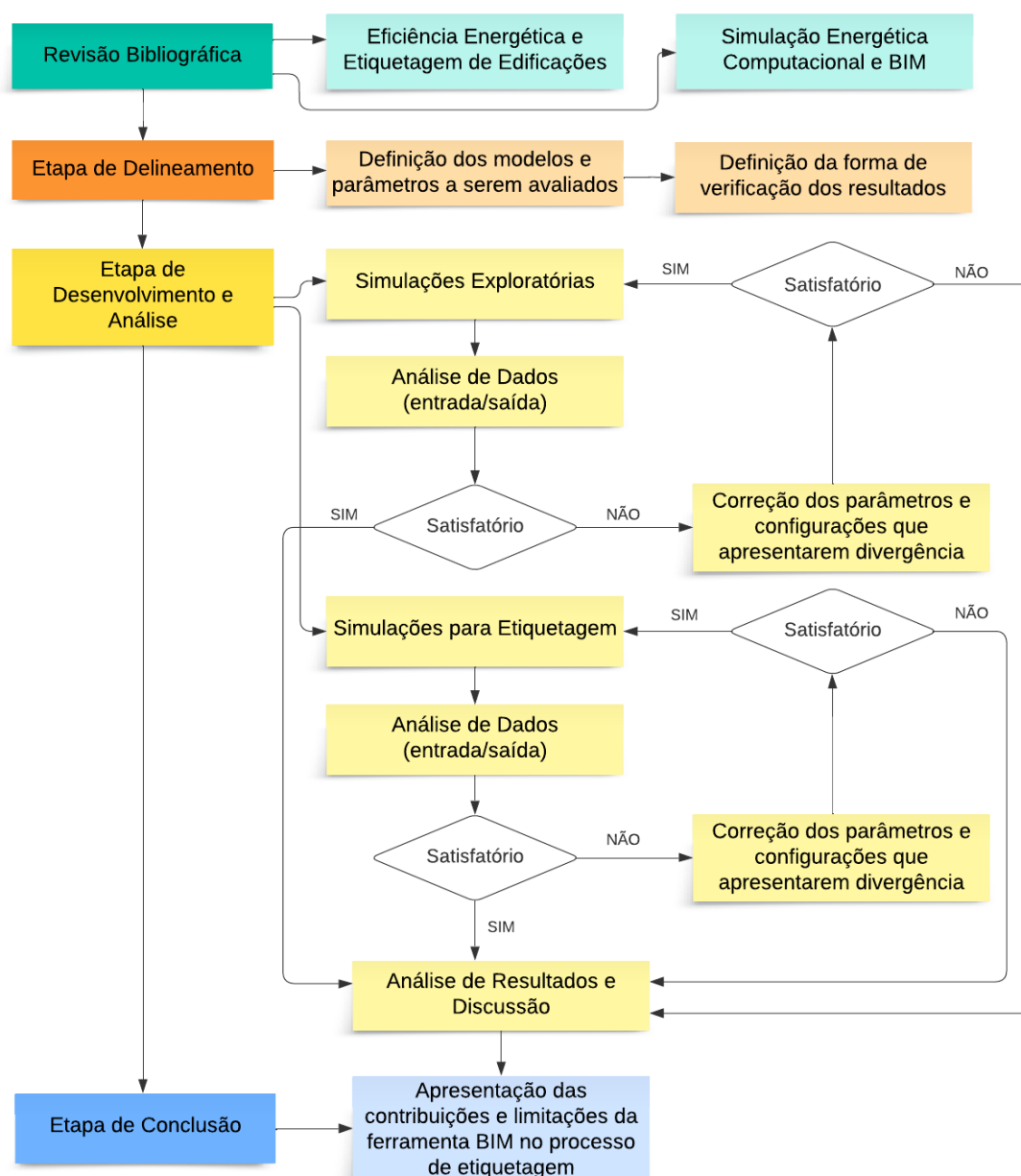


Figura 12 - Fluxograma das etapas de pesquisa.

Fonte: Autor (2023).

3.1 Etapa de Revisão

Na primeira etapa foi realizada a revisão bibliográfica envolvendo a nova metodologia da INI-C. Foram descritos os métodos de avaliação e apresentados os resultados de trabalhos acadêmicos que avaliaram a aplicação do novo regramento. Também foram estudados os aspectos da simulação computacional aplicada à análise

energética de edificações, bem como trabalhos envolvendo as questões de interoperabilidade BIM-BEM. A partir dessa revisão foi definida a ferramenta de simulação que seria utilizada na pesquisa.

3.2 Etapa de Delineamento

Nesta etapa foram definidos e caracterizados os elementos a serem utilizados que melhor poderiam responder ao problema de pesquisa levantado. A etapa foi dividida em duas fases: definição dos modelos a serem simulados e definição da forma de verificação dos resultados.

3.2.1 Definição dos modelos a serem testados

O primeiro passo para o desenvolvimento da modelagem foi a definição dos modelos que serviriam de base comparativa para as simulações. Conforme mencionado anteriormente, os principais problemas de interoperabilidade BIM-BEM estão relacionados à geometria dos modelos. Assim, optou-se por dividir a fase de simulações em dois cenários: simulações exploratórias e simulações para etiquetagem.

3.2.1.1 Simulações exploratórias

As simulações exploratórias foram subdivididas em dois tipos: de desempenho e geométricas. Para as simulações de desempenho foram utilizados os casos 600 e 610 extraídos da *ASHRAE Standard 140*, conforme descrito na revisão bibliográfica. A escolha se deu principalmente pelo fato de os casos apresentarem parâmetros específicos para modelagem e possuírem resultados validados disponíveis para consulta, além de serem modelos de baixa complexidade geométrica.

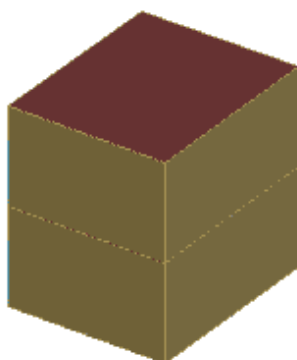
Para as simulações geométricas, foram considerados os casos desenvolvidos no *ASHRAE Research Project 1810* como referência para as análises. De todos os casos apresentados no projeto, apenas o caso número 19, que não se refere à

parâmetros geométricos de modelagem, foi desconsiderado. Dessa forma, foram realizados 18 testes geométricos.

3.2.1.2 Simulações para etiquetagem

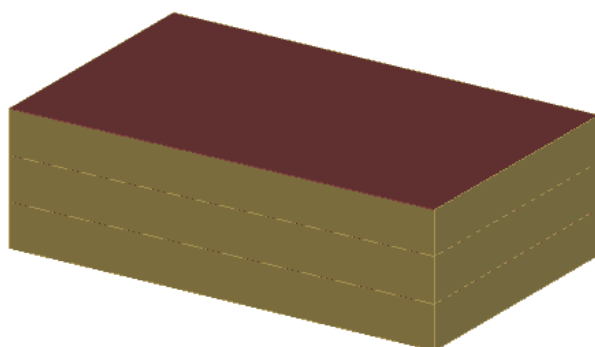
Após a realização das simulações exploratórias foi realizada a etiquetagem de quatro edificações seguindo o método de simulação termoenergética indicado na INI-C. Para os três primeiros testes foram utilizadas as tipologias de Pequenas Edificações, Grandes Edificações e Edificações Verticais desenvolvidas por Melo (2012a), ilustradas na Figura 13. As três edificações foram classificadas como escritórios e sua avaliação foi feita apenas em relação à envoltória da edificação, obtendo-se uma etiqueta parcial a partir da redução de carga térmica entre a edificação de referência e a edificação real.

a) Pequenas Edificações;



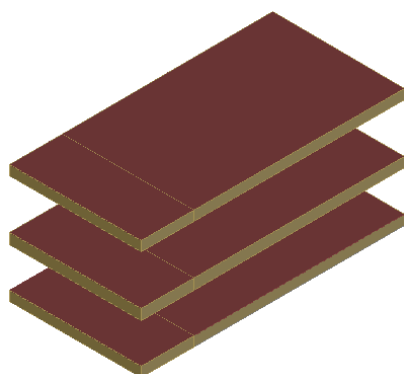
Dimensões: 5 x 6 metros
Altura do pavimento: 3 metros
Nº de pavimentos: 2

b) Grandes Edificações;



Dimensões: 5 x 6 metros
Altura do pavimento: 3 metros
Nº de pavimentos: 2

c) Edificações Verticais;



Dimensões: 40 x 80 metros

Altura do pavimento: 3 metros

Nº de pavimentos: 12

Figura 13 – Tipologias utilizadas como base para as simulações para etiquetagem: a) Pequenas Edificações; b) Grandes Edificações; c) Edificações Verticais.

Fonte: Adaptado de Melo (2012a).

Por se tratar de modelos com volumetria simplificada, foram introduzidas alterações geométricas comumente utilizadas em prédios comerciais e institucionais, com potencial de impactar na precisão do modelo energético gerado, conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Alterações geométricas adicionadas conforme a tipologia.

Tipologias	Alterações Geométricas
Pequenas Edificações	Sem alterações.
Grandes Edificações	Separações virtuais de zona térmica, forro rebaixado e piso elevado.
Edificações Verticais	Pé-direito duplo, poço de iluminação e pele de vidro.

Fonte: Autor (2023).

Por último, foi realizada a etiquetagem geral do Anexo que será construído na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (Anexo FAUrb), da Universidade Federal de Pelotas (Figura 14). O Anexo FAUrb é uma edificação institucional de tipologia educacional, projetada para ser energeticamente eficiente e que apresenta características arquitetônicas de certa complexidade, como área externa sobre pilotis, brises verticais, brises horizontais e claraboia. O projeto foi desenvolvido por servidores e discentes da universidade e, portanto, o acesso às características e propriedades construtivas da edificação foi facilitado.



Figura 14- Representação digital do Anexo FAUrb.

Fonte: Adaptado de Muta (2022).

Para a modelagem da envoltória da edificação foram consideradas as características construtivas especificadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características construtivas do Anexo FAUrb.

Estrutura	Componentes	Parâmetro	Valor
Parede Externa	Argamassa externa (2,5 cm) + bloco cerâmico 9x14x19 cm à cutelo (9 cm) + lã de rocha (3 cm) + bloco cerâmico 9x14x19 cm à cutelo (9 cm) + argamassa interna (2,5 cm)	U _{par} – transmitância da parede externa	0,75 W/m ² .K
		α _{par} – absorptância da parede externa	0,30
		CT _{par} – capacidade térmica da parede externa	224,25 kJ/m ² .K
Cobertura (telhado)	Telha metálica + câmara de ar > 5 cm + lã de rocha (5 cm) + laje de concreto armado (10 cm)	U _{cob} – transmitância da cobertura	0,63 W/m ² .K
		α _{cob} – absorptância da cobertura	0,20
		CT _{cob} – capacidade térmica da cobertura	233,88 kJ/m ² .K
Cobertura (laje impermeabilizada)	Laje de concreto armado (10 cm)	U _{laje} – transmitância da laje de cobertura	3,74 W/m ² .K
		α _{laje} – absorptância da laje de cobertura	0,20

Janelas	Vidro duplo incolor	CTlaje – capacidade térmica da laje de cobertura	224 kJ/m ² .K
		FS – fator solar do vidro	0,68
		Uvid – transmitância do vidro	2,84 W/m ² .K

Fonte: Autor (2023).

3.2.2 Definição da forma de verificação dos resultados

Como forma de verificar e comparar os resultados obtidos no Revit optou-se por utilizar o programa EnergyPlus (versão 9.1) com a modelagem geométrica feita no SketchUp 2020 através de um *plug-in* do programa, o Euclid (versão 0.9.4). Assim, utilizando os mesmos programas da ferramenta *Systems Analysis*, mas com procedimentos de modelagem diferentes, foi possível a análise dos resultados através da manipulação de variáveis e a detecção de erros durante a simulação.

Por não se tratar de um programa específico de simulação energética, o Revit disponibiliza campos restritos para alteração das variáveis energéticas. Portanto, para a ferramenta *Systems Analysis* ser capaz de realizar a simulação através do EnergyPlus, são necessárias algumas pré-configurações arbitradas pelo programa. Dessa forma, foram realizados dois tipos de verificação: comparação dos dados de entrada e saída; comparação dos resultados baseado no consumo anual da edificação.

Na verificação de dados foram comparados os dados de entrada (Revit) e os dados de saída (EnergyPlus), para verificar se os dados informados chegam corretamente ao *software* de simulação. Quando houve necessidade, as inconsistências foram identificadas e corrigidas para que fosse realizada nova simulação.

Após essa verificação foram comparados os resultados propriamente ditos. Nessa análise foram verificadas se as pré-configurações utilizadas pelo Revit, bem como se os fatores de difícil correção apresentam relevância na análise energética da edificação.

Por fim, na etapa de etiquetagem dos modelos, foram comparados os valores de carga térmica e consumo primário, bem como as etiquetas geradas pelo modelo criado no Revit e os modelos de controle criados no Sketchup e simulados no EnergyPlus.

3.3 Etapa de Desenvolvimento e Análise

A terceira etapa proposta englobou a parte prática da pesquisa, onde foram desenvolvidas todas as modelagens e realizadas todas as simulações dos modelos escolhidos. A etapa foi dividida em três sub-etapas: simulações exploratórias de desempenho, onde foram testados os casos 600 e 610 da ASHRAE (2017); simulações exploratórias geométricas, onde foram testados 18 casos de XU (2021); e as simulações para etiquetagem, onde foram testadas as tipologias Pequenas Edificações, Grandes Edificações, Edificações Verticais (MELO, 2012^a) e o Anexo FAUrb.

Para cada modelo testado, após a realização das simulações foi realizada a conferência dos dados de entrada (BIM) e saída (BEM), buscando evitar erros e distorções ao longo das exportações. Sempre que possível os erros identificados foram corrigidos e novas simulações foram realizadas para verificação e comparação dos resultados.

3.4 Etapa de Conclusão

Nessa etapa foi realizado o fechamento do trabalho, com a síntese das atividades desenvolvidas ao longo da pesquisa, destacando os principais resultados alcançados. Foram expostas as contribuições e conclusões identificadas pelo autor, de acordo com os objetivos da pesquisa, bem como apontadas as limitações encontradas durante seu desenvolvimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Simulações exploratórias de desempenho

4.1.1 Caso 600

Para a elaboração dos modelos foram seguidas todas as orientações existentes na *ASHRAE Standard 140* (ASHRAE, 2017) para o Caso 600. Antes de iniciar a modelagem foi definida a cidade de Denver, EUA, como localização da edificação. O Revit apresenta algumas possibilidades de estações climáticas para serem escolhidas conforme a localidade. Estações climáticas com referências começando com 59### são *Typical Meteorological Years* (TMY's) e todas as outras estações climáticas são obtidas a partir do Autodesk Climate Server, que fornece dados para todo o mundo em um raio de 14 km (8,8 milhas) para os anos 2004 e 2006 (AUTODESK REVIT, 2023). As estações climáticas disponíveis são exibidas no mapa (em azul claro) e na lista do menu à esquerda (Figura 15). Após alguns testes, constatou-se que a estação climática que continha os mesmos dados climáticos utilizados pela norma para a simulação fica em uma área afastada do centro da cidade. Na Figura 15 ela está circulada em vermelho.

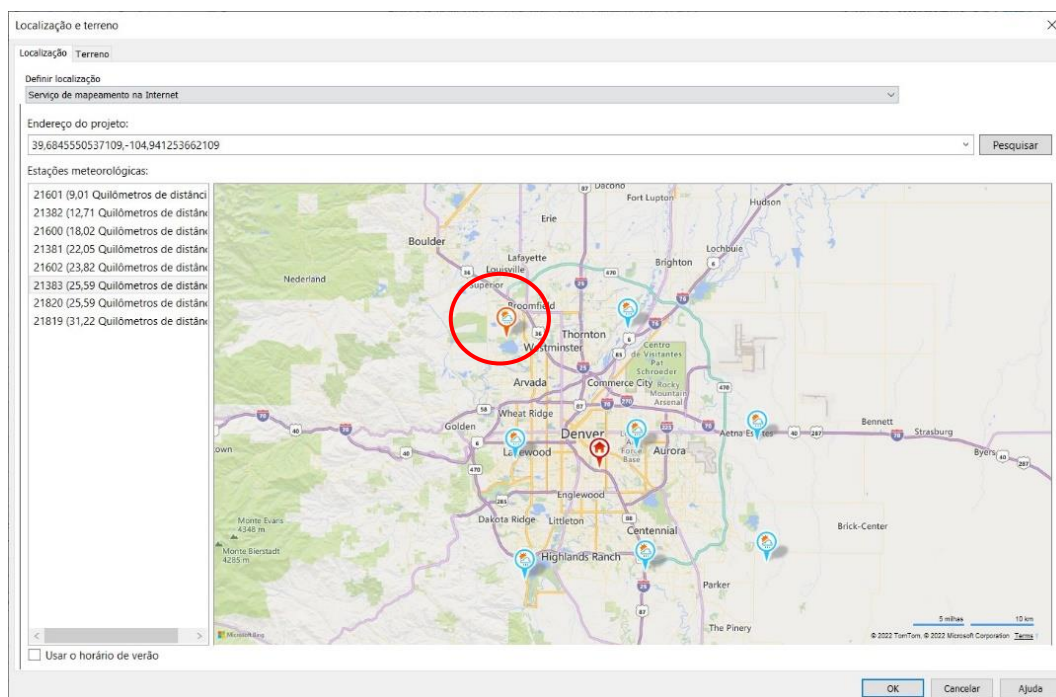


Figura 15 - Janela de definição da localização do modelo a ser simulado.

Fonte: Autor (2023).

A construção modelada tem formato retangular com as dimensões de 6 m de largura por 8 m de profundidade e 2,7 m de altura, sem divisões internas e com duas janelas voltadas para o sul dispostas na maior face da geometria (Figura 16). A modelagem foi executada respeitando o volume do ambiente de 129,60 m³ a partir de suas medidas internas, conforme orientado na ASHRAE (2017).

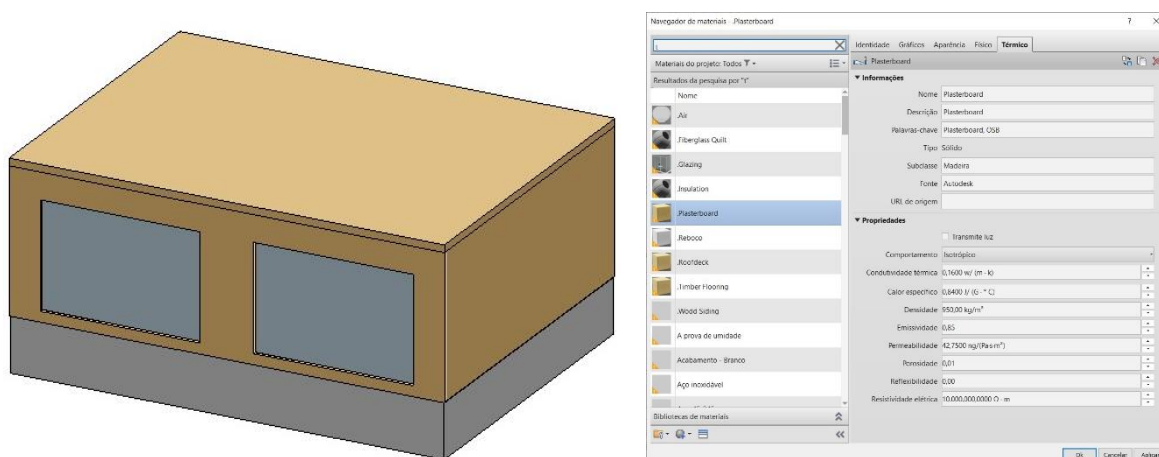


Figura 16 - Modelagem geométrica do Caso 600 dentro do Revit (à esquerda); – Exemplo de adequação das características dos materiais (à direita).

Fonte: Autor (2023).

O edifício apresenta estrutura leve, com baixa massa térmica. As janelas possuem 3 m de largura por 2 m de altura, sendo constituídas por dois painéis de vidro liso e uma camada de ar central de 13 mm.

ASHRAE *Standard* 140 orienta ainda a inclusão de coeficientes de resistência superficial interna e externa para as diferentes estruturas (pisos, paredes, coberturas e janelas). No entanto, para os programas que já possuem esses coeficientes incorporados no cálculo térmico, esses coeficientes devem ser ignorados. As Tabelas 4, 5 e 6 demonstram as características térmicas dos materiais de acordo com a norma e todas as demais características que não são especificadas para o caso 600 foram mantidas conforme são apresentadas originalmente no programa Revit.

Tabela 4 - Características térmicas da Parede Externa

Material	Condutividade térmica [W/m.K]	Espessura [m]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/kg.K]	Resistência [m ² K/W]
<i>Plasterboard</i>	0,16	0,012	950	840	0,075
<i>Fiberglass Quilt</i>	0,04	0,066	12	840	1,650
<i>Wood Siding</i>	0,14	0,009	530	900	0,064

Fonte: Autor (2023).

Tabela 5 - Características térmicas da Cobertura

Material	Condutividade térmica [W/m.K]	Espessura [m]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/kg.K]	Resistência [m ² K/W]
<i>Plasterboard</i>	0,16	0,010	950	840	0,063
<i>Fiberglass Quilt</i>	0,04	0,1118	12	840	2,794
<i>Roof Deck</i>	0,14	0,019	530	900	0,136

Fonte: Autor (2023).

Tabela 6 - Características térmicas do Piso

Material	Condutividade térmica [W/m.K]	Espessura [m]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/kg.K]	Resistência [m ² K/W]
<i>Timber Flooring</i>	0,14	0,025	650	1200	0,179
<i>Insulation</i>	0,04	1,003	-	-	25,374

Fonte: Autor (2023).

Para a inclusão das características do ambiente interno da edificação, como ocupação, uso, equipamentos e iluminação foi criado um espaço denominado Zona 1. Quando o espaço criado é selecionado, os parâmetros de análise de energia podem ser modificados, como pode ser observado na Figura 17.

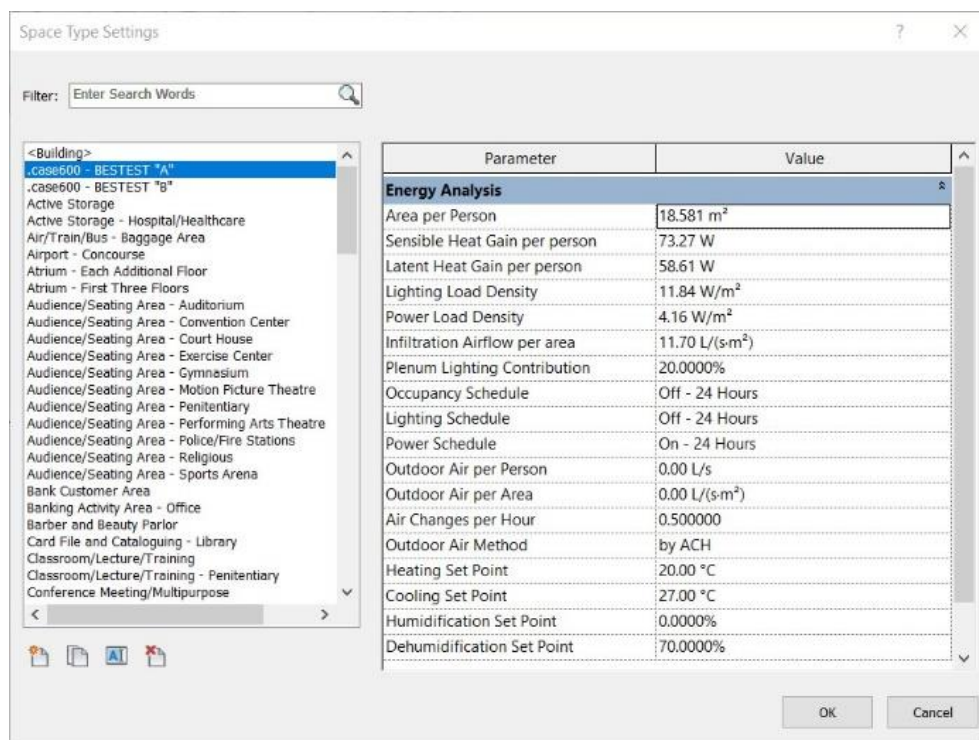


Figura 17- Janela de configuração das características de acordo com o tipo de espaço.

Fonte: Autor (2023).

Nas tabelas de ocupação, iluminação e potência são configuradas as agendas de utilização, podendo ser utilizada uma agenda já existente ou ser criada uma específica. ASHRAE *Standard* 140 determina a utilização de agenda de uso contínuo de 24h para os equipamentos com um consumo fixo de 200W (4,16 W/m²) e as demais são consideradas desligadas. Para as trocas de ar é considerado o valor fixo de 0,5 trocas por hora. Também foram ajustados os *setpoints* de aquecimento e resfriamento, deixando o restante das configurações inalteradas.

Após a definição dos parâmetros do espaço, é necessário definir algumas configurações de energia que serão utilizadas para a criação do modelo analítico pelo Revit. Como o Revit possui duas ferramentas voltadas para a análise de energia (*Optimize* e *Systems Analysis*) e ambas utilizam o mesmo modelo analítico de energia, é necessário definir o nível de detalhamento que será levado em conta para a realização da análise. No item “*Mode*” existem três maneiras de gerar o modelo analítico: utilizando as características construtivas dos elementos da construção (*Use Building Elements*); utilizando uma mescla de características projetadas e outras esquemáticas (*Use Conceptual Masses and Building Elements*); utilizando informações baseadas em ambientes ou espaços (*Use Rooms or Spaces*) (AUTODESK REVIT, 2023). Como não foram utilizadas massas conceituais neste

caso, optou-se por trabalhar com os métodos “*Use Building Elements*” e “*Use Rooms or Spaces*” e analisar a diferença entre eles.

Por se tratar de um programa BIM, as estruturas construtivas possuem espessura, gerando um complexo modelo tridimensional. Para transformar essa estrutura em um arquivo gbXML, onde o modelo gerado é composto por faces, é importante saber como é feita essa simplificação da estrutura. Como essa explicação não foi encontrada na ajuda do Revit, foi a partir dos testes realizados que foi possível observar quais os parâmetros são levados em conta para a criação das estruturas analíticas, detalhados nas Tabelas 7 e 8.

O método “*Building Elements*” cria espaços e superfícies analíticas com base em elementos de construção. Dessa forma, os espaços analíticos estão sempre delimitados diretamente pelas superfícies analíticas (Tabela 7).

Tabela 7- Parâmetros de criação das estruturas analíticas observadas no modo de exportação “*Building Elements*”.

Método “ <i>Building Elements</i> ”	
Estruturas Analíticas	Parâmetros de Criação de Estrutura Analítica
Pisos	São gerados levando em conta o limite superior do piso.
Paredes	São gerados levando em conta o eixo das paredes.
Telhados	São gerados levando em conta o limite superior do telhado.
Elementos isolados (brises, beirais, entre outros)	São gerados levando em conta o limite superior da estrutura, sempre sendo aplicada a “ <i>Analytical Surface Resolution</i> ” quando adjacentes a outra estrutura.
Volume	O volume analítico é calculado a partir das superfícies analíticas geradas. No entanto, nele é aplicado um fator de redução, definido pelo “ <i>Analytical Space Resolution</i> ”.

Fonte: Autor (2023).

No método “*Rooms or Spaces*”, segundo a Autodesk (2023), os espaços analíticos e as superfícies são criados com base na envoltória dos ambientes ou espaços (dependendo da opção que foi escolhida pelo projetista). Portanto, nos locais onde não são atribuídos ambientes ou espaços o Revit não cria uma zona térmica, considerando todas as estruturas como elementos de sombreamento. Nos testes desenvolvidos observou-se que os volumes e estruturas isoladas apresentam diferença na sua forma de criação em relação ao “*Building Elements*”, conforme descrito na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros de criação das estruturas analíticas observadas no modo de exportação “*Rooms or Spaces*”.

Método “ <i>Rooms or Spaces</i> ”	
Estruturas Analíticas	Parâmetros de criação
Pisos	São gerados levando em conta o limite superior do piso.

Paredes	São gerados levando em conta o eixo das paredes.
Telhados	São gerados levando em conta o limite superior do telhado.
Elementos isolados (brises, beirais, entre outros)	São gerados levando em conta o limite superior da estrutura e, quando adjacentes a outra estrutura, necessitam chegar ao eixo da mesma para não haver vazios.
Volume	O volume analítico é calculado a partir dos limites internos dos ambientes/espços.

Fonte: Autor (2023).

Dessa forma, esse método cria um espaço analítico (volume de ar) dissociado das superfícies analíticas. Enquanto o espaço analítico mantém o correto volume de ar do ambiente (a partir de suas quatro faces internas), as superfícies são geradas a de forma que não exista um vazio entre os ambientes/espços adjacentes. Assim, as trocas de calor que são realizadas através das superfícies analíticas ficam garantidas.

Nas configurações avançadas de energia foi escolhida a opção “*Spaces*” como categoria de exportação e foi marcada a caixa de diálogo “*Detailed Elements*”, para o modelo analítico levar em conta as características construtivas configuradas (Figura 18). As demais configurações foram mantidas conforme disponibilizadas pelo programa.

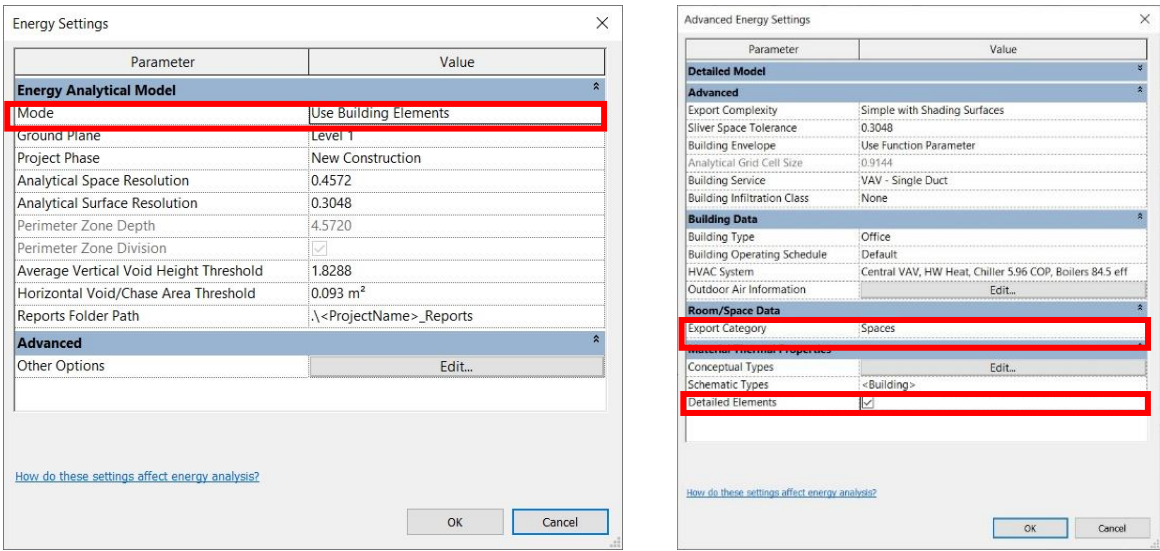


Figura 18 - Menu de configurações de energia (à esquerda) e menu de configurações avançadas de energia (à direita).

Fonte: Autor (2023).

Antes de iniciar a simulação, é necessário gerar o modelo analítico de energia, onde todas as informações configuradas ficam associadas ao modelo tridimensional. Depois de gerado o modelo, qualquer edição de parâmetros não será levada em conta na simulação. Para a realização da simulação foi utilizado o fluxo de trabalho *Annual Building Energy Simulation*.

4.1.1.1 Conferência preliminar de dados

Antes da realização de qualquer análise de resultados, foram feitas as conferências dos parâmetros carregados no programa Revit, verificando se as variáveis estavam sendo corretamente transmitidas ao motor de simulação. Nesse procedimento foram comparados apenas os dados configurados no Revit e os dados extraídos do “*Analysis Report*”, também dentro do programa, utilizando os dois modos de exportação. Os parâmetros utilizados para a configuração do espaço Zona 01 (Figura 17) não foram suficientes para obter os resultados esperados, como pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9 - Tabela comparativa dos dados de entrada e saída para os modos de exportação “*Building Elements*” e “*Rooms or Spaces*”, a partir do relatório de análise criado no Revit.

	PARÂMETROS COMPARADOS	Modelagem (dados de entrada)	<i>Building Elements</i> (dados de saída)	<i>Rooms or Spaces</i> (dados de saída)
GEOMETRIA	<i>Total Building Area (m²)</i>	48,00	49,23	0,00*
	<i>Gross Roof Area (m²)</i>	48,00	49,23	49,23
	<i>Gross Wall Area (m²)</i>	75,60	80,53	80,53
	<i>Window Opening Area (m²)</i>	12,00	11,76	11,76
	<i>Space Volume (m³)</i>	129,60	117,18	129,60
	<i>Noth Wall Area (m²)</i>	21,60	22,97	22,97
	<i>East Wall Area (m²)</i>	16,20	17,29	17,29
	<i>South Wall Area (m²)</i>	21,60	22,97	22,97
	<i>West Wall Area (m²)</i>	16,20	17,29	17,29
	<i>Shading Surfaces</i>	0,00	0,00	4,00
MATERIAIS OPACOS	<i>Exterior Wall U-Factor (W/m²K)</i>	0,56**	0,52	0,52
	<i>Floor U-Factor (W/m²K)</i>	0,04**	0,04	0,00*
	<i>Roof U-Factor (W/m²K)</i>	0,33**	0,32	0,32
	<i>Exterior Wall Reflectance</i>	0,40	0,40	0,40
	<i>Floor Reflectance</i>	0,40	0,40	0,00*
	<i>Roof Reflectance</i>	0,40	0,40	0,40
JANELAS	<i>Glass Area (m²)</i>	6,00	5,88	5,88
	<i>Glass U-Factor (W/m²K)</i>	2,72	2,72	2,72
	<i>Glass SHGC</i>	0,79	0,79	0,79
	<i>Glass Visible Transmittance</i>	0,84	0,84	0,84
ZONA TÉRMICA	<i>Lightning (W/m²)</i>	0,00	8,77	0,00*
	<i>People (W/m²)</i>	0,00	11,84	0,00*
	<i>Electric Equipment (W/m²)</i>	4,16	4,16	0,00*
	<i>Zone Infiltration (L/sm²)</i>	11,70	11,70	0,00
	<i>Zone Ventilation (ACH)</i>	0,50	0,50	0,00
	<i>Heating Setpoint (°C)</i>	20,00	20,00	20,00
	<i>Cooling Setpoint (°C)</i>	27,00	27,00	27,00

Fonte: Autor (2023).

* Propriedades com valor nulo devido à não criação da estrutura de piso exterior pelo Revit;

** Valores de transmitância sem considerar os coeficientes superficiais interno e externo;

A hachura colorida na Tabela 9 destaca os valores discrepantes em relação aos modelados. Quase todas as propriedades geométricas apresentaram alterações em relação ao configurado. Isso aconteceu devido à necessidade do Revit de transformar suas estruturas tridimensionais em estruturas bidimensionais, para ser compatível com os arquivos de simulação energética. Essa simplificação é feita utilizando os eixos das paredes e as superfícies superiores do piso e da cobertura, tanto no método “*Building Elements*” como no método “*Room or Spaces*”. Dessa forma, houve um aumento de 2,5% nas áreas de piso e cobertura e 6,5% na área das paredes externas. Para as janelas externas houve uma diminuição de 2,0% na área total.

O volume interno da zona foi a única propriedade que apresentou diferença no resultado entre os dois métodos. Se fosse levado em conta a construção geométrica do modelo, o volume correto de ambos os modos deveria ser de 139,84 m³ (6,087 x 8,087 x 2,8408). No entanto, no modo “*Building Elements*” foi atribuído um volume de 117,18 m³, 9,6% menor do que o esperado e desproporcional ao aumento das demais superfícies. Por outro lado, no modo “*Room or Spaces*” o volume foi de 129,60 m³, conforme o esperado pela modelagem. Testes posteriores identificaram que a variação volumétrica no modo “*Building Elements*” está diretamente ligada à configuração “*Analytical Space Resolution*”.

A Tabela 10 apresenta as variações geométricas encontradas nos testes simulando diferentes valores de resolução analítica para espaço e superfície. Observa-se que as superfícies não apresentaram variações em nenhum dos cenários, enquanto o volume do espaço variou no modo “*Building Elements*”. A diminuição dos valores gerou um cálculo de volume mais próximo do originalmente modelado (129,60 m³). No modo “*Room or Spaces*” é sempre levado em conta o volume interno modelado do espaço, independente das resoluções utilizadas.

Tabela 10 – Comparativo do impacto das resoluções analíticas de superfícies e espaço nos modelos considerando os modos de exportação “*Building Elements*” e “*Rooms or Spaces*”.

Parâmetros	Resoluções Analíticas					
	<i>Building Elements</i>			<i>Room or Spaces</i>		
	Mínimo ¹	Padrão ²	2x Padrão ³	Mínimo ¹	Padrão ²	2x Padrão ³
Paredes externas (m ²)	80,53	80,53	80,53	80,53	80,53	80,53
Janelas (m ²)	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76
Piso (m ²)	49,23	49,23	49,23	49,23	49,23	49,23
Telhado (m ²)	49,23	49,23	49,23	49,23	49,23	49,23

Volume (m³)	129,99	117,18	103,00	129,60	129,60	129,60
-------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Fonte: Autor (2023).

¹ Valores mínimos aceitos pelo Revit para as resoluções analíticas: Espaço=0,1524 m e Superfície=0,0762 m.

² Valores padrão estipulados pelo Revit para as resoluções analíticas: Espaço=0,4572 m e Superfície=0,3048 m.

³ Valores padrão duplicados para as resoluções analíticas: Espaço=0,9144 m e Superfície=0,6096 m.

Segundo a Autodesk Revit (2023), os parâmetros de resolução de espaço e de superfície analítica fornecem informações importantes usadas pelo algoritmo que gera o modelo analítico de energia. Os valores padrão para esses parâmetros procuram oferecer um equilíbrio entre a precisão e o tempo de processamento do modelo analítico de energia. Os valores de resolução analítica menores podem produzir resultados mais precisos, mas o tempo de processamento necessário para criar o modelo analítico de energia é significativamente maior.

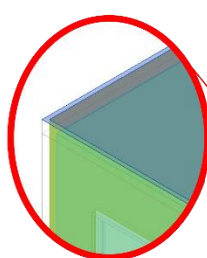
Continuando a análise da Tabela 9, observa-se que os ganhos internos da zona nos dados de saída estavam incorretos e que a utilização da agenda “*OFF- 24 hours*” para ocupação e iluminação não foi efetiva, sendo sobreposta pelos campos “*Area per Person*” e “*Lighting Load Density*”. Também foi constatado que o modo “*Rooms or Spaces*” apresentou alguns problemas na criação do modelo analítico, como pode ser observado na Figura 19:

1. Criação de pequenas estruturas de sombreamento adjacentes ao piso e à cobertura – As estruturas cobrem todo o perímetro do piso e cobertura e apresentam largura de 4,35 cm, exatamente a metade da espessura da parede. Apesar de apresentar um impacto desprezível no desempenho térmico da edificação, a única forma encontrada para solucionar isso foi a alteração da complexidade de exportação, dentro das configurações avançadas de energia, substituindo o padrão “*Simple with Shading Surfaces*” para “*Simple*”. No entanto, essa solução pode ser utilizada somente em situações em que não existem dispositivos de sombreamento incidindo na edificação;
2. Não criação do piso exterior da edificação - Apesar de criar a estrutura de piso, nesse modo de exportação ele foi classificado como piso interior (já que nas propriedades de tipo ele estava com função “*interior*”) e, conseqüentemente, ignorado pelo EnergyPlus durante a simulação. Para solucionar esse problema foram encontradas duas soluções,

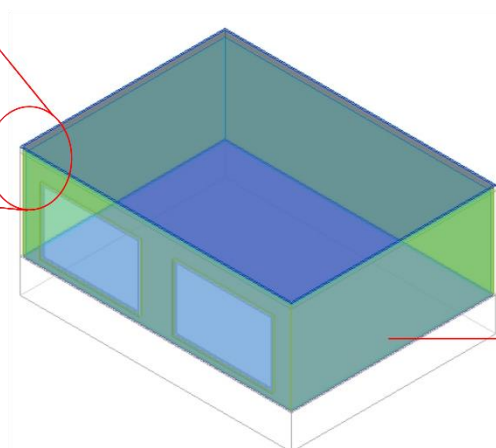
sendo uma delas alterar sua função para “*exterior*” nas propriedades de tipo. A outra opção seria alterar a configuração de envelope construtivo dentro das configurações avançadas de energia, substituindo o padrão “*Use Function Parameter*” para “*Identify Exterior Elements*”;

3. Não exportação dos valores de infiltração e ventilação para o cálculo de desempenho - Esse problema parece ser uma falha de programação do programa e a forma encontrada para resolver foi a de editar esses valores diretamente no IDF.

1) Criação de dispositivos de sombreamento



2) Exportação de piso externo como piso interno



Analytical Surfaces (1) ⌵ Edit Type	
Dimensions ⌵	
Area	49.226 m ²
Azimuth	0.00°
Tilt	180.00°
Analytical Properties ⌵	
Heat Transfer Co...	0.0396 W/(m ² ·K)
Thermal Resista...	25.2536 (m ² ·K)/W
Thermal Mass	19.510030 kJ/(m ² ·...)
Phasing ⌵	
Phase	Phase 1
Energy Analysis ⌵	
Surface Type	Interior Floor
Analytical Space	01 Teste
Adjacent Analyti...	01 Teste

Figura 19 – Modelo de energia do caso 600 exportado no modo “*Rooms or Spaces*”.

Fonte: Autor (2023).

Os *setpoints* utilizados, de 20°C para aquecimento e 27°C para resfriamento foram corretamente carregados na simulação. Além disso, alguns parâmetros não estão disponíveis no Revit para edição, como a temperatura do solo, o tipo de distribuição solar e o terreno.

A conferência preliminar de dados permitiu constatar alguns problemas existentes na criação do modelo analítico dentro do Revit, bem como alternativas para solucioná-los. No entanto, para obter maior clareza em relação aos dados carregados no Revit e a forma como são lançados dentro do EnergyPlus, foi realizado o cruzamento de dados com o IDF gerado pelo programa.

A Figura 20 apresenta a configuração final do espaço para o caso 600, indicando como o EnergyPlus interpreta esses dados.

Energy Analysis		
Area per Person	0.000 m ²	Dados de Ocupação
Sensible Heat Gain per person	0.00 W	
Latent Heat Gain per person	0.00 W	
Lighting Load Density	0.00 W/m ²	Carga de equipamentos
Power Load Density	4.16 W/m ²	
Infiltration Airflow per area	0.807090 m ³ /(h·m ²)	
Plenum Lighting Contribution	0.0000%	Agendas de uso
Occupancy Schedule	Off - 24 Hours	
Lighting Schedule	Off - 24 Hours	
Power Schedule	On - 24 Hours	Setpoints de temperatura e umidade
Outdoor Air per Person	0.000 m ³ /s	
Outdoor Air per Area	0.000000 m ³ /(h·m ²)	
Air Changes per Hour	0.000000	
Outdoor Air Method	by People and by Area	
Heating Set Point	20.00 °C	
Cooling Set Point	27.00 °C	
Humidification Set Point	0.0000%	
Dehumidification Set Point	70.0000%	

Figura 20 – Configuração final utilizada na simulação.

Fonte: Autor (2023).

Os dados de ocupação e iluminação foram zerados, tendo em vista a aparente sobreposição dos mesmos sobre as agendas de uso. A carga de equipamentos foi mantida em 4,16 W/m². Observou-se que no campo “*Infiltration Airflow per area*”, os dados são exportados para o EnergyPlus como “*Infiltration Airflow per Exterior area*”. Como o Revit não possibilita a utilização de uma opção de trocas de ar por hora, foi realizada a conversão considerando a área de paredes gerada pelo modelo analítico, obtendo-se o valor de 0.727555 m³/(h·m²). Foram mantidas as agendas de uso também foram zerados os valores para as trocas de ar externas, para não termos nenhum tipo de ventilação natural no ambiente. Após realizadas essas alterações foi gerado um novo modelo analítico e realizada uma nova simulação.

4.1.1.2 Resultados preliminares e cruzamento de dados

Os resultados gerados pela ferramenta *Systems Analysis* para a opção “*Annual Building Energy Simulation*” são apresentados através de um extenso relatório dividido em duas partes. A primeira apresenta uma análise anual dos dados com gráficos elaborados pelo OpenStudio em cima dos dados calculados pelo EnergyPlus (Figura 21). A segunda parte é o “*Detailed Report*”, onde são apresentadas inúmeras tabelas extraídas diretamente do EnergyPlus com diferentes tipos de dados.

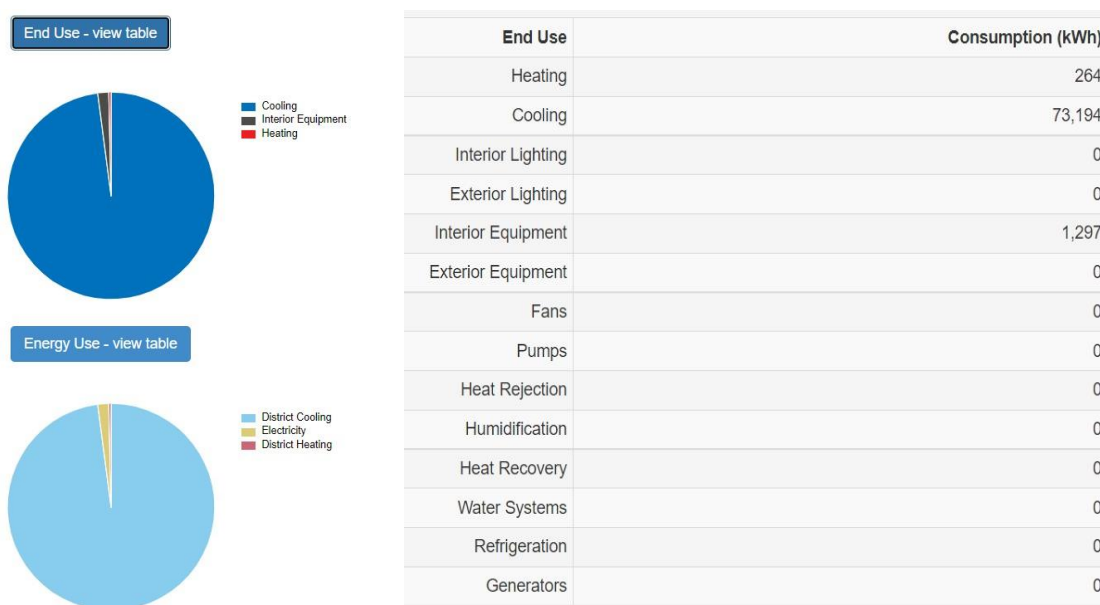


Figura 21- Dados anuais referentes ao modelo gerado no Revit utilizando o modo *Building Elements*.
Fonte: Autor (2023).

Como o modo “*Room or Spaces*” não estava exportando os dados de infiltração, a primeira simulação foi realizada utilizando o modo “*Building Elements*” com os valores padrão para as resoluções analíticas. Os dados obtidos demonstraram que aproximadamente 98% da energia consumida pela edificação ao longo do ano seria destinada ao resfriamento, em um total de 74,75 MWh. Quando comparados com os resultados obtidos pelos programas validados pelo BESTEST (NREL, 2022), o resultado esperado para o programa EnergyPlus seria de uma carga de resfriamento de aproximadamente 6,75 MWh e uma carga de aquecimento de 4,38 MWh para o caso 600. Esses valores foram corroborados pelo modelo controle criado pelo autor no Sketchup, que obteve uma carga de 6,79 MWh para resfriamento e 4,39 MWh para aquecimento.

Ao contrário de Coelho (2020), que obteve resultados mais próximos entre o programa Revit e o OpenStudio para análise de consumo energético por área, no teste realizado houve diferença de 66,56 MWh na carga térmica anual da edificação.

Com o objetivo de encontrar o motivo de tamanha discrepância foram realizados diversos testes com o cruzamento dos dados do arquivo IDF gerado pelo Revit e o arquivo IDF criado pelo autor a partir do Sketchup. Dessa forma, foi possível identificar que o principal problema estava em um erro de exportação das agendas que eram aplicadas no Revit, mas que chegavam desconfiguradas no EnergyPlus. Para a criação do seu arquivo IDF a ferramenta *Systems Analysis* exporta inúmeras

agendas de utilização, definindo sua aplicação através das “*ScheduleWeek:Daily*”. No entanto, muitas delas chegam com configurações distorcidas e em alguns casos são utilizadas agendas diferentes das definidas no Revit. As Figuras 22 e 23 demonstram as agendas semanais e diárias, respectivamente, exportadas pelo Revit para o EnergyPlus. Pode-se observar, por exemplo, que a agenda de aquecimento (Obj3 da Figura 22) se relaciona na maioria dos dias da semana com a agenda *Schedule Day 10* (Figura 23), que possui *setpoint* de temperatura igual a 0°C. Da mesma forma a agenda de resfriamento (Obj4 da Figura 22) se relaciona em vários dias da semana com a agenda *Schedule Day 15* (Figura 23), que também possui *setpoint* de temperatura igual a 0°C. Após a constatação desse problema, foram corrigidas todas as agendas conforme as especificações do *ASHRAE Standard 140*.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj10
Name		Off - 24 Hours Week	Off - 24 Hours Week	Space 1 Htg Setpoi	Space 1 Clg Setpoi	Space 1 Humidificat	Space 1 Dehumidif	activity_0.0 Week F	infil_bldg Week P	On - 24 Hours Week	On - 24 Hours Week
Sunday Schedule:Day Name		Schedule Day 1	Schedule Day 1	Schedule Day 10	Schedule Day 15	Schedule Day 18	Schedule Day 21	activity_0.0 Schedu	Schedule Day 7	Schedule Day 4	On - 24 Hours Week
Monday Schedule:Day Name		Schedule Day 1	Off - 24 Hours All	Schedule Day 10	Schedule Day 15	Schedule Day 18	Schedule Day 21	activity_0.0 Schedu	Schedule Day 7	Schedule Day 4	On - 24 Hours Week
Tuesday Schedule:Day Name		Schedule Day 1	Off - 24 Hours All	Schedule Day 10	Schedule Day 15	Schedule Day 18	Schedule Day 21	activity_0.0 Schedu	Schedule Day 7	Schedule Day 4	On - 24 Hours Week
Wednesday Schedule:Day Name		Off - 24 Hours All	Off - 24 Hours All	Schedule Day 10	Schedule Day 15	Schedule Day 18	Schedule Day 21	activity_0.0 Schedu	Schedule Day 7	On - 24 Hours All	On - 24 Hours Week
Thursday Schedule:Day Name		Off - 24 Hours All	Off - 24 Hours All	Schedule Day 10	Schedule Day 15	Schedule Day 18	Schedule Day 21	activity_0.0 Schedu	Schedule Day 7	On - 24 Hours All	On - 24 Hours Week
Friday Schedule:Day Name		Off - 24 Hours All	Off - 24 Hours All	Schedule Day 10	Schedule Day 15	Schedule Day 18	Schedule Day 21	activity_0.0 Schedu	Schedule Day 7	On - 24 Hours All	On - 24 Hours Week
Saturday Schedule:Day Name		Off - 24 Hours Sat	Off - 24 Hours Sat	Schedule Day 10	Schedule Day 15	Schedule Day 18	Schedule Day 21	activity_0.0 Schedu	Schedule Day 7	On - 24 Hours Sat	On - 24 Hours Week
Holiday Schedule:Day Name		Schedule Day 1	Schedule Day 1	Schedule Day 10	Schedule Day 15	Schedule Day 18	Schedule Day 21	activity_0.0 Schedu	Schedule Day 7	Schedule Day 4	Sched
SummerDesignDay Schedule:Day Name		Off - 24 Hours Summ	Off - 24 Hours Summ	Htg_Space 1 Summ	clg_Space 1 Summ	humid_Space 1 Sur	dehumid_Space 1 S	activity_0.0 Summer	infil_bldg Summer D	On - 24 Hours Summ	On - 24 Hours Week
WinterDesignDay Schedule:Day Name		Off - 24 Hours Wint	Off - 24 Hours Wint	Htg_Space 1 Wint	clg_Space 1 Wint	humid_Space 1 Wint	dehumid_Space 1 W	activity_0.0 Winter	infil_bldg Winter De	On - 24 Hours Wint	On - 24 Hours Week
CustomDay1 Schedule:Day Name		Schedule Day 1	Schedule Day 1	Schedule Day 10	Schedule Day 15	Schedule Day 18	Schedule Day 21	activity_0.0 Schedu	Schedule Day 7	Schedule Day 4	Sched
CustomDay2 Schedule:Day Name		Schedule Day 1	Schedule Day 1	Schedule Day 10	Schedule Day 15	Schedule Day 18	Schedule Day 21	activity_0.0 Schedu	Schedule Day 7	Schedule Day 4	Sched

Figura 22 – Agendas semanais exportadas pelo Revit.

Fonte: Autor (2023).

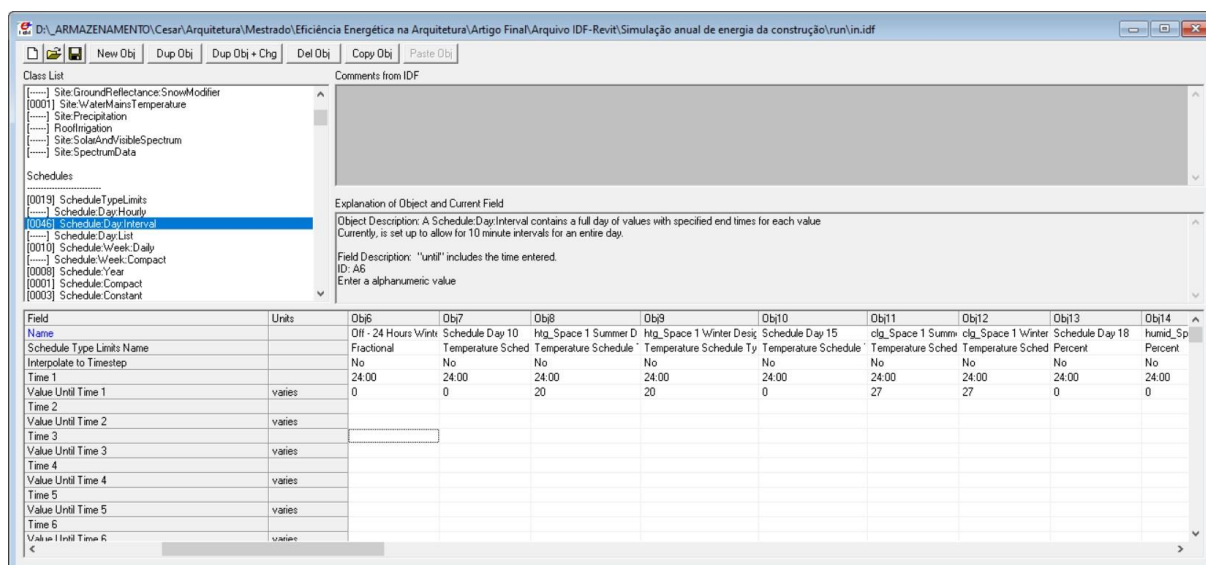


Figura 23– Agendas diárias exportadas pelo Revit.

Fonte: Autor (2023).

O cruzamento de dados também possibilitou a identificação das pré-configurações utilizadas pelo *Systems Analysis* para gerar o arquivo IDF e mapear os dados exportados pelo Revit. Na Tabela 11 é apresentada uma listagem com todos os parâmetros divergentes encontrados entre o IDF gerado pelo *Systems Analysis* e o modelo gerado pelo autor no SketchUp, desconsiderando os parâmetros específicos do modelo (uso, geometrias, zonas, entre outros). Os parâmetros listados na coluna REVIT 2023 refletem algumas pré-configurações utilizadas pelo programa para realizar a simulação, enquanto os parâmetros da coluna SKETCHUP foram configurados tendo como referência o trabalho de Henninger e Witte (2015), a própria ASHRAE (2017) e os arquivos disponibilizados pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis americano no repositório de arquivos Github.com (NREL, 2022).

Tabela 11 – Comparativo de parâmetros divergentes entre o IDF gerado pelo Revit e o configurado pelo autor a partir do Sketchup

PARÂMETROS DIVERGENTES		REVIT 2023 (Systems Analysis)	SKETCHUP (Euclid)
Building Information	<i>Terrain</i>	<i>Suburbs</i>	<i>Country</i>
	<i>Loads Convergence Tolerance</i>	0,10	0,04
	<i>Temperature Convergence Tolerance</i>	0,50	0,004
	<i>Solar Distribution</i>	<i>FullExterior</i>	<i>FullInterior&Exterior</i>
Convergence Limits	<i>Minimum System Timestep</i>	1	-
	<i>Maximum HVAC Iterations</i>	25	-
Run Period	<i>Begin Year / End Year</i>	1997	
	<i>Day of Week of Start Day</i>	Wednesday	-
Site Ground Temperature	<i>Building Surface (°C)</i>	-	10,00

Site Water Mains Temperature	<i>Calculation method</i>	<i>Correlation</i>	-
	<i>Maximum Difference in Monthly Average Outdoor Air Temperatures</i>	10	-
Material	<i>Roughness</i>	<i>MediumRough</i>	<i>Conforme Material</i>
	<i>Solar Absorptance</i>	0,7*	0,6
	<i>Visible Absorptance</i>	0,7	0,6
Electric Equipment	<i>Design Level Calculation Method</i>	<i>Watts/Area</i>	<i>Equipment Level</i>
	<i>Design Level (W)</i>	-	200
	<i>Watts per Zone Floor Area (W/m²)</i>	4,16	-
	<i>Fraction Radiant</i>	-	0,6

Fonte: Autor (2023).

* As camadas mais externas das estruturas construtivas possuem absorptância solar de 0,6.

4.1.1.3 Resultados

A primeira análise foi realizada buscando avaliar o impacto de todos os dados e configurações que estavam diferentes do modelo criado pelo autor nas cargas térmicas anuais. Para essa análise comparativa foi definida uma abordagem de correções cumulativas em oito etapas, sendo a primeira a correção das agendas de utilização e as demais etapas seguindo os sete grupos de parâmetros divergentes identificados na Tabela 11. A Figura 24 confirma que o principal problema da simulação realizada no Revit realmente foi a configuração das agendas. Os grupos *Convergence Limits* e *Site Water Mains Temperature* não tiveram impacto no resultado das simulações, enquanto o grupo *Run Period* apresentou diferenças desprezíveis nas cargas térmicas anuais.

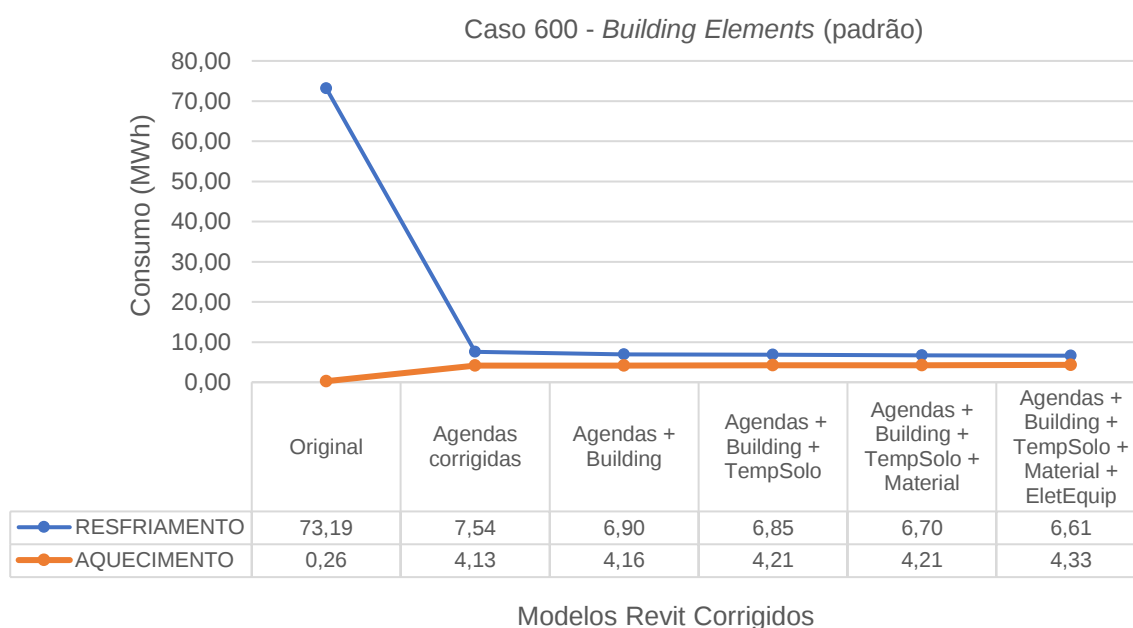


Figura 24 – Gráfico de variação das cargas térmicas de aquecimento e resfriamento para as correções cumulativas realizadas no caso 600 (BE padrão).

Fonte: Autor (2023).

Na segunda análise realizada foram comparados os modelos criados no Revit nos modos “*Building Elements*” e “*Rooms or Spaces*” com o modelo controle criado pelo autor no Sketchup. O gráfico da Figura 25 sintetiza a relação de demanda de energia para aquecimento e resfriamento nos diferentes modelos testados. Pode-se perceber que todos os modelos gerados no Revit, através da ferramenta *Systems Analysis*, após terem suas agendas e configurações corrigidas, apresentaram resultados muito próximos do esperado. Os modelos que apresentaram carga térmica total mais próxima foram o Revit BE¹ e Revit RS, com uma diferença de aproximadamente 1,5% em relação ao modelo criado no Sketchup. Quando consideramos as cargas isoladamente, o modelo Revit BE³ foi o que apresentou menor diferença para carga de resfriamento (1,5%) e o modelo Revit BE² foi o que apresentou menor diferença para a carga térmica de aquecimento (1,4%). Percebe-se que, para esse caso, as resoluções analíticas mínimas geraram resultados mais precisos, juntamente com o modelo Revit RS, que possui o volume correto do ambiente. No entanto, mesmo o modelo Revit BE³, que utiliza resoluções mais imprecisas, apresentou uma diferença de apenas 2,8% na carga térmica anual da edificação, podendo ser uma opção de configuração a ser utilizada em modelagens mais complexas e que demandam mais tempo para serem realizadas.

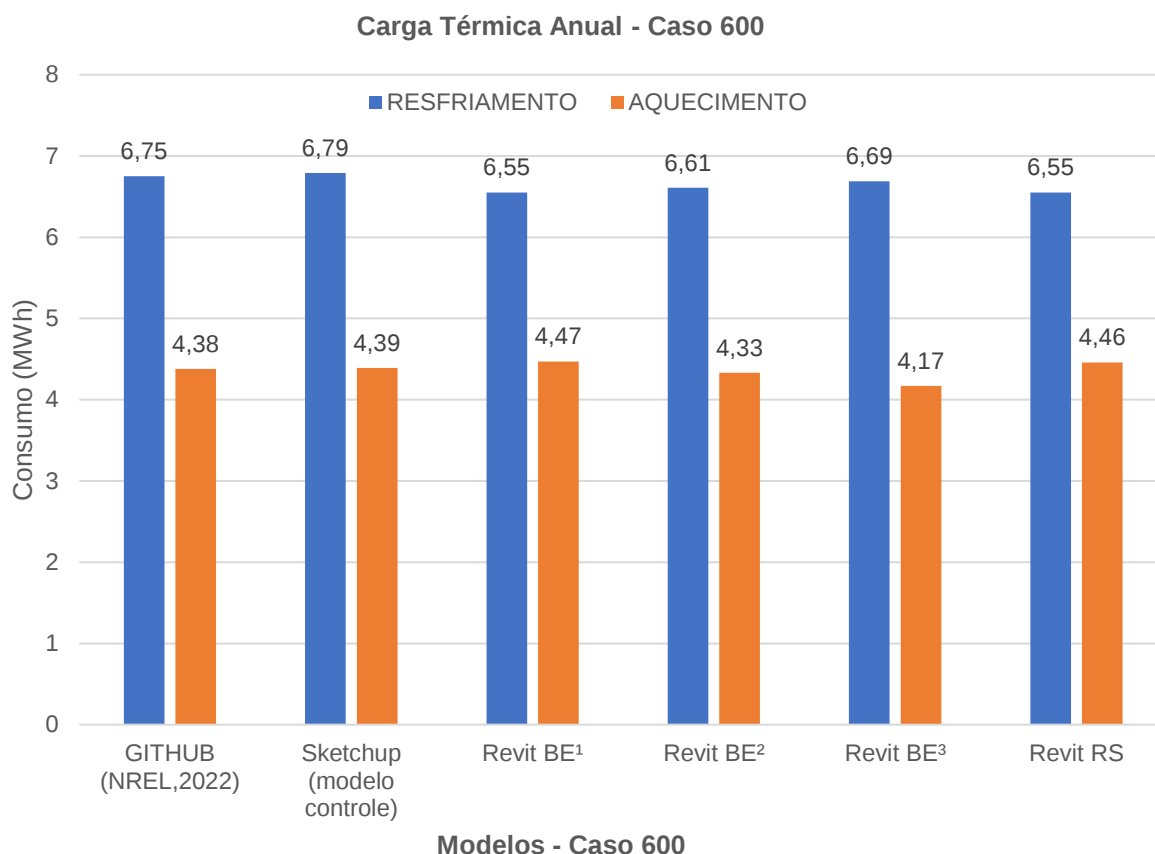


Figura 25 – Gráfico comparativo das cargas térmicas anuais de resfriamento e aquecimento dos modelos do caso 600.

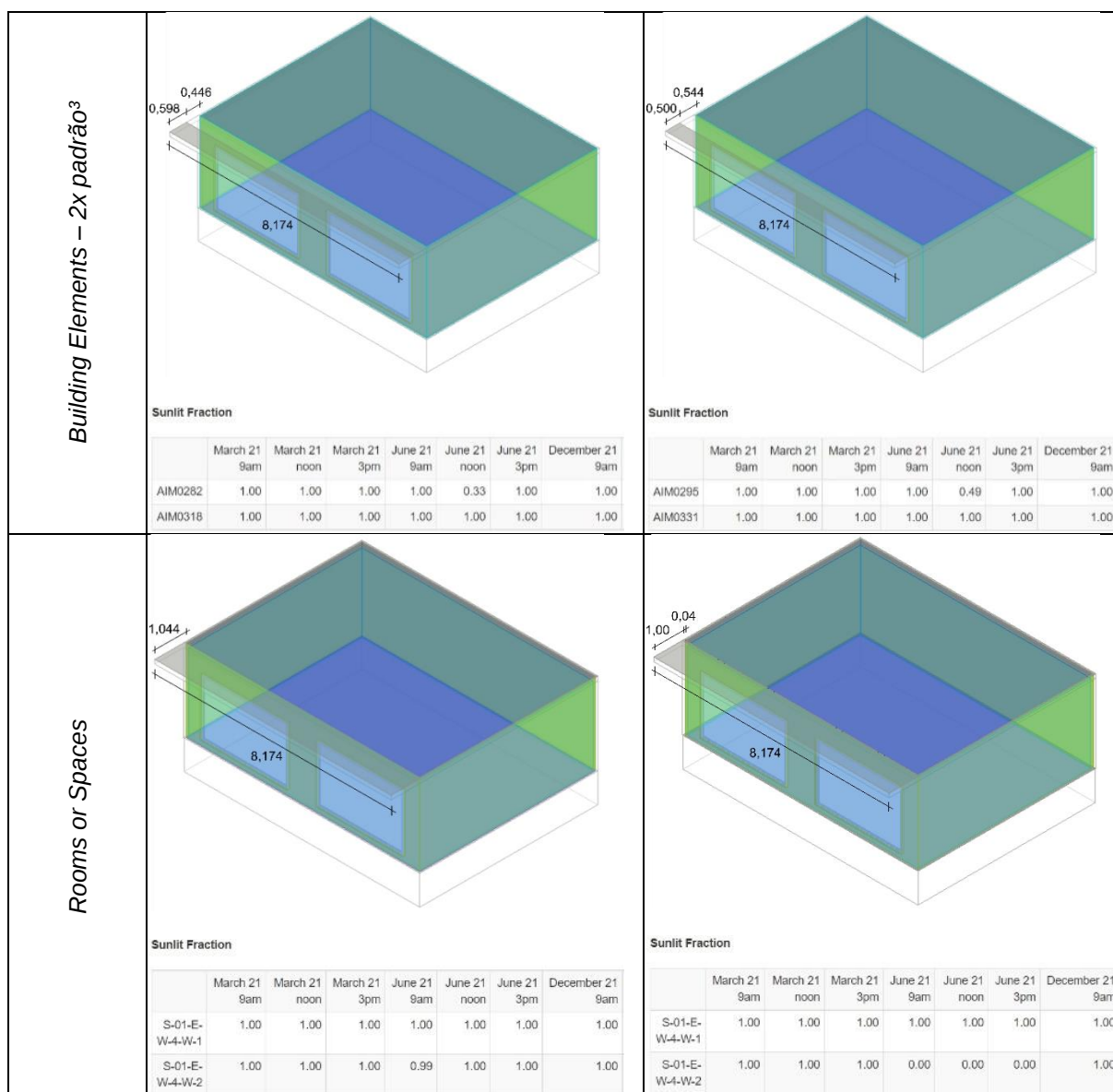
Fonte: Autor (2023).

¹ Modelo criado no modo *Building Elements* com resoluções analíticas mínimas: Volume=129,99 m³.

² Modelo criado no modo *Building Elements* com resoluções analítica padrão: Volume=117,18 m³.

³ Modelo criado no modo *Building Elements* com resoluções analíticas 2x o padrão: Volume=103,00 m³.

O modelo Revit RS apresentou uma diferença de 3,5% para a carga térmica de resfriamento e 1,6% para a carga térmica de aquecimento. Cabe salientar que essa diferença de resultados entre os modelos não indica imprecisão, mas reflete exatamente o impacto da diferença metodológica durante a construção geométrica dos modelos. Enquanto no Sketchup foram utilizadas apenas as medidas internas para a modelagem, o Revit RS criou seu modelo a partir do eixo das paredes, a superfície superior da cobertura e a sobreposição do volume do ambiente (utilizando o volume interno). Essa diferença quantifica o quanto a forma de modelar pode impactar nos resultados, especificamente para o Caso 600, uma construção térrea, de 48,00 m² de área, com paredes e cobertura leves.



Fonte: Autor (2023).

¹ Valores mínimos aceitos pelo Revit para as resoluções analíticas: Espaço=0,1524 m e Superfície=0,0762 m.

² Valores padrão estipulados pelo Revit para as resoluções analíticas: Espaço=0,4572 m e Superfície=0,3048 m.

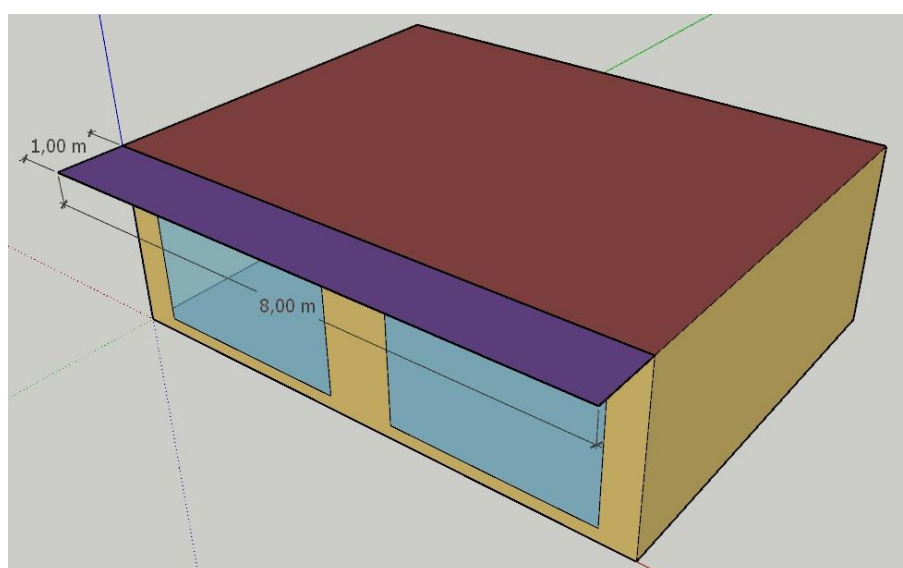
³ Valores padrão duplicados para as resoluções analíticas: Espaço=0,9144 m e Superfície=0,6096 m.

Comparando a geometria criada para os brises com as resoluções analíticas utilizadas é possível perceber seu impacto nas dimensões de sua superfície. Mais uma vez, quanto menor os índices utilizados maior a precisão dimensional atingida, com exceção do modelo “2x Padrão”, que manteve as mesmas medidas do “Padrão”.

Também foi possível perceber que a forma de modelagem impactou nos índices de redução aplicados pelo Revit na criação da superfície, não sendo possível estabelecer um fator numérico de redução nos modelos analisados. Os modelos que utilizaram o modo “Room or Spaces” apresentaram a forma mais precisa de criação

do brise, com uma largura de 1,00 m mais 0,0435 m (metade da espessura da parede). Novamente esse modo não foi impactado pela variação das resoluções analíticas.

Apesar de ser esperada uma redução de aproximadamente 30% na carga térmica de resfriamento, os resultados nos casos 610 foram muito similares aos alcançados nos casos 600. Ao analisar as causas dessa inconsistência, percebeu-se através das frações de insolação incidentes nas janelas do modelo que o brise não foi corretamente considerado no cálculo do EnergyPlus, fato corroborado pelos modelos comparativos criados no Sketchup pelo autor, exemplificado pela Figura 26.



Sunlit Fraction

	March 21 9am	March 21 noon	March 21 3pm	June 21 9am	June 21 noon	June 21 3pm	December 21 9am
2E5B3D	0.81	0.72	0.75	0.27	0.00	0.00	1.00
2EA987	0.76	0.72	0.79	0.00	0.00	0.26	1.00

Figura 26 – Caso 610 modelado no Sketchup com a tabela de insolação incidente nas janelas.

Fonte: Autor (2023).

Os relatórios de erro gerados pelo EnergyPlus não apontaram qualquer problema no cálculo de sombreamento e o relatório de combinações de sombreamento reconheceu o brise como uma superfície convexa recebedora de raios solares. Além disso, o brise foi corretamente carregado em três diferentes visualizadores de IDF: Sketchup (Euclid), OpenStudio e Spider IDF Viewer (online), conforme pode ser observado na Figura 27.

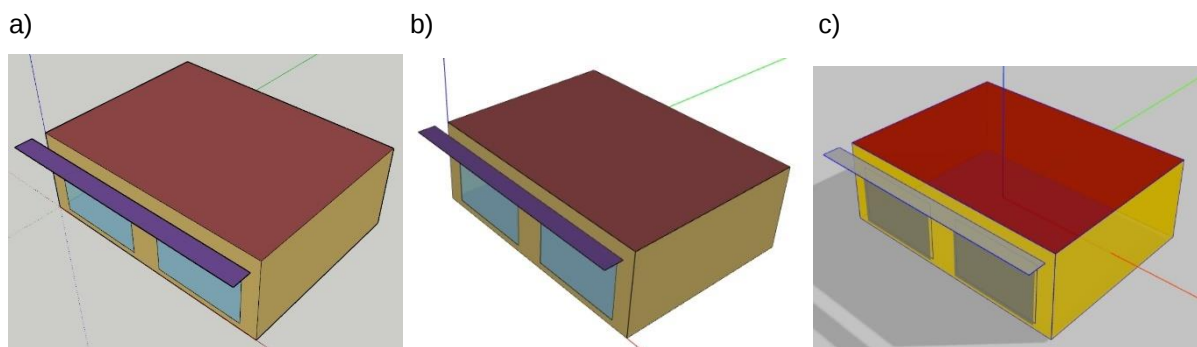


Figura 26 – Visualização do Caso 610 (BE_padrão) em três programas diferentes: a) Sketchup (2020) / Euclid (0.9.4); b) OpenSutdio (2.8.1); c) Spider IDF Viewer (v-2020-10-09).

Fonte: Autor (2023).

Mesmo não identificando o erro que estava ocorrendo, inferiu-se que estava havendo um problema na leitura e interpretação da superfície pelo programa, como costuma acontecer quando superfícies não-convexas são usadas no cálculo de sombreamento. Dessa forma, foram realizados alguns testes de edição da superfície do brise no Sketchup e foi obtido o resultado esperado quando foi executada a inversão das faces da superfície e também quando alguma das arestas foi editada. A partir dessas alterações, que não deveriam trazer impacto nos resultados, a fração de insolação incidente nas janelas foi normalizada.

Com o objetivo de compreender melhor como essas alterações estavam impactando no arquivo IDF, foi realizado o cruzamento de todos os dados do arquivo criado pelo Revit e o arquivo com a face do brise invertida, sendo possível mapear todas as modificações causadas no arquivo original. A inversão da face do brise, realizada no Sketchup, gerou um efeito em cascata em todas as superfícies do modelo. Apesar de manter a geometria correta, houve o reposicionamento de todos os vértices das superfícies de construção. Na superfície de sombreamento foi observada a inversão dos vértices 1 e 3, enquanto os vértices 2 e 4 se mantiveram inalterados. Outro fato observado foi a inclusão do número de vértices de cada superfície no campo “*Number of Vertices*”, que estava em branco no modelo original. Por fim, foi realizada a reversão da face do brise e novamente foram comparados os IDFs. Dessa vez, a única alteração observada foi o reposicionamento de todos os vértices do brise, sem qualquer impacto no restante das configurações ou na insolação das janelas, que permaneceu correta. Não foi possível identificar a causa do reposicionamento dos vértices do modelo.

Continuando a análise de desempenho e considerando o erro de cálculo de sombreamento encontrado e as diferenças dimensionais causadas pelas resoluções analíticas já demonstradas, os testes de desempenho para o caso 610 foram realizados buscando avaliar seus impactos nos resultados anuais para as cargas térmicas de aquecimento e resfriamento. Para essas simulações foi considerada apenas a construção geométrica do brise a partir da ferramenta de piso e foram considerados os modos de exportação “*Rooms or Spaces*” e “*Building Elements*” com configurações mínimas (pela maior precisão), conforme Figura 28.

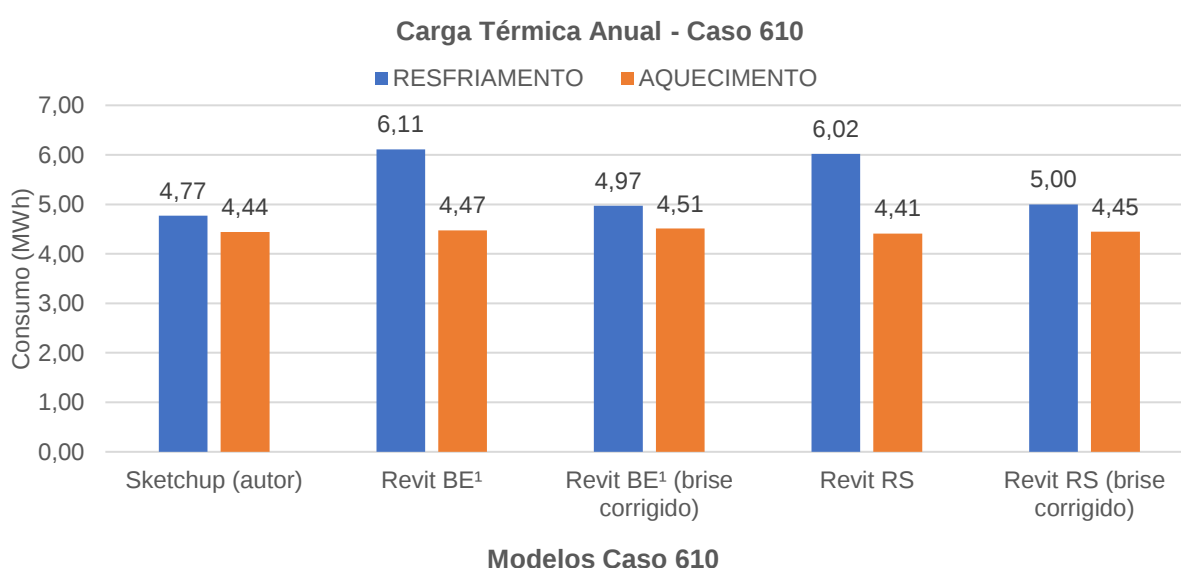


Figura 27 - Gráfico comparativo das cargas térmicas anuais de resfriamento e aquecimento dos modelos do caso 610.

A imprecisão do sombreamento sobre as janelas da fachada sul teve impacto direto na carga térmica de resfriamento dos modelos Revit BE¹ e Revit RS, ficando 28,1% e 26,2% acima do esperado, respectivamente. Após a correção das insolações, a diferença no resfriamento caiu para 4,2% e 4,8%, respectivamente. Analisando as cargas térmicas totais, os modelos gerados no Revit, com os brises corrigidos, apresentaram uma proximidade ainda maior com o resultado esperado, variando 2,9% para o modelo Revit BE¹ e 2,6% para o modelo Revit RS.

4.2 Simulações exploratórias geométricas

4.2.1 GBXML.ORG – Caso 01 (paredes externas de múltiplas camadas)

Uma prática comum dos profissionais ao modelarem em BIM é a utilização de múltiplas camadas de parede para definir uma parede externa ou interna. Essa técnica de modelagem, também conhecida como “parede cebola”, apresenta vantagens e desvantagens, dependendo do objetivo a que se propõe a modelagem. Para a simulação energética, ela pode representar um problema, pois o programa BIM tem dificuldade de entender qual é a camada que ele deve considerar como o limite da construção. A Figura 29 apresenta alguns erros comuns de exportação relativo a essa prática.

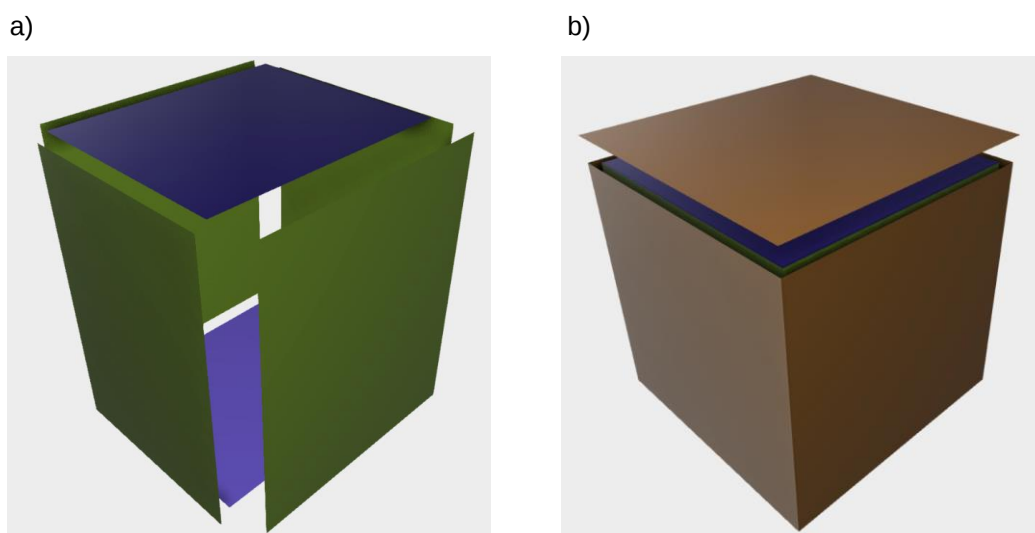


Figura 28 - Erros comuns utilizando múltiplas camadas de parede: a) modelo energético com estruturas desconectadas; b) modelo energético com uma face de sombreamento sobre a cobertura.

Fonte: Adaptado de Xu (2021).

No Revit, para solucionar o problema referente à Figura 29a é necessário que apenas uma camada do envelope seja considerada como “*Room Bounding*” (delimitador de ambiente) nas propriedades da parede, desmarcando todas as demais camadas da edificação. Dessa maneira, o programa irá desconsiderar a existência das demais camadas e permitirá a correta construção geométrica do modelo, conforme pode ser observado na Figura 30. Os testes realizados demonstraram que, independentemente do método de criação do modelo analítico de energia utilizado, a

escolha das camadas mais internas como limítrofes da edificação (“*Room Bounding*”) gera maior precisão em relação às medidas das superfícies e volumes do modelo.

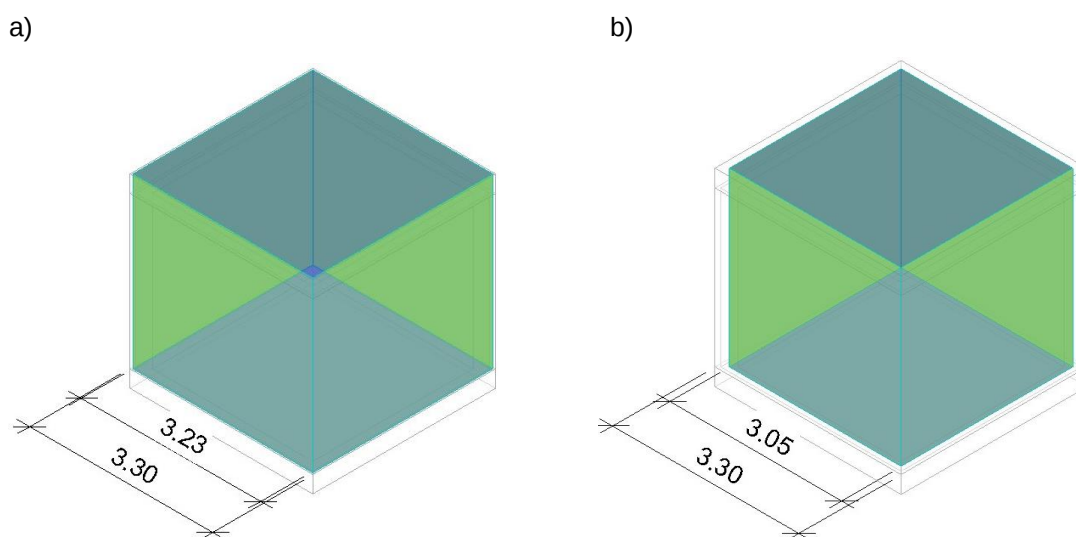


Figura 29 – Modelo analítico gerado no Revit com múltiplas camadas: a) camada limítrofe externa; b) camada limítrofe interna.

Fonte: Autor.

Já o problema associado à Figura 29b não está relacionado ao caso específico da parede com diferentes camadas e sim diretamente ligado às propriedades do “*Space*” atribuído ao ambiente. Esse erro se caracteriza pela criação de uma superfície de sombreamento sobre a cobertura e ocorre sempre que a altura do “*Space*” não abrange a espessura da cobertura. Dessa forma, para que isso não aconteça é necessário que o limite superior do “*Space*” do último pavimento tenha uma medida superior à soma do pé-direito do pavimento mais a espessura da cobertura. Como foram utilizados espaços com 4 metros de altura nos casos *ASHRAE Standard 140*, esse erro não havia sido encontrado.

Apesar da correta construção do modelo analítico de energia, utilizando essa abordagem as paredes desmarcadas são totalmente desconsideradas, necessitando o complemento manual dos materiais dessas camadas diretamente no programa de análise energética que será utilizado para a avaliação. Essa solução de modelagem se mostrou eficiente tanto para o método “*Building Elements*” como para o método “*Rooms or Spaces*”.

4.2.2 GBXML.ORG – Caso 02 (separação virtual de espaços)

Na realização das simulações energéticas, muitas vezes os espaços arquitetônicos (ambientes) necessitam ser divididos em zonas térmicas devido a fatores como orientação solar, função, terminais de ar, entre outros, como pode ser observado na Figura 31a. No entanto, esse separador virtual de espaços dos *softwares* BIM muitas vezes causa problemas na exportação do modelo tridimensional energético, criando vazios entre as superfícies (Figura 31b).

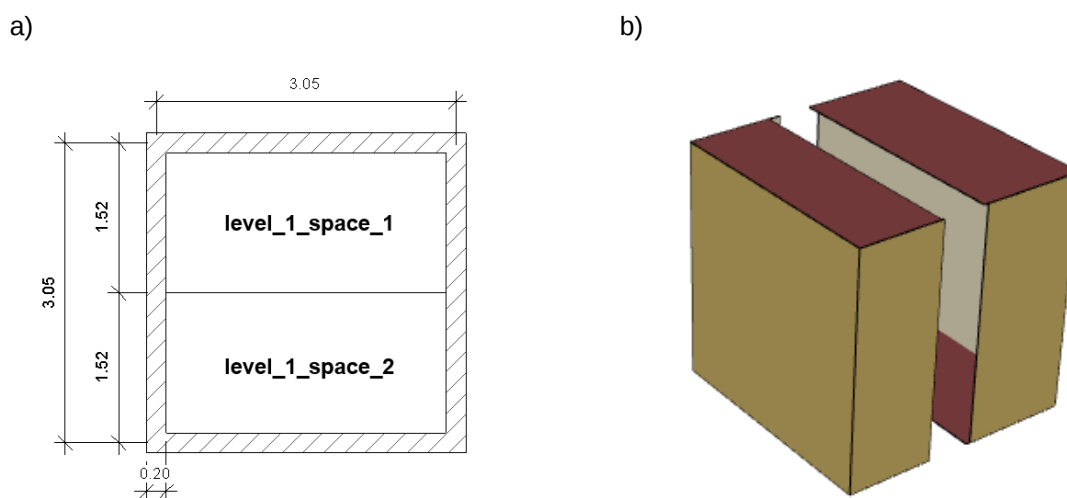


Figura 30 – Modelo com separador virtual de espaços: a) planta baixa; b) erro comum de exportação, com estruturas dissociadas.

Fonte: Autor (2023).

Utilizando o método “*Rooms or Spaces*” o Revit cria automaticamente uma superfície de separação com 1 cm de espessura entre os ambientes, sendo atribuído o material “*Air Infiltration Barrier*”, com propriedades térmicas pré-definidas dentro do Revit (Figura 32a). Já utilizando o método “*Building Elements*”, ocorre uma separação entre os espaços sem qualquer superfície de fechamento, acarretando também a descontinuidade nas superfícies adjacentes (Figura 32b). Para que esse modo possa ser utilizado corretamente é necessário que seja modelada uma parede divisória, de espessura mínima, e atribuído o material “*Air*” para que a geometria seja exportada de forma correta (Figura 32c).

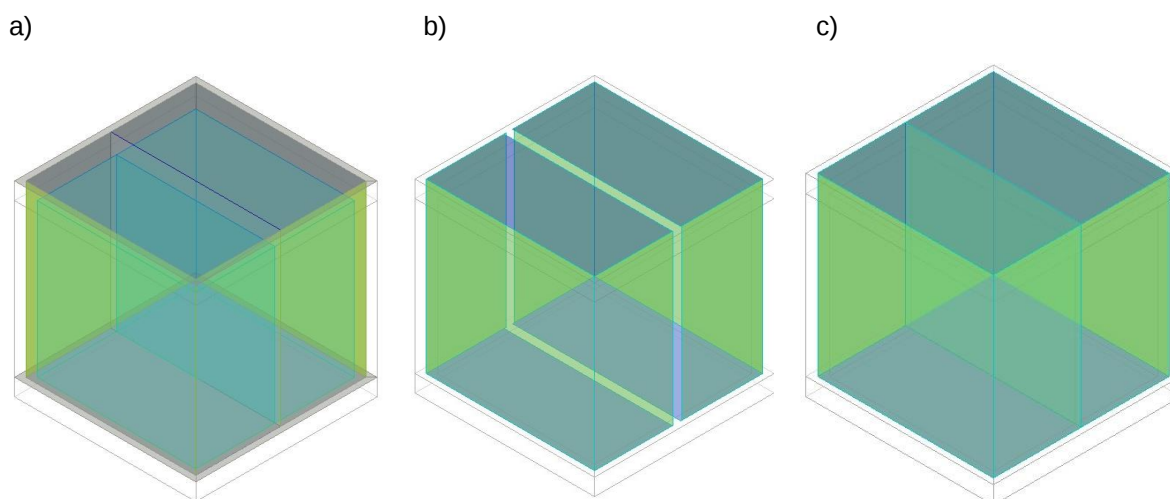


Figura 31 – Modelos analíticos exportados no Revit com separação virtual entre os espaços: a) método “Rooms or Spaces”; b) método “Building Elements”; c) método “Building Elements” com parede de ar de 1 mm.

Fonte: Autor (2023).

4.2.3 GBXML.ORG – Caso 03 (meia parede)

Em algumas tipologias de edifícios é comum a utilização de paredes que não se conectam ao forro, funcionando como partições de um ambiente. Um erro comum em relação à exportação desse tipo de geometria é a criação de uma superfície de sombreamento ao invés de uma geometria de parede interna.

A Figura 33a ilustra a planta baixa do modelo testado, com uma meia-parede dividindo o ambiente. Ao utilizar o modo de exportação “Rooms or Spaces” para a criação do modelo analítico houve erro no modelo gerado, caracterizado de duas maneiras (Figura 33b): 1) o espaço analítico criado considerou toda a altura do ambiente e não apenas a altura da parede interna, gerando um volume menor do que o modelado; 2) foi criada uma superfície de sombreamento no local da parede interna, sem propriedades térmicas. No entanto, ao utilizar o método “Building Elements” não houve erro referente à exportação da geometria, salientando apenas as diferenças dimensionais referentes às configurações de resoluções analíticas, conforme pode ser observado na Figura 33c.

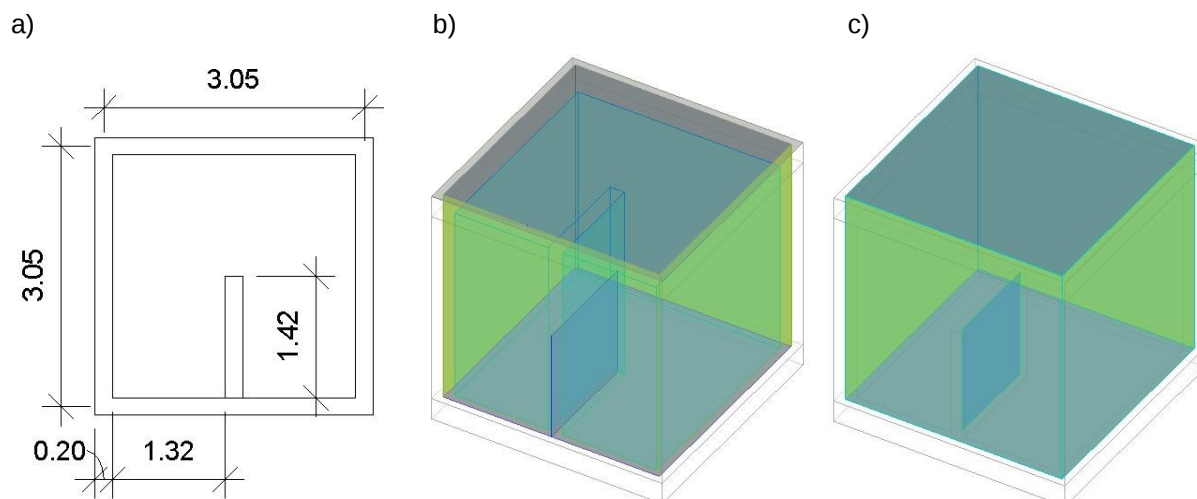


Figura 32 – Modelos analíticos exportados no Revit com meia parede dentro do ambiente: a) planta baixa do modelo; b) método “*Rooms or Spaces*”, com a parede interna como superfície de sombreamento; c) método “*Building Elements*”, com parede interna com variações dimensionais.

Fonte: Autor (2023).

4.2.4 GBXML.ORG – Caso 04 (forro de alturas diferentes)

O forro rebaixado de diferentes alturas é um elemento bastante utilizado na arquitetura, principalmente em edifícios de escritórios, hotéis, hospitais, entre outros. Esse teste procura avaliar a capacidade do programa BIM de exportar corretamente o vazio entre o forro e o piso imediatamente superior, ou a cobertura.

A Figura 34a demonstra o modelo testado em corte, destacando a diferença de altura dos forros. No Revit, o método “*Building Elements*” se mostrou incapaz de compreender a geometria modelada, criando superfícies sem conexão (Figura 34b). Já no método “*Rooms or Spaces*” observou-se que os espaços analíticos foram exportados corretamente. No entanto, foram criadas superfícies que não condiziam com o modelo criado, conforme demonstrado na Figura 34c. Para tentar corrigir esse erro foi alterada a forma de modelagem dos forros, partindo do centro das paredes, mesmo não sendo uma forma usual de modelagem (Figura 34d). Ainda assim, foram criadas duas superfícies adicionais (uma de telhado e outra de sombreamento) que precisariam ser excluídas posteriormente dentro do simulador energético. As demais superfícies foram corretamente identificadas e todas estavam conectadas.

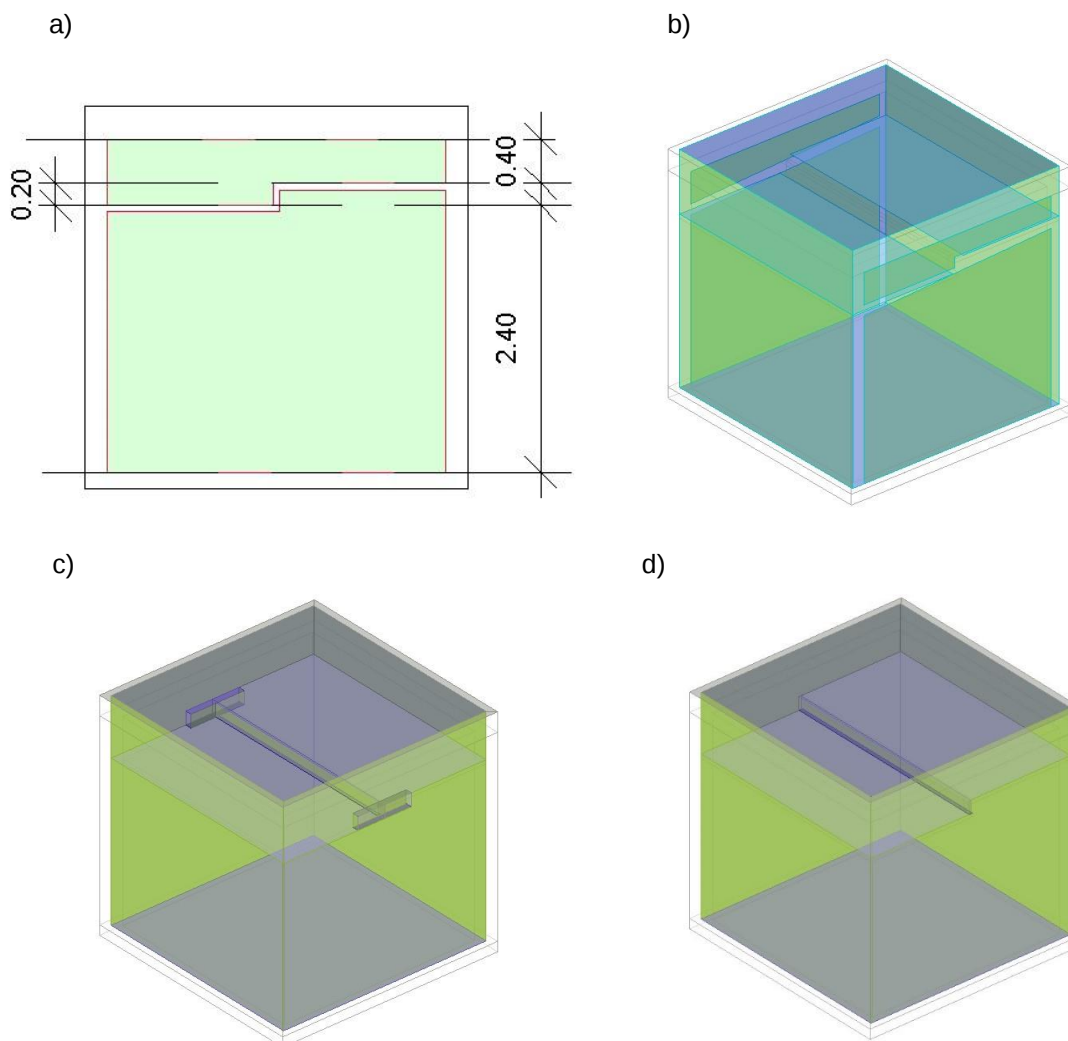


Figura 33 – Modelo criado no Revit com forro de diferentes alturas: a) corte; b) modelo analítico – método “Building Elements”; c) modelo analítico – método “Rooms or Spaces” com o forro partindo da face interna das paredes; d) modelo analítico – método “Rooms or Spaces” com o forro partindo do centro das paredes;

Fonte: Autor (2023).

4.2.5 GBXML.ORG – Caso 05 (piso elevado e forro rebaixado)

Outra solução arquitetônica bastante utilizada em edifícios comerciais e de escritórios é o piso elevado juntamente com o forro rebaixado. Essas estruturas permitem esconder a passagem das instalações de infraestrutura, deixando os ambientes esteticamente mais limpos e permitindo maior versatilidade na alteração de *layout*. Para a simulação energética é importante que esses vazios existentes entre o forro rebaixado e o entrepiso, bem como entre o entrepiso e o piso elevado, sejam corretamente exportados e identificados como espaços não-condicionados.

Para a realização do teste no Revit foram criados quatro espaços (um em cada ambiente, um para o forro e outro para o piso elevado), como poder ser observado na Figura 35a. O método “*Building Elements*” se mostrou capaz de traduzir a geometria modelada de forma correta, com todos os espaços e superfícies analíticas conectadas (Figuras 35b e 35c).

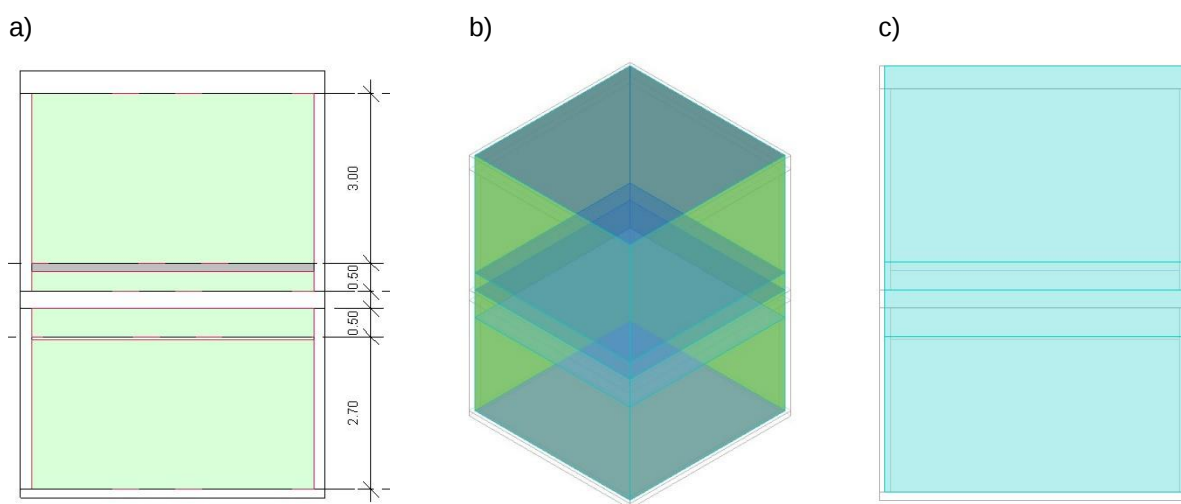


Figura 34 – Modelos analíticos exportados no Revit com piso elevado e forro rebaixado: a) corte do modelo; b) método “*Building Elements*”, superfícies analíticas; c) método “*Building Elements*”, espaços analíticos em corte (alinhados com as faces externas dos ambientes).

Fonte: Autor (2023).

No método “*Rooms or Spaces*”, partindo dos mesmos quatro espaços criados, as superfícies analíticas também foram criadas corretamente e os espaços analíticos mantiveram o afastamento referente às espessuras das estruturas (o que é uma característica desse método), conforme pode ser observado na Figura 36.

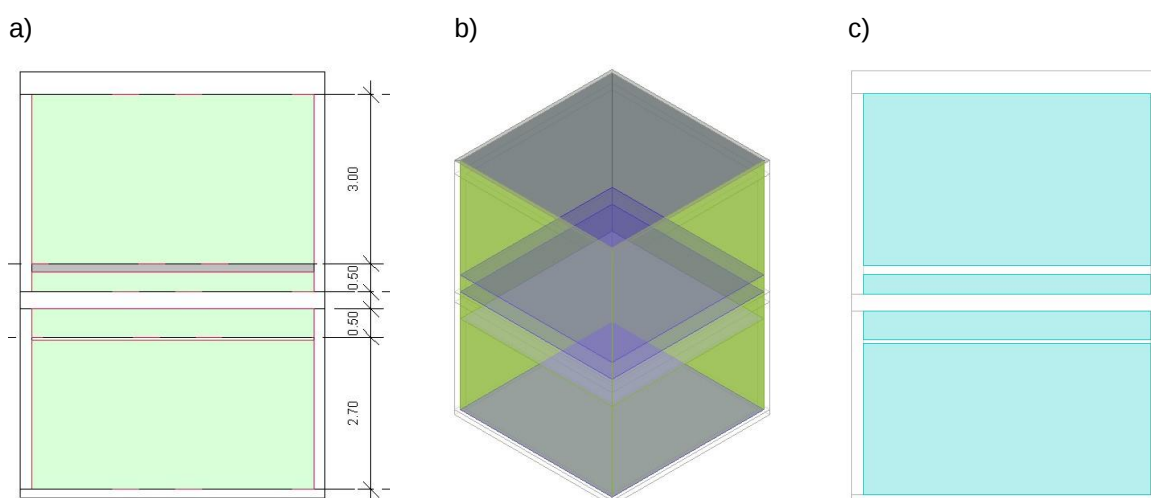


Figura 35 - Modelos analíticos exportados no Revit com piso elevado e forro rebaixado: a) corte do modelo; b) método “*Room and Spaces*”, superfícies analíticas; c) método “*Rooms and Spaces*”, espaços analíticos em corte (alinhados com as faces internas dos ambientes).

Fonte: Autor (2023).

4.2.6 GBXML.ORG – Caso 06 (informações do envelope)

O envelope da edificação contém informações essenciais para sua análise energética, incluindo a ordem dos materiais, a resistência térmica de cada camada e a refletância das camadas externas. Quando exportadas do modelo BIM para o arquivo gbXML, essas informações devem ser preservadas e corretamente mapeadas. Nos testes realizados no Revit, em ambos os métodos, as informações do envelope foram transmitidas sem erros para o arquivo gbXML.

4.2.7 GBXML.ORG – Caso 07 (ambiente dentro de outro ambiente)

Ambientes enclausurados dentro de outro ambiente são comumente encontrados em edifícios comerciais, institucionais e hospitalares e essa disposição geométrica pode resultar em dificuldade do programa em entender os corretos limites dos ambientes. A Figura 37a demonstra a planta baixa do modelo testado, com um ambiente dentro de outro ambiente. Nos testes realizados no Revit em ambos os métodos de exportação os resultados foram satisfatórios, com a correta separação entre as zonas e a correta identificação das estruturas internas e externas, conforme pode ser observado na Figuras 37b e 37c.

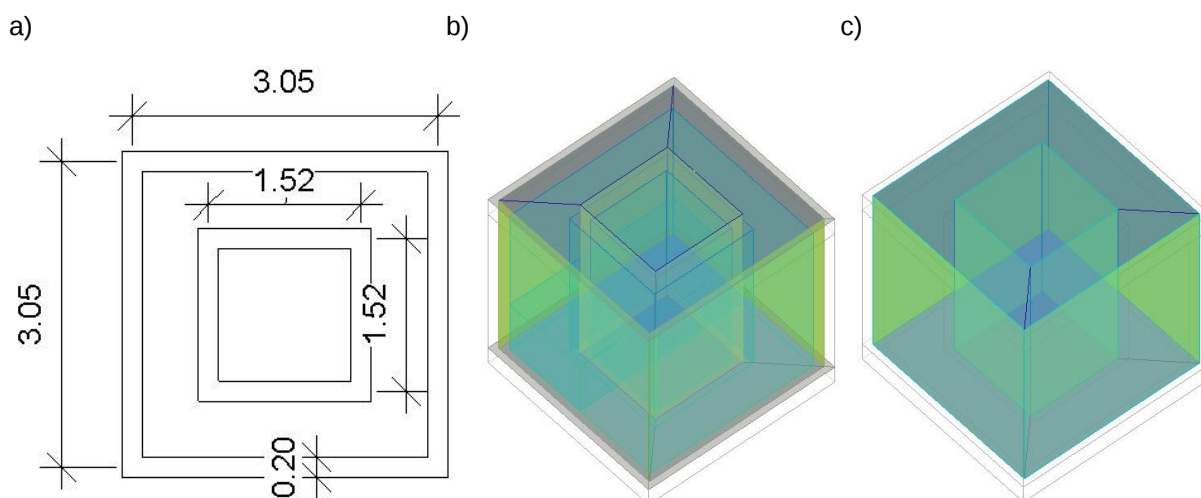


Figura 36 - Modelos analíticos exportados no Revit um ambiente dentro de outro ambiente: a) planta baixa do modelo; b) método “Rooms or Spaces”; c) método “Building Elements”.

Fonte: Autor (2023).

4.2.8 GBXML.ORG – Caso 08 (piso e forro adjacentes)

Muitas vezes, nos projetos arquitetônicos são previstos forros fixados diretamente na estrutura de entrepiso e essa associação de estruturas pode gerar erros na exportação do modelo analítico, com vazios e descontinuidades entre eles. Na Figura 38a é possível observar o corte do modelo testado, com o forro adjacente ao entrepiso.

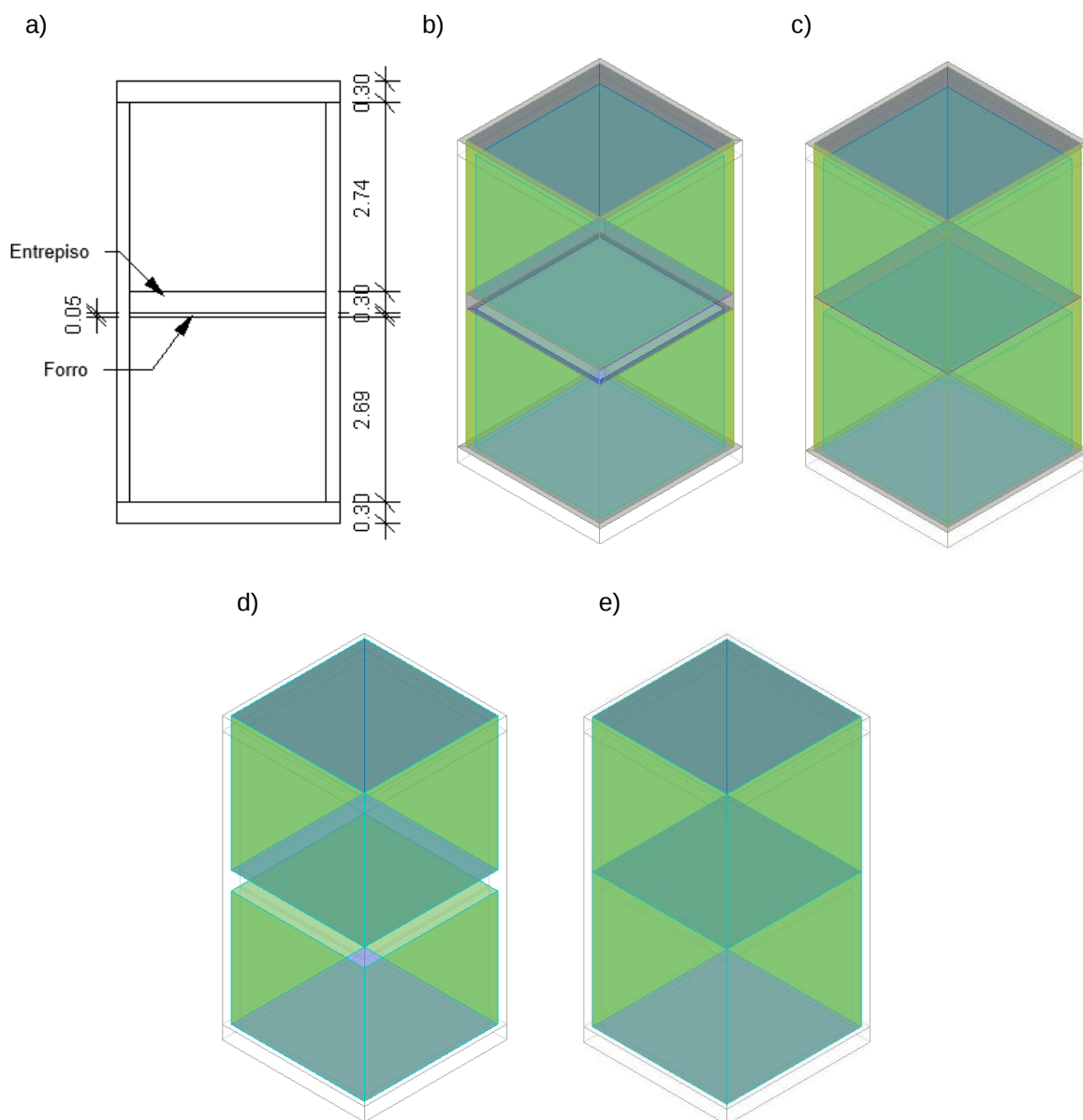


Figura 37 - Modelos analíticos exportados no Revit com forro anexo a estrutura de entrepiso: a) corte; b) método “Rooms or Spaces” com o forro como delimitador de ambiente; c) método “Rooms or Spaces” com o forro com o “room bounding” desmarcado; d) método “Building Elements” com o forro como delimitador de ambiente; e) método “Building Elements” com o forro com o “room bounding” desmarcado.

Fonte: Autor (2023).

No Revit, independentemente do método de exportação utilizado, quando duas estruturas adjacentes têm propriedades de delimitação de ambiente o programa não consegue traduzir corretamente essas estruturas para o modelo analítico, como pode ser observado nas Figuras 38b e 38d. Para que esse problema não aconteça é necessário que a estrutura do forro seja desmarcada como “*Room Bounding*”, sendo ignorada no momento da exportação. No entanto, a camada de forro deverá ser incluída posteriormente dentro do EnergyPlus na “*construction*” do “*interior floor*”. As Figura 38c e 38e demonstram os resultados dos testes realizados para ambos os modos de exportação após a eliminação do forro como um delimitador de ambiente.

4.2.9 GBXML.ORG – Caso 09 (janela interna)

É comum encontrarmos janelas internas conectando ambientes interdependentes, seja para melhorar a iluminação natural como para aumentar a área de infiltração de ar. A Figura 39a ilustra a planta baixa do modelo testado. Ao exportar para o modelo analítico pode ocorrer o fracionamento da parede onde está localizada a janela, bem como diferenças dimensionais de altura e largura da abertura. No Revit, utilizando ambos os métodos de exportação, os resultados ocorreram de forma satisfatória, sendo criada uma janela e uma parede interna, conforme Figura 39b e 39c. Conforme já explicado anteriormente, devido ao método de cálculo de superfícies analíticas utilizado pelo programa, as janelas e portas apresentam sempre área aproximadamente 2% menor que as modeladas no projeto.

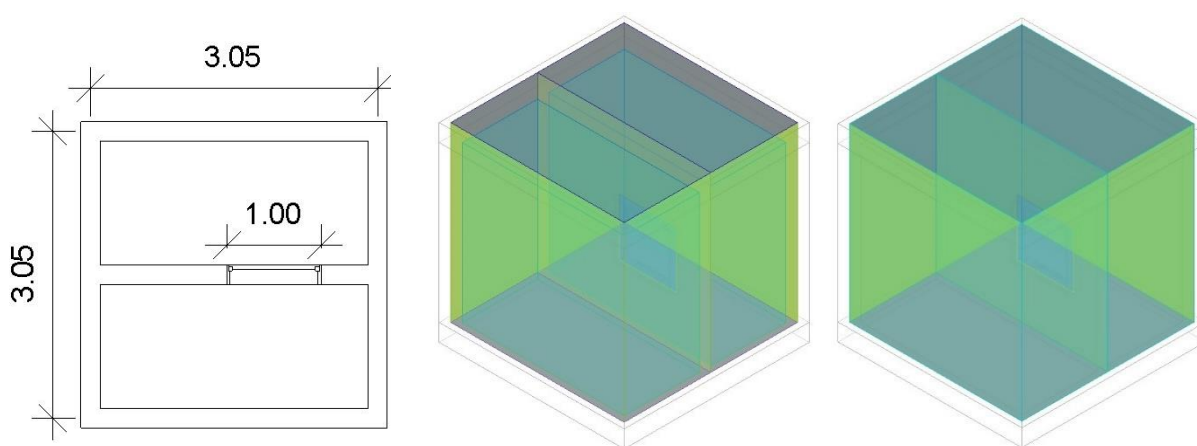


Figura 38 - Modelos analíticos exportados no Revit com janela interna: a) planta baixa; b) método “*Rooms or Spaces*”; c) método “*Building Elements*”.

Fonte: Autor (2023).

4.2.10 GBXML.ORG – Caso 10 (átrio)

O átrio referenciado por Xu (2021) é descrito como um ambiente de pé-direito elevado, normalmente compreendendo dois ou mais entrepisos na sua altura total e com cobertura, conforme Figura 40a. Quando um ambiente desses se conecta com mais ambientes verticalmente, o algoritmo dos programas BIM pode se confundir, gerando erros de exportação no modelo analítico. No entanto, os testes realizados no Revit demonstraram que em ambos os métodos de exportação não houve erros na geometria gerada, como pode se observar na Figura 40b e 40c.

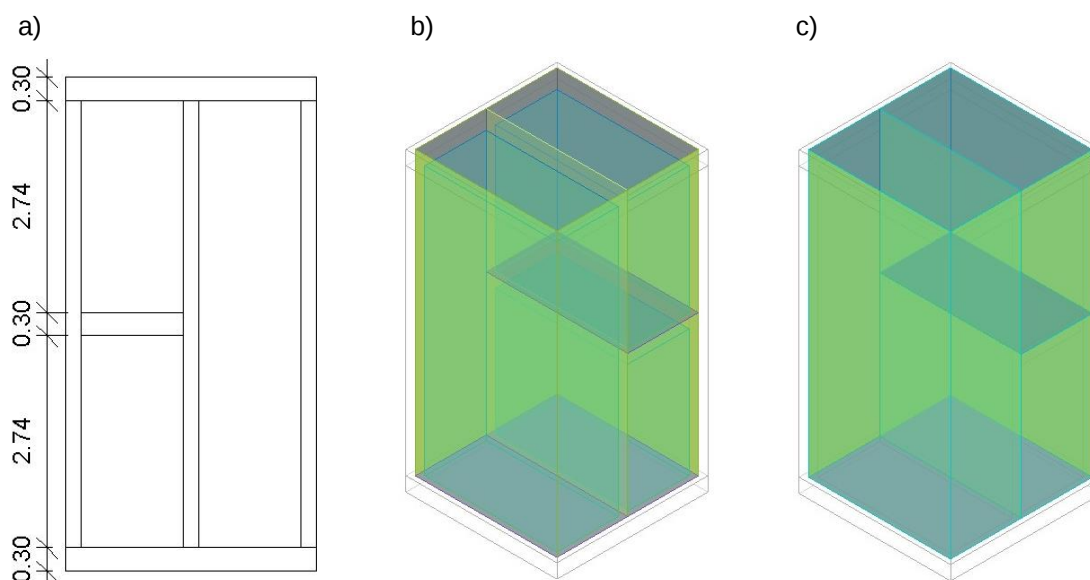


Figura 39 - Modelos analíticos exportados no Revit com pé-direito elevado: a) corte; b) método “Rooms or Spaces”; c) método “Building Elements”.

Fonte: Autor (2023).

4.2.11 GBXML.ORG – Caso 11 (mansarda)

Esse teste foi desenvolvido para testar o comportamento dos programas BIM ao trabalhar com telhados inclinados com mansarda, também conhecida como água-furtada. Para a exportação ser considerada exitosa todas as superfícies do telhado e da mansarda devem ser corretamente exportadas. Os testes realizados no Revit demonstraram uma grande dificuldade do programa em conseguir traduzir essa complexidade geométrica para o modelo analítico. A Figura 41 demonstra o modelo construído no Revit.

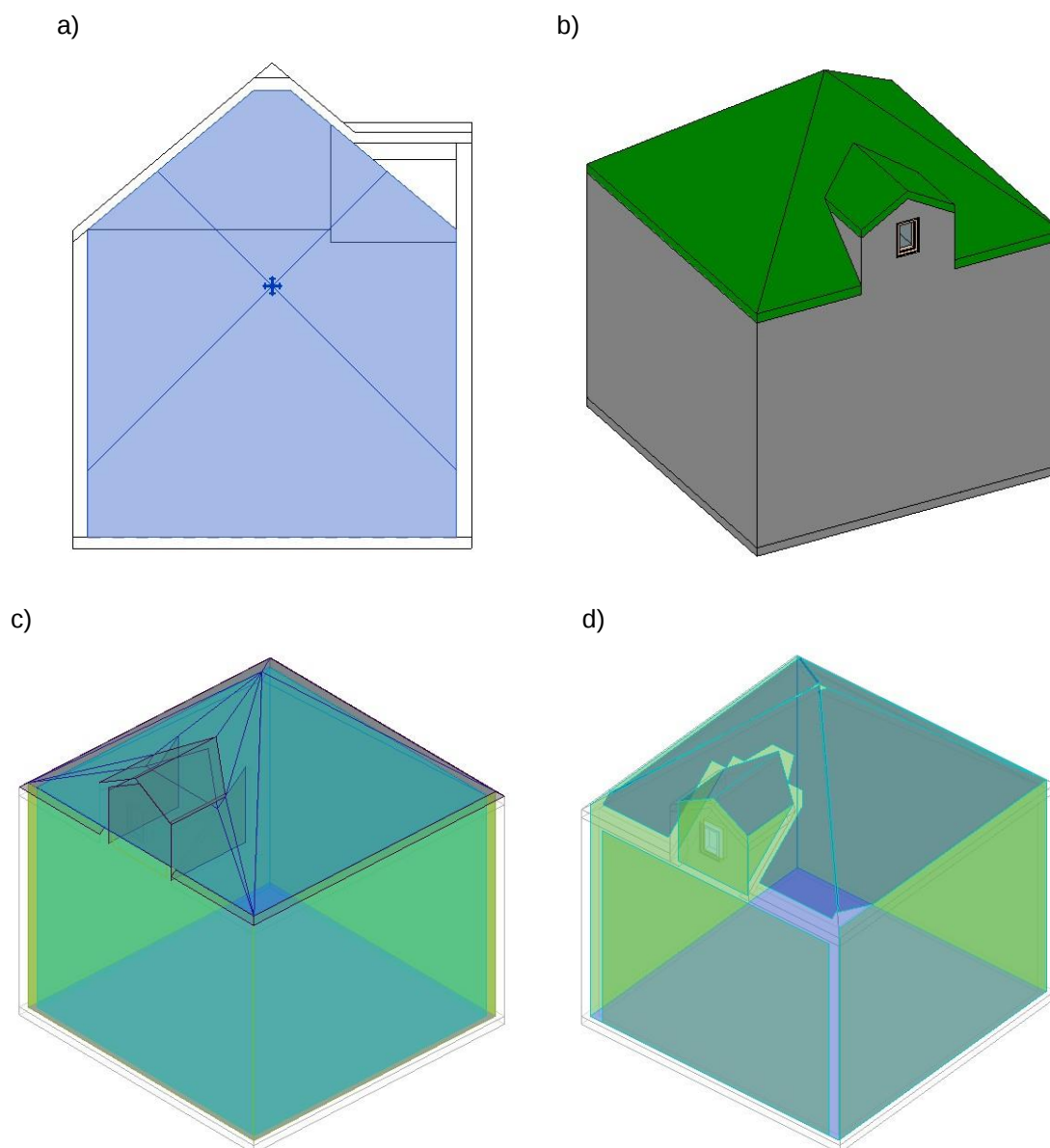


Figura 40 - Modelo criado no Revit com telhado inclinado e mansarda: a) corte; b) perspectiva; c) modelo analítico - método “Rooms or Spaces”; d) modelo analítico - método “Building Elements”.

Fonte: Autor (2023).

No corte (Figura 41a), pode-se perceber que o “Space” (azul claro) não reconheceu a abertura no telhado para a mansarda, ficando contido no volume da cobertura. Esse fato influenciou diretamente no modo de exportação “Room or Spaces” (Figura 41c), onde o programa entendeu os fechamentos da mansarda como geometrias de sombreamento. Ainda assim, as superfícies analíticas não ficaram totalmente conectadas entre si. No método de exportação “Building Elements” (Figura 41b) a geometria da mansarda foi entendida corretamente, mas o restante do telhado e até mesmo as paredes exteriores apresentaram vazios e desconexões entre as superfícies geradas. Não foram encontradas formas de correção desses erros, sendo

desaconselhada a utilização de mansardas para construção de modelos de energia dentro do Revit.

4.2.12 GBXML.ORG – Caso 12 (ambiente côncavo)

A maioria dos espaços nas edificações são retangulares, podendo ser corretamente exportados para um arquivo gbXML. No entanto, às vezes os projetistas trabalham com ambientes de arestas côncavas, o que significa que um dos ângulos internos é maior do que 180° . Na prática, sempre que for possível criar uma reta a partir de dois pontos internos ao ambiente e essa reta puder apresentar um trajeto externo ao ambiente, ele é considerado côncavo. Esses espaços podem apresentar problemas no momento da exportação justamente nesses pontos. A Figura 42a apresenta a planta baixa de um modelo com dois ângulos internos de 270° . Os testes realizados no Revit, demonstraram que apenas o método “*Rooms or Spaces*” conseguiu exportar corretamente a geometria modelada (Figura 42b). O método “*Building Elements*” apresentou pequenas falhas na criação das superfícies justamente nos encontros onde os ângulos internos são côncavos (Figura 42c).

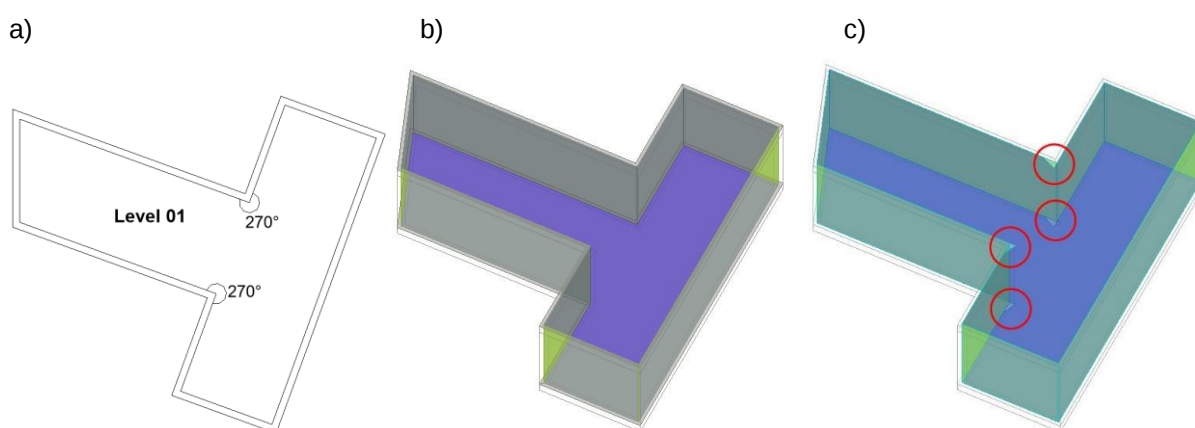


Figura 41 - Modelo criado no Revit com ambiente côncavo: a) planta baixa; b) modelo analítico criado a partir do método “*Rooms or Spaces*”; c) modelo analítico criado a partir do método “*Building Elements*”.

Fonte: Autor (2023).

4.2.13 GBXML.ORG – Caso 13 (sacada)

As sacadas são caracterizadas por plataformas externas pertencentes ao andar superior. Além de gerar aberturas extras para o exterior, elas também geram sombreamento nos andares inferiores. Por isso, é importante que elas sejam corretamente exportadas para o arquivo gbXML.

Para a realização dos testes dentro do Revit foram utilizadas três abordagens diferentes de modelagem, conforme os cortes ilustrados na Figura 43: a) estrutura de piso contínua abrangendo o piso interior e a sacada exterior; b) piso da sacada independente do piso interno, com sua origem no eixo das paredes da edificação; c) piso da sacada independente do piso interno, com sua origem na face externa das paredes da edificação.

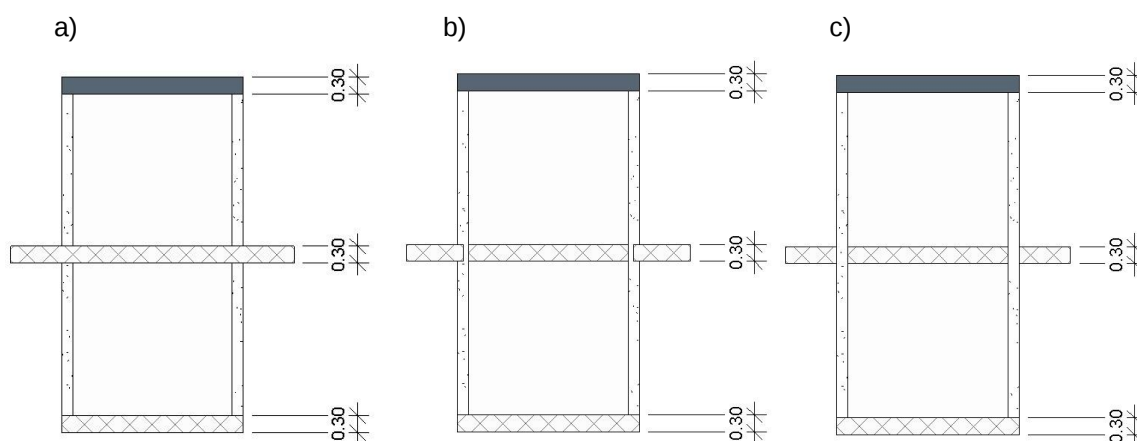


Figura 42 – Diferentes tipos de modelagem da sacada: a) piso único; b) piso a partir do eixo das paredes; c) piso a partir da face externa das paredes.

Fonte: Autor (2023).

As três formas de modelagem foram testadas utilizando os dois métodos de exportação disponíveis. O método “*Building Elements*” apresentou o mesmo problema anteriormente encontrado quando trabalhamos com brises. Devido às resoluções analíticas e à forma de exportar a geometria pelo programa, a plataforma da sacada ficou afastada alguns centímetros das paredes externas da edificação, conforme se observa na Figura 44a. A forma de modelagem não impactou na geometria analítica gerada. O método “*Rooms or Spaces*” conseguiu exportar corretamente a geometria da sacada quando modelado conforme os casos “a)” e “b)” da Figura 43, sendo essencial a modelagem do piso passando pelo centro das paredes do edifício para que a sacada fique conectada às paredes. Quando modelado conforme o caso “c)” da

Figura 43, houve um afastamento das paredes externas com a medida da metade da espessura da parede (Figura 44c).

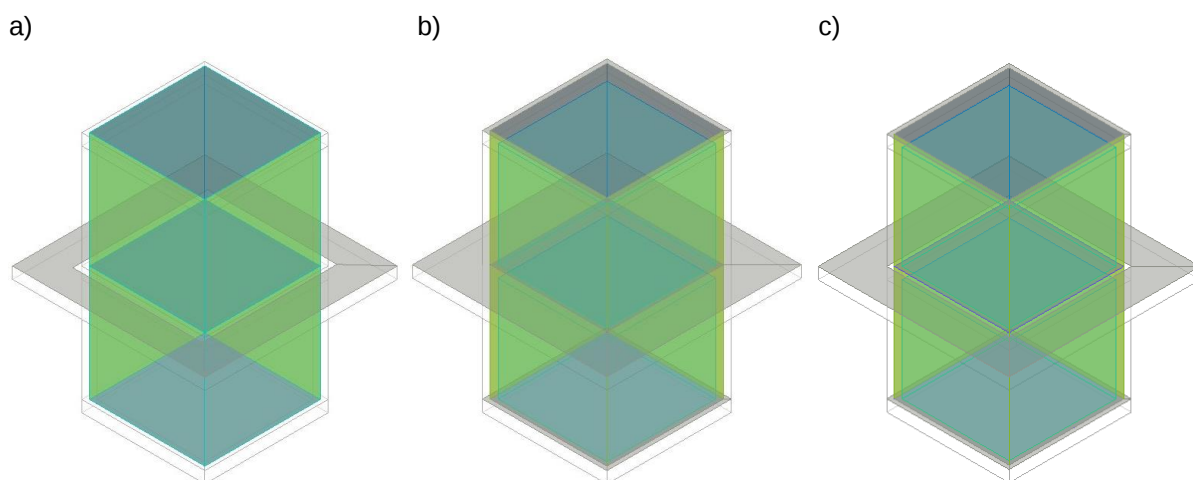


Figura 43 - Modelos analíticos exportados no Revit com sacada: a) método “*Building Elements*” considerando as três formas de modelagem da Figura 43; b) método “*Rooms or Spaces*” considerando as formas a) e b) de modelagem da Figura 43; c) método “*Rooms or Spaces*” considerando a forma c) de modelagem da Figura 43.

Fonte: Autor (2023).

4.2.14 GBXML.ORG – Caso 14 (beiral)

A presença de beirais no telhado pode apresentar diferentes funções, como controle de ventilação, proteção das paredes externas contra chuvas, bem como o sombreamento das paredes para controle solar. Sua construção geométrica se assemelha às sacadas estudadas no tópico anterior, com a diferença que os beirais se originam do prolongamento do telhado e não de pisos.

A Figura 45a demonstra a planta baixa com a projeção do telhado do modelo testado. O método “*Rooms or Spaces*” conseguiu exportar corretamente a geometria do beiral, criando geometrias de sombreamento conectadas às paredes externas (Figura 45b). O método “*Building Elements*” esbarrou nos mesmos problemas já retratados anteriormente, deixando o beiral afastado da edificação, conforme observado na Figura 45c.

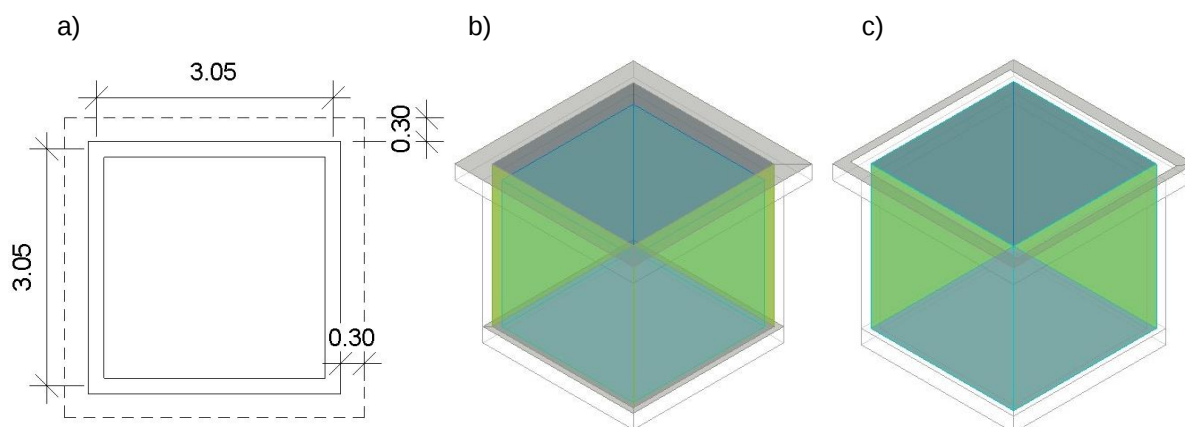


Figura 44 - Modelos analíticos exportados no Revit com beiral: a) planta baixa; b) método “Rooms or Spaces”; c) método “Building Elements”.

Fonte: Autor (2023).

4.2.15 GBXML.ORG – Caso 15 (pele de vidro)

As peles de vidro ou fachadas cortina são sistemas de fachada onde são aplicados painéis de vidro como fechamento externo, usualmente fixados em uma estrutura metálica. São bastante utilizadas em tipologias de escritórios e podem apresentar erros quando exportadas para o formato gbXML, principalmente com relação às dimensões. Nos testes realizados no Revit, o método “Rooms or Spaces” identificou corretamente a pele de vidro, mantendo uma área 2,5% menor do que a modelada. No entanto, não foi possível diferenciar painéis opacos ou a existência de aberturas na parede cortina, sendo tudo considerado uma janela única (Figura 46a). Quando for necessário um melhor detalhamento da pele de vidro no modo “Rooms or Spaces”, é possível alterar o parâmetro de complexidade de exportação para “Complex” ou “Complex with Shading”, dentro das configurações avançadas de energia. Dessa forma o Revit exporta os painéis individualmente (Figura 46b). No método “Building Elements”, mesmo com a complexidade simples de exportação, a geometria é exportada de forma separada (Figura 46c). Em ambos os modos, quando houve a diferenciação dos painéis opacos e das portas, as características térmicas dos elementos não foram interpretadas corretamente. O painel opaco foi exportado com as mesmas características da parede externa onde estava inserida a pele de vidro e a porta foi exportada com as mesmas propriedades térmicas do restante da pele de vidro.

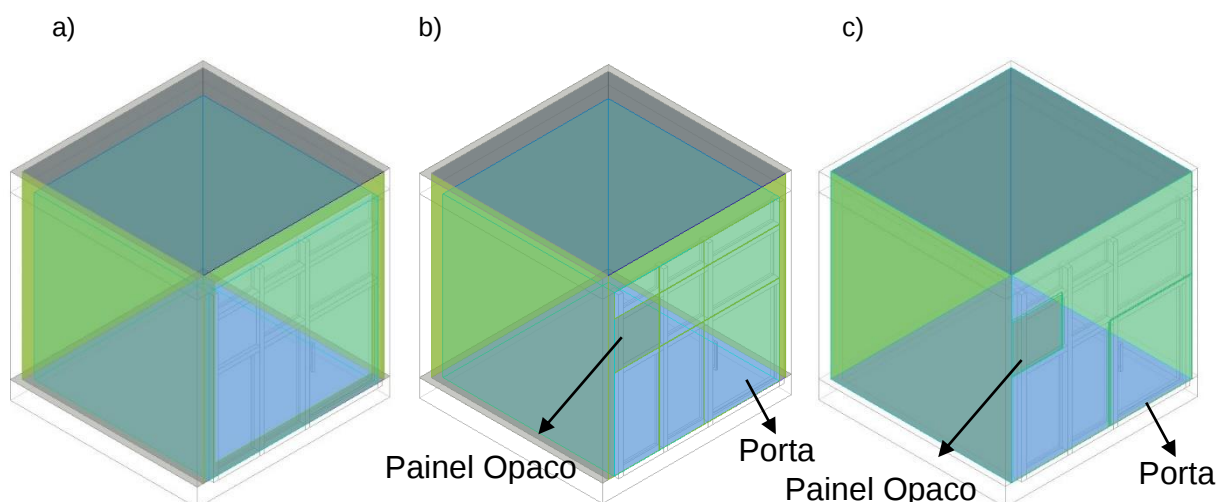


Figura 45 - Modelos analíticos exportados no Revit com pele de vidro: a) método “*Rooms or Spaces*”, complexidade de exportação “*Simple with Shadings*”; b) método “*Rooms or Spaces*”, complexidade de exportação “*Complex with Shadings*”; c) método “*Building Elements*”.

Fonte: Autor (2023).

4.2.16 GBXML.ORG – Caso 16 (abertura vertical / *shaft*)

Os *shafts* são aberturas verticais ao longo dos pavimentos da edificação e são bastante utilizados na arquitetura para viabilizar a passagem de tubulações de instalações complementares. Normalmente são espaços não climatizados e vão do pavimento térreo até o telhado. Nesse tipo de geometria é comum haver erros no momento da exportação do arquivo gbXML, com vazios e descontinuidades entre paredes, pisos e telhado. A Figura 47a ilustra o corte do modelo testado, demonstrando o espaço aberto no interior do modelo. Nos testes realizados utilizando o método “*Rooms or Spaces*” foram corretamente identificadas a abertura vertical e os espaços analíticos dos dois pavimentos (Figura 47b). No método “*Building Elements*” houve descontinuidade entre as paredes do *shaft* e as estruturas de piso e telhado, conforme Figura 47c.

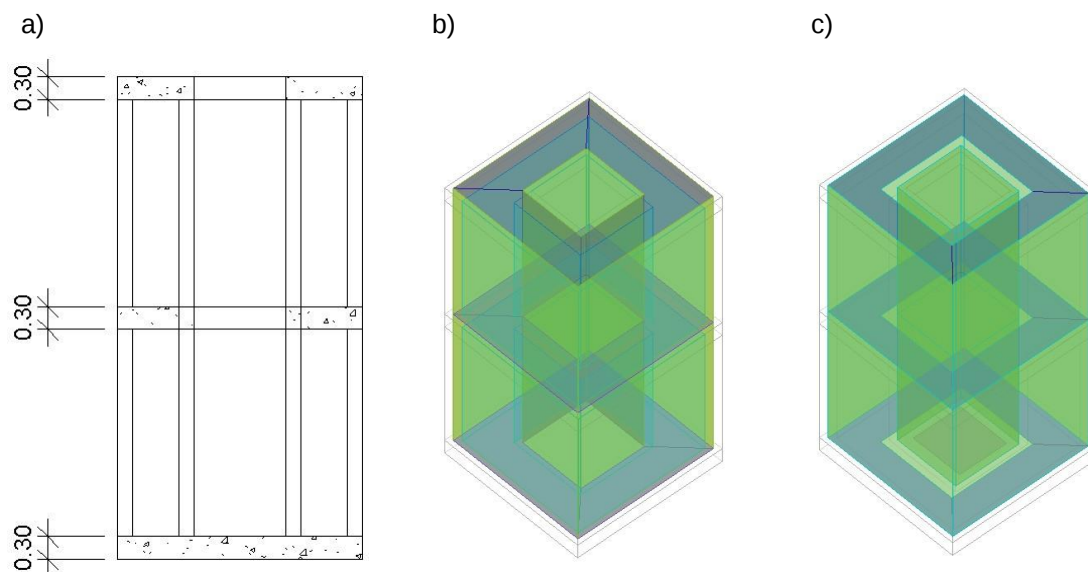


Figura 46 - Modelos analíticos exportados no Revit com abertura vertical: a) corte; b) método “*Rooms or Spaces*”; c) método “*Building Elements*”.

Fonte: Autor (2023).

4.2.17 GBXML.ORG – Caso 17 (parede curva)

As formas curvas são elementos bastante utilizados no design de edificações, podendo ser utilizadas em paredes, forros, coberturas, entre outros. Entretanto, essas geometrias são um problema para os arquivos gbXML, que representam suas superfícies a partir de vértices que são simplificados em segmentos de reta pelo seu algoritmo. Na Figura 48a pode-se observar a planta baixa do modelo testado, com uma parede externa curva de 1,52 m de raio. Os testes ratificaram a dificuldade de exportação da geometria curva. No entanto, o método “*Rooms or Spaces*” foi o que obteve o melhor desempenho, apesar de apresentar duas pequenas aberturas na geometria das superfícies, a parede curva foi subdividida em diversas superfícies retangulares (Figura 48b). Já o método “*Building Elements*” gerou um modelo com todas as superfícies desconectadas e uma simplificação da superfície curva em apenas dois planos retangulares (Figura 48c).

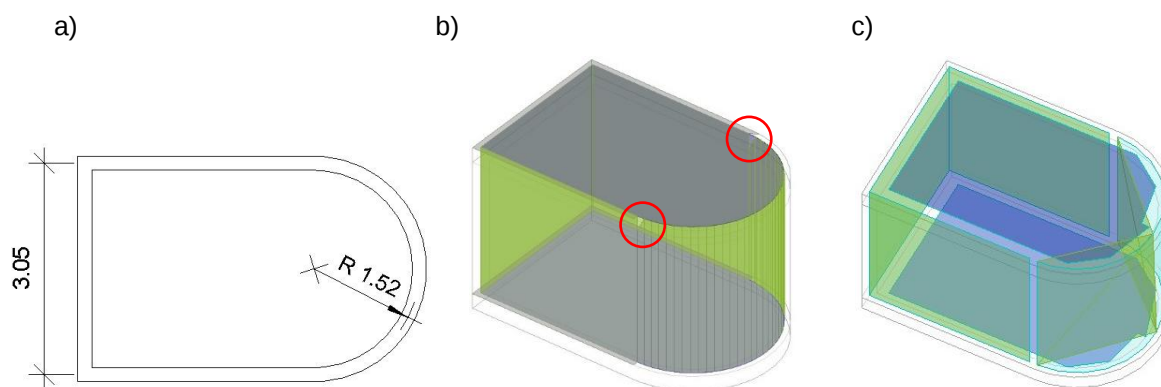


Figura 47 - Modelos analíticos exportados no Revit com parede curva: a) planta; b) método “Rooms or Spaces”; c) método “Building Elements”.

Fonte: Autor, 2023

4.2.18 GBXML.ORG – Caso 18 (moldura da janela)

Nesse teste o objetivo foi averiguar a precisão dimensional na exportação das janelas, também analisando como se comporta uma abertura com diversas divisões de caixilhos / travessas. O modelo testado apresenta uma janela de quatro caixilhos (dois de abrir e dois fixos), com 1,0 m de altura bruta por 1,0 m de largura bruta. Os resultados dentro do Revit se mostraram iguais para os dois métodos de exportação. Em ambos a janela ficou com área superficial aproximadamente 2% menor do que a modelada originalmente (Figura 49). Essa diferença se manteve quando foram testadas outras janelas com tamanhos variados.

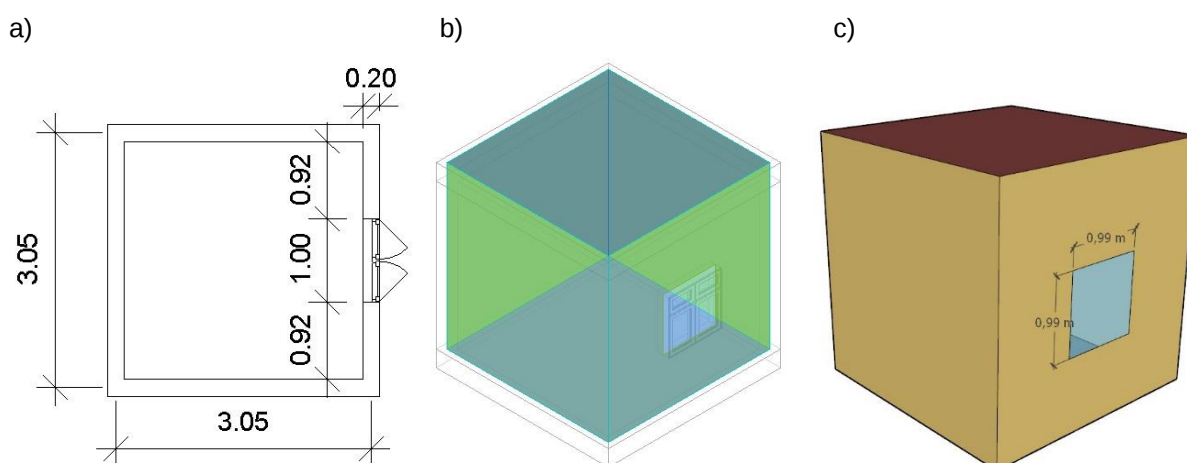


Figura 48 - Modelos analíticos exportados no Revit com janela: a) planta; b) método “Building Elements”; c) arquivo IDF gerado pelo “Systems Analysis” e aberto no Sketchup com demonstrando as dimensões da janela exportada.

Fonte: Autor (2023).

4.2.19 Análise dos resultados – Simulações Geométricas

A avaliação nesta etapa focou na construção geométrica das estruturas modeladas, descritas como superfícies e espaços analíticos. Portanto, foram criados três critérios de avaliação: Atendido Plenamente – AP, quando não são necessárias intervenções no arquivo gbXML exportado; Atendido com Ressalvas – AR, quando as estruturas foram geradas de formas correta, mas necessitam de alguma intervenção posterior no EnergyPlus / Sketchup ou quando é necessária uma modelagem específica para atingir o resultado esperado; Não Atendido – NA, quando não foi possível alcançar o resultado geométrico esperado.

A Tabela 13 apresenta a compilação dos resultados de todas as simulações geométrica realizadas no Revit para os dois métodos de exportação existentes no Revit.

Tabela 13 – Síntese dos resultados obtidos após a realização das simulações geométricas,

CASOS GBXML (2022)	“Room or Spaces” - RS	“Building Elements” - BE	OBSERVAÇÕES
01 - Paredes externas de múltiplas camadas.	AR	AR	RS e BE - Necessita a inclusão dos materiais na “ <i>construction</i> ” da parede.
02 – Separação virtual de espaços.	AP	AR	BE – Necessita ser realizada através de paredes de ar, não podendo ser modelada com separadores de espaço.
03 – Meia parede	NA	AP	RS – Necessita a substituição da superfície de sombreamento por uma parede interna no Sketchup.
04 – Forro de alturas diferentes	NA	NA	RS – Necessita a modelagem do forro a partir do centro das paredes e a exclusão de superfícies adicionais no Sketchup.
05 – Piso elevado e forro rebaixado	AP	AP	-
06 – Informações do envelope	AP	AP	-
07 – Ambiente dentro de outro ambiente	AP	AP	-
08 – Piso e forro adjacentes	AR	AR	RS e BE - Necessita a inclusão dos materiais do forro na “ <i>construction</i> ” do piso interno no EnergyPlus.
09 – Janela Interna	AP	AP	-
10 - Átrio	AP	AP	-
11 - Mansarda	NA	NA	-
12 – Ambiente côncavo	AP	NA	BE – Pequenos vazios na superfície necessitam ser corrigidos no SketchUp.
13 – Sacada	AP(*)	NA	BE – A superfície da sacada necessita ser conectada às paredes no SketchUp.

14 – Beiral	AP(*)	NA	BE – A superfície do beiral necessita ser conectada às paredes no SketchUp.
15 – Pele de vidro	AR	AR	RS e BE – Não transmitem corretamente as propriedades térmicas dos materiais quando existe diferenciação de estruturas dentro da pele de vidro.
16 – Abertura vertical / shaft	AP	NA	BE – A superfície do telhado necessita ser conectada às paredes no SketchUp.
17 – Parede curva	NA	NA	RS – Pequenos vazios na superfície necessitam ser corrigidos no SketchUp, mas o espaço analítico ficou estanque.
18 – Moldura da janela	AP	AP	RS e BE – Houve diferença de 2% na área superficial da janela, considerada irrelevante.

Legenda: AP (atendido plenamente); AR (atendido com ressalvas); NA (não atendido)

(*): Foi considerada apenas a construção geométrica das estruturas, desconsiderando as questões de sombreamento discutidas anteriormente.

Fonte: Autor (2023).

A partir dos resultados obtidos na Tabela 13 foi elaborado um gráfico comparativo dos dois métodos de exportação existentes no Revit, demonstrado na Figura 50.

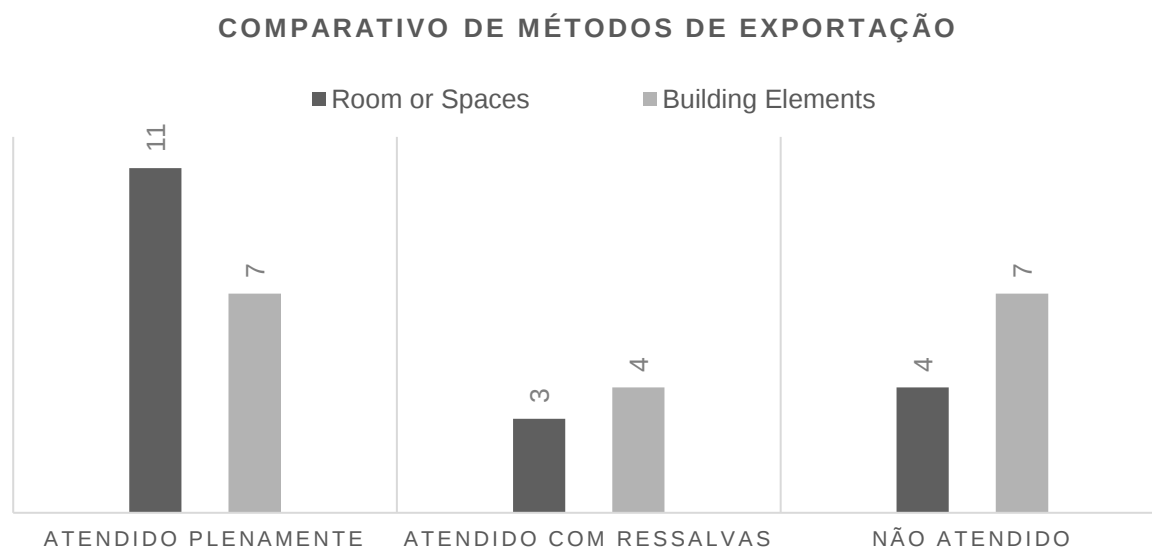


Figura 49 – Gráfico comparativo entre os métodos de exportação do Revit.

Fonte: Autor (2023).

Podemos perceber que nenhum dos métodos é capaz de atender plenamente todas as geometrias testadas. Enquanto o modo “*Room or Spaces*” conseguiu atender plenamente 61,11% dos modelos testados, o “*Building Elements*” atingiu apenas

38,88% de eficácia. No entanto, quando considerados também os casos que foram atendidos com ressalvas, o método “*Rooms or Spaces*” se mostrou mais eficaz para a resolução das geometrias, com 77,77% de eficácia contra 61,11% do método “*Building Elements*”. Somando a resolução dos dois modos de exportação, foi possível atender 83,33% dos casos. Apenas os casos 04, 11 e 17 não conseguiram ser solucionados por nenhum dos dois modos de exportação. Ressalta-se ainda que, dependendo das características do projeto analisado, é possível direcionar a análise para o método que melhor responda ao caso. Assim, mesmo apresentando problemas na exportação dos dados de infiltração do ambiente e de determinar o condicionamento artificial de todas as zonas térmicas (conforme evidenciado nas simulações de desempenho), o modo “*Room or Spaces*” foi escolhido como método de exportação padrão para as simulações para etiquetagem.

4.3 Simulações para etiquetagem

Para a realização das etiquetagens, as tipologias comerciais Pequenas Edificações, Grandes Edificações e Edificações Verticais foram classificadas como edificações de escritório, devendo obedecer aos parâmetros estabelecidos pela Tabela A.1 da INI-C (Figura 51). Para a etiquetagem do Anexo FAUrb foi considerada a Tabela A.2 da INI-C, referente às edificações de uso educacional (Figura 81).

O arquivo climático utilizado nas etiquetagens foi o desenvolvido por Leitzke *et al.* (2018) para a cidade de Pelotas. A modelagem dos materiais das quatro edificações considerou a utilização de camadas equivalentes para os blocos cerâmicos vazados, conforme Martín *et al.* (2003). Devido às incertezas relacionadas à melhor forma de modelagem das edificações (utilizando limites externos, internos ou centrais) optou-se pela criação de dois modelos de controle, um considerando as medidas internas das zonas térmicas e outro considerando os limites externos. Para as paredes internas foi considerada a linha central para ambos os casos.

4.3.1 Tipologias Comerciais (escritório)

Antes de iniciar a modelagem das edificações dentro do Revit foi elaborado um arquivo *template* que serviu de base para a criação de todos os modelos comerciais

a serem testados. Primeiramente, foi ajustada a localização para a cidade de Pelotas/RS e alterada a configuração de “*Areas and Volumes Computations*” para também considerar o cálculo de volume. Nas configurações de energia foi escolhido o método “*Rooms or Spaces*” e nas configurações avançadas foram selecionados os “*Spaces*” como a categoria de exportação, assim como foi marcada a opção para utilizar elementos detalhados. Considerando que nenhuma das tipologias de Melo (2012) apresenta dispositivos de sombreamento, também foi alterada a complexidade de exportação para “*Simple*”, evitando assim a criação das pequenas superfícies de sombreamento citadas anteriormente na descrição do caso 600.

O próximo passo foi definir as estruturas construtivas que seriam utilizadas nos modelos reais e de referência. Para os modelos reais optou-se pela utilização de materiais usualmente aplicados nas construções da cidade de Pelotas, sendo utilizado o bloco cerâmico de 14x19x24 cm deitado com revestimento argamassado dos dois lados para as paredes externas, telha metálica do tipo sanduíche sobre laje de concreto armado para a cobertura e esquadrias externas com vidros duplos. Tanto os pisos externos como os internos tiveram a mesma construção nos modelos reais e de referência, com laje de concreto, contrapiso e piso cerâmico. Para o modelo de referência foi considerado o bloco cerâmico de 9x14x19 cm à cutelo com reboco em ambas as faces e cobertura de telha de fibrocimento sobre laje de concreto armado, conforme estipulado na Tabela A.1 da INI-C para edificações de escritório (Figura 51).

Tabela A.1 – Valores de referência para edificações de escritório

Uso típico	Edificações de escritórios	
	Condição real	Condição de referência
Geometria		
Área (m ²)		Condição real
Orientação solar		Condição real
Pé-direito (piso a teto) (m)		Condição real
Aberturas		
PAF - Percentual de área de abertura da fachada (%)	Condição real	50 (0,50)
Componentes construtivos		
Parede	Condição real	Argamassa interna (2,5 cm), bloco cerâmico furado (9 cm), argamassa externa (2,5 cm)
Up _{par} - Transmitância da parede externa (W/(m ² .K))	Condição real	2,39
α _{PAR} - Absortância da parede (adimensional)	Condição real	0,5
CT _{par} - Capacidade térmica da parede externa (kJ/(m ² .K))	Condição real	150
Cobertura	Condição real	Telha de fibrocimento, câmara de ar (>5 cm) e laje maciça de concreto (10 cm)
U _{cob} - Transmitância da cobertura (W/(m ² .K))	Condição real	2,06
α _{COB} - Absortância da cobertura (adimensional)	Condição real	0,8
CT _{cob} - Capacidade térmica da cobertura (kJ/(m ² .K))	Condição real	233
Vidro	Condição real	Vidro simples incolor 6mm
FS – Fator solar do vidro (adimensional)	Condição real	0,82
U _{vid} - Transmitância do vidro (W/(m ² .K))	Condição real	5,7
AHS - Ângulo horizontal de sombreamento (°)	Condição real	0
AVS - Ângulo vertical de sombreamento (°)	Condição real	0
AOV - Ângulo de obstrução vizinha (°)*		Condição real
Iluminação e ganhos internos		
DPI - Densidade de potência de iluminação (W/m ²)	Condição real	14,1**
Ocupação (m ² /pessoa)		10,0
DPE - Densidade de potência de equipamentos (W/m ²)*		15,0
Horas de ocupação (horas)		10
Dias de ocupação (N _{ano})*		260
Situação do piso		Condição real
Situação da cobertura		Condição real
Isolamento do piso	Condição real	Sem isolamento
Condicionamento de ar (refrigeração)		
COP - Coeficiente de performance (W/W)	Condição real	2,60
Temperatura setpoint (°C)*		24,0
Aquecimento de água*****		-

Figura 50 – Valores de referência para edificações de escritório extraídas da INI-C.

Fonte: Adaptado de Brasil (2022).

A partir da biblioteca de materiais do programa foram criados treze materiais diferentes para compor as estruturas da edificação. Foram alterados os parâmetros de condutividade térmica, densidade e calor específico, deixando os demais parâmetros com os valores padrão do Revit.

Considerando que a INI-C estipula transmitâncias específicas para as paredes externas e para a cobertura da edificação de referência, e sabendo que o Revit calcula resistência térmica e a capacidade térmica das estruturas baseado nas espessuras das camadas (sem considerar as resistências superficiais), foi realizado um cálculo

para isolar a resistência térmica das estruturas (paredes externas e cobertura) através da equação:

$$R_t = \frac{1}{U} - R_{si} - R_{se}$$

Onde:

R_t = resistência térmica da parede / cobertura

U = transmitância térmica da parede / cobertura

R_{si} = resistência térmica superficial interna = 0,13 (ABNT, 2022)

R_{se} = resistência térmica superficial externa = 0,04 (ABNT, 2022)

A partir da obtenção das resistências dos componentes foi possível calcular as espessuras equivalentes dos blocos cerâmicos e das camadas de ar, bem como as densidades equivalentes dos blocos cerâmicos de referência e real. Para o cálculo da resistência das camadas de ar equivalentes do tijolo e da cobertura foi determinada a espessura da camada de ar e estipulada uma condutividade térmica que resultasse nos valores de resistência térmica do ar previstos na NBR 15220-2 (ABNT, 2022).

Nas Tabelas 14 e 15 podem ser observados os atributos dos materiais criados para o modelo real e de referência, respectivamente.

Tabela 14 – Relação de materiais utilizados na modelagens dos modelos reais.

Materiais (real)	Espessura (m)	Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m³]	Calor específico [J/kg.K]
Reboco	0,0250	1,15	1850	1000
Bloco cerâmico Real (25cm) - equivalente	0,0923	0,90	675	920
Camada de ar bloco Real (25cm) – equivalente*	0,0154	0,0963	0,01	1000
Concreto armado	0,1000	1,75	2240	1000
Argamassa contrapiso	0,0400	1,15	1850	1000
Piso cerâmico	0,0100	1,05	2000	920
Camada de ar > 30cm Real **	0,0980	0,4667	0,01	1000
EPS	0,0300	0,04	35	1420
Zinco	0,0010	112	7100	380

Fonte: Autor (2023).

* A resistência térmica da Camada de ar bloco Real (25cm) equivalente = $e / \lambda = 0,16 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$.

** A resistência térmica da Camada de ar > 30 cm Real = $e / \lambda = 0,21 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$.

Tabela 15 - Relação de materiais utilizados na modelagens dos modelos de referência.

Materiais (referência)	Espessura (m)	Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m³]	Calor específico [J/kg.K]
Reboco	0,0250	1,15	1850	1000
Bloco cerâmico REF (14cm) - equivalente	0,0203	0,90	1547	920
Camada de ar bloco REF (14cm) – equivalente*	0,0494	0,3088	0,01	1000
Concreto armado	0,1000	1,75	2240	1000
Argamassa contrapiso	0,0400	1,15	1850	1000
Piso cerâmico	0,0100	1,05	2000	920
Camada de ar > 30cm REF**	0,0740	0,3524	0,01	1000
Fibrocimento	0,0060	0,80	1800	840

Fonte: Autor (2023).

* A resistência térmica da Camada de ar bloco REF (14cm) equivalente = $e / \lambda = 0,16 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$.

** A resistência térmica da Camada de ar > 30 cm REF = $e / \lambda = 0,21 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$.

A parede de referência foi modelada com cinco camadas, utilizando os materiais indicado na Tabela 15. A Figura 52 demonstra a interface de construção dessa parede no Revit.

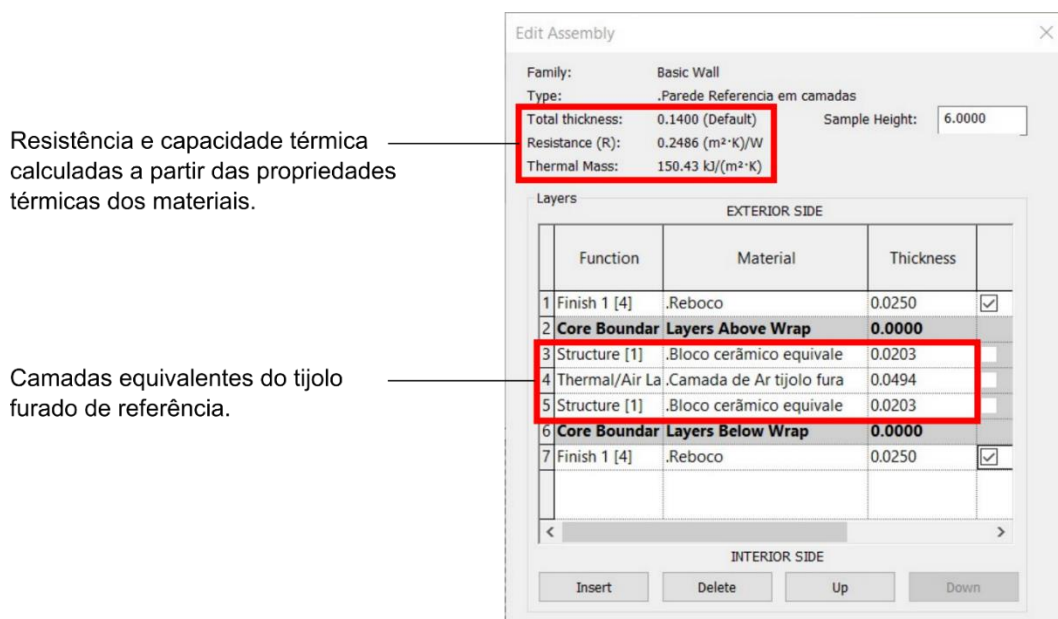


Figura 51 – Modelagem da parede de referência dentro do Revit.

Fonte: Autor (2023).

As coberturas foram modeladas de forma plana, utilizando a estrutura construtiva de telhado. A cobertura real foi dividida em cinco camadas: telha de zinco; EPS; telha de zinco; camada de ar maior que 5cm; laje de concreto armado. Já a cobertura de referência foi dividida em três camadas: telha de fibrocimento; camada de ar maior que 5cm; laje de concreto armado (Figura 53). Também foram configurados dois tipos de piso, um com função exterior e outro com função interior.

Ambos constituídos de três camadas: piso cerâmico; contrapiso; laje de concreto armado.

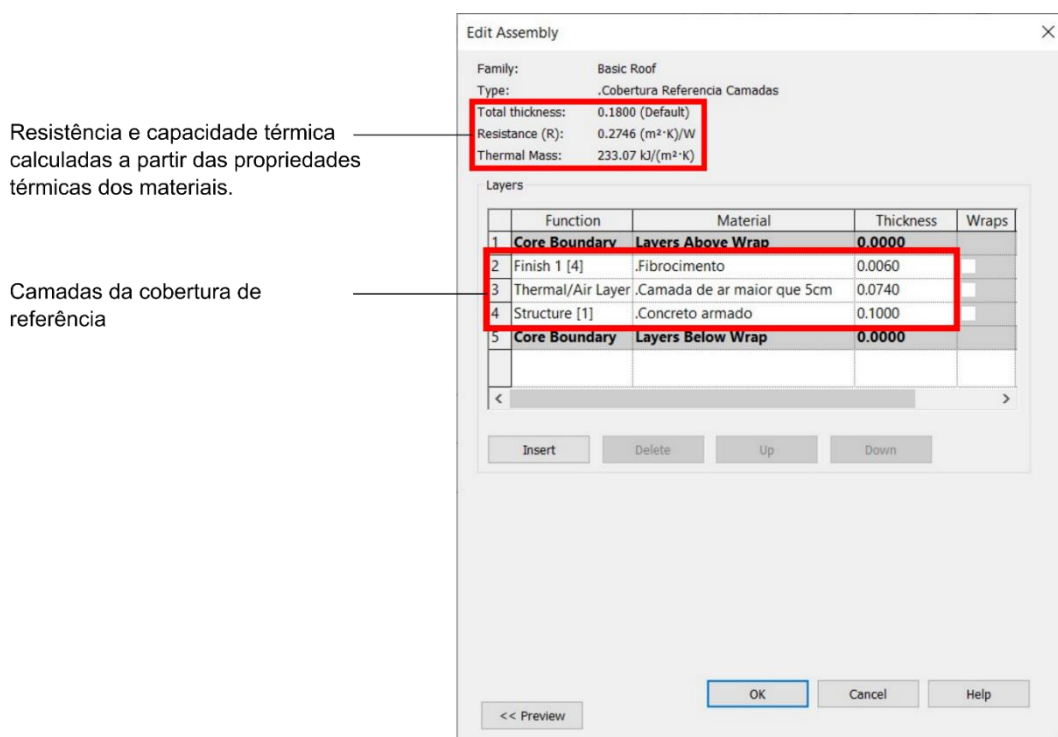


Figura 52 – Modelagem da cobertura de referência dentro do Revit.

Fonte: Autor (2023).

Por último, foram configuradas as janelas externas utilizando uma família pertencente ao arquivo *template* de arquitetura do Revit. Para as janelas externas do modelo real foi utilizada uma configuração de esquadria já existente no programa, com vidro duplo, chamada “*Double glazing – domestic*”. Para o modelo de referência as propriedades da esquadria foram definidas a partir do “*User Defined*”, conforme Figura 54.

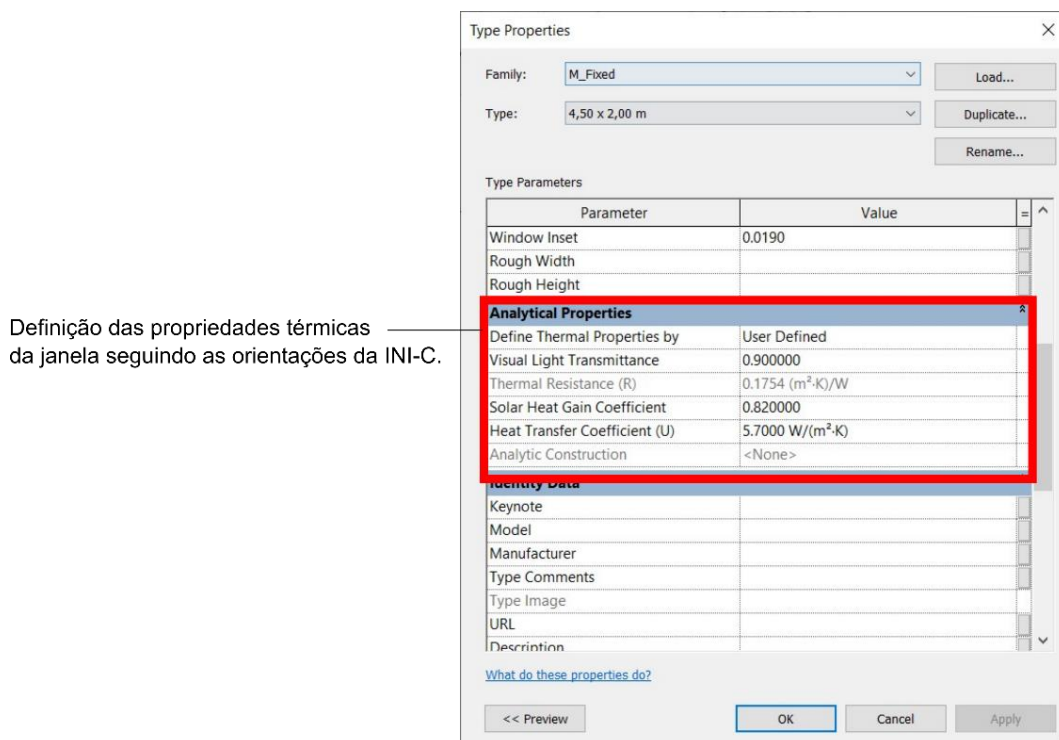


Figura 53 – Modelagem do vidro de referência dentro do Revit.

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 16 demonstra os valores utilizados nas modelagens realizadas para os modelos reais e de referência das edificações de escritório:

Tabela 16 – Síntese da propriedades térmicas dos componentes utilizados nas simulações.

PROPRIEDADES TÉRMICAS	Parede Externa		Cobertura		Vidro Externo	
	Ref.	Real	Ref.	Real	Ref.	Real
Resistência térmica (m².K/W)	0,2486	0,4086	0,2746	1,0171	-	-
Capacidade térmica (kJ/m².K)	150,28	207,14	233,07	230,89	-	-
Transmitância térmica (W/m².K)	2,39	1,73	2,06	0,81	5,70	3,13

Fonte: Autor (2023).

4.3.1.1 Pequenas Edificações

A tipologia Pequenas Edificações possui dois pavimentos de 5 x 6 metros com pé-direito de 3 metros. Com o objetivo de manter a área de piso independente da espessura das paredes externas utilizadas, a modelagem no Revit foi realizada a partir das medidas internas. Também foram adicionadas janelas de diferentes dimensões nas quatro fachadas dos dois pavimentos, como pode ser observado na Figura 55.

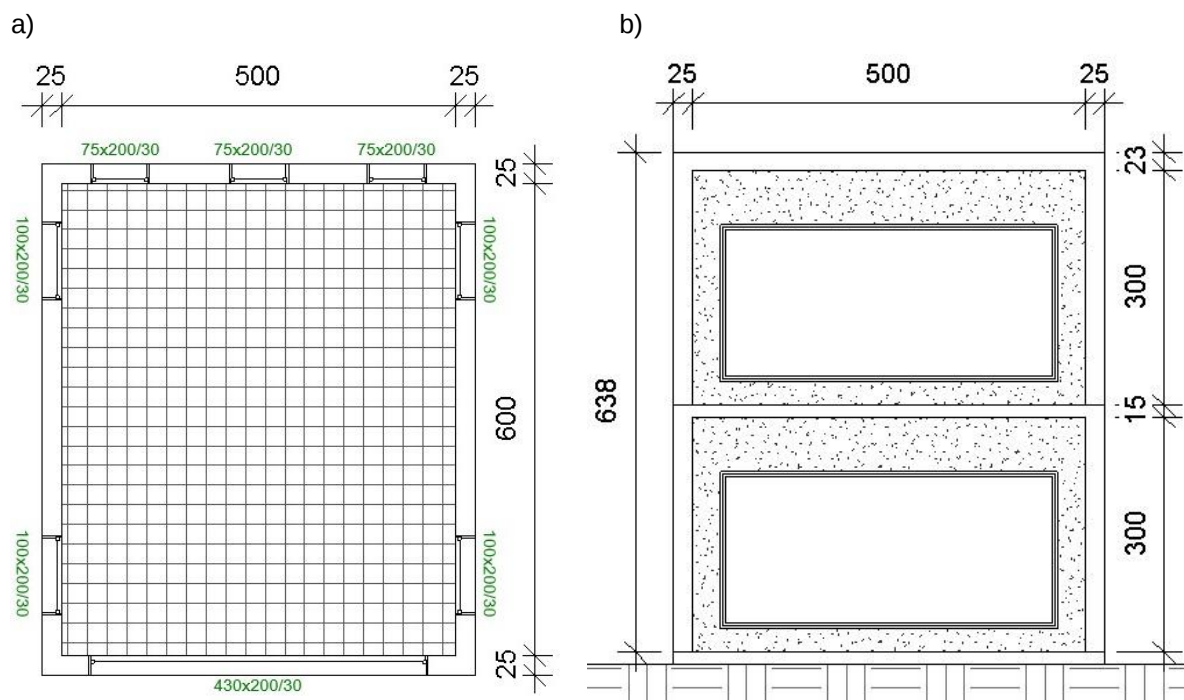


Figura 54 – Modelo Pequenas Edificações: a) planta baixa; b) corte.

Fonte: Autor (2023).

Em cada ambiente foram criados “Spaces” onde foram configurados os parâmetros de uso definidos pela INI-C para ambientes de escritório para a realização da simulação, conforme Figura 56. Após a finalização da modelagem, foi gerado o modelo analítico e realizada a simulação através da ferramenta “Systems Analysis”.

Parameter	Value	
Energy Analysis		
Area per Person	10.000 m ²	Ocupação
Sensible Heat Gain per person	75.00 W	Calor liberado por pessoa (NBR 16401)
Latent Heat Gain per person	55.00 W	
Lighting Load Density	14.10 W/m ²	Densidade de potência de iluminação
Power Load Density	15.00 W/m ²	Densidade de potência de equipamentos
Infiltration Airflow per area	0.00 L/(s·m ²)	Taxa de infiltração de ar
Plenum Lighting Contribution	0.0000%	
Occupancy Schedule	On - 8 AM to 6 PM	
Lighting Schedule	On - 8 AM to 6 PM	Agendas de uso 10 horas
Power Schedule	On - 8 AM to 6 PM	
Outdoor Air per Person	0.00 L/s	
Outdoor Air per Area	0.00 L/(s·m ²)	Taxa de ventilação externa
Air Changes per Hour	0.000000	
Outdoor Air Method	by People and by Area	
Heating Set Point	22.00 °C	
Cooling Set Point	24.00 °C	Setpoint do ar condicionado
Humidification Set Point	0.0000%	
Dehumidification Set Point	70.0000%	

Figura 55 – Parâmetros de configuração utilizados para as tipologias de escritório.

Fonte: Autor (2023).

Para a modelagem da edificação de referência foram alteradas as paredes externas, o tipo de cobertura e o percentual de aberturas foi calculado para cobrir 50% das fachadas. O restante das características construtivas se manteve inalterada. Na Figura 57 são demonstrados os modelos analíticos gerados para a edificação real e para a de referência.

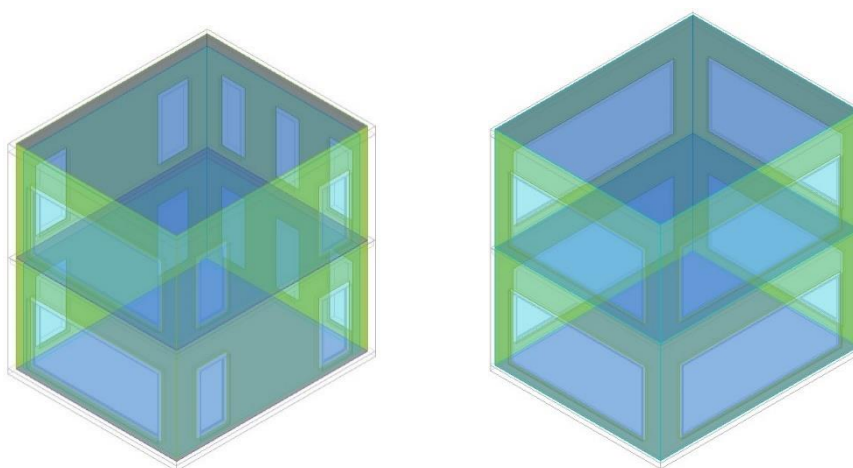


Figura 56 – Modelos de energia gerados pelo Revit para Pequenas Edificações: a) modelo de energia da edificação real; b) modelo de energia da edificação de referência.

Fonte: Autor (2023).

A avaliação preliminar do Relatório de Análise gerado pela ferramenta indicou que o arquivo climático utilizado pelo Revit foi o de Mello, Uruguai, por não possuir o arquivo de Pelotas em seu banco de dados. Também foi possível observar que os dados utilizados nas configurações de espaço e as propriedades térmicas dos materiais foram corretamente interpretadas.

Para a execução da análise comparativa dos resultados obtidos foram definidos dois estágios de análise para os modelos criados no Revit e dois métodos de modelagem para os arquivos criados no Sketchup. A Tabela 17 detalha as quatro abordagens realizadas em cada modelo.

Tabela 17 – Abordagens utilizadas para a criação dos modelos no Revit e no Sketchup.

	Modelos	Sigla	Parâmetros / Intervenções
REVIT	Original	REV_01	Alteração do arquivo climático e dos dias típicos para a cidade de Pelotas/RS;
	Correção	REV_02	Compatibilização de todas as pré-configurações e dados do Revit, deixando o IDF idêntico ao gerado pelo Sketchup;
SKETCHUP	Medidas Internas	SMI	Modelagem da edificação a partir das medidas internas das zonas térmicas, priorizando manter correto o volume de ar interno das zonas; Alteração das absorvâncias dos materiais conforme gerado pelo Revit;

Medidas
Externas

SME

Modelagem da edificação a partir das medidas externas das zonas térmicas, priorizando manter correta a volumetria externa da edificação; Alteração das absorptâncias dos materiais conforme gerado pelo Revit;

Fonte: Autor (2023).

Inicialmente foi realizada uma análise entre as cargas térmicas geradas por cada modelo para as edificações reais e de referência. Nesse comparativo foram descartados os resultados dos modelos originais (REV_01) devido às grandes distorções existentes causadas pelas agendas de utilização. Nos modelos de referência é possível observar que o modelo SMI_REF apresentou os menores valores nominais, justamente por apresentar menores dimensões. Já os modelos SME_REF e REV_02_REF apresentaram uma variação de 60,4 kWh/ano (8,5%) entre as cargas térmicas de aquecimento, 101,81 kWh/ano (1,5%) nas de resfriamento, e 41,41 kWh/ano (0,6%) na carga total (Figura 58).

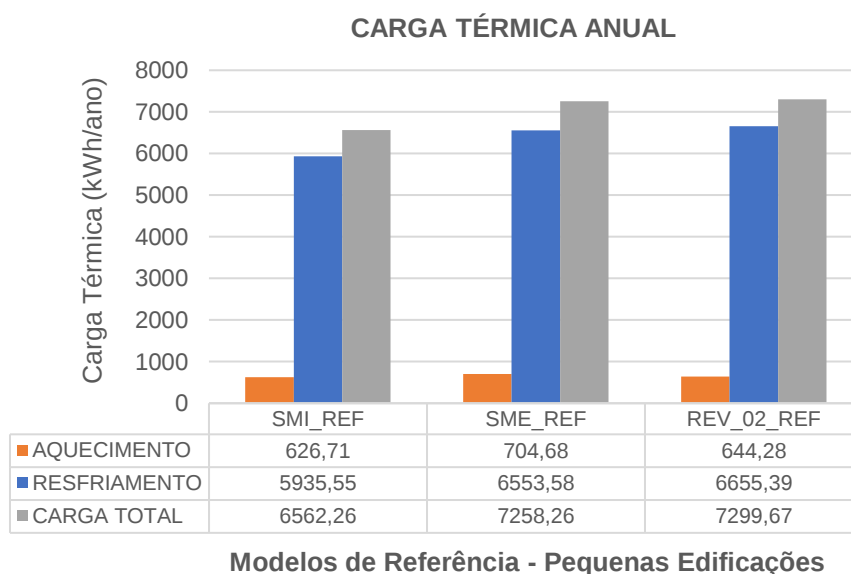


Figura 57 – Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais para os modelos de referência: Pequenas Edificações.

Fonte: Autor (2023).

No entanto, quando consideradas as cargas térmicas por metro quadrado de área condicionada foram os modelos do Sketchup que apresentaram maior proximidade nos valores. O modelo REV_02_REF apresentou uma diferença na carga térmica total de aproximadamente 5,7% em relação aos demais (Figura 59).

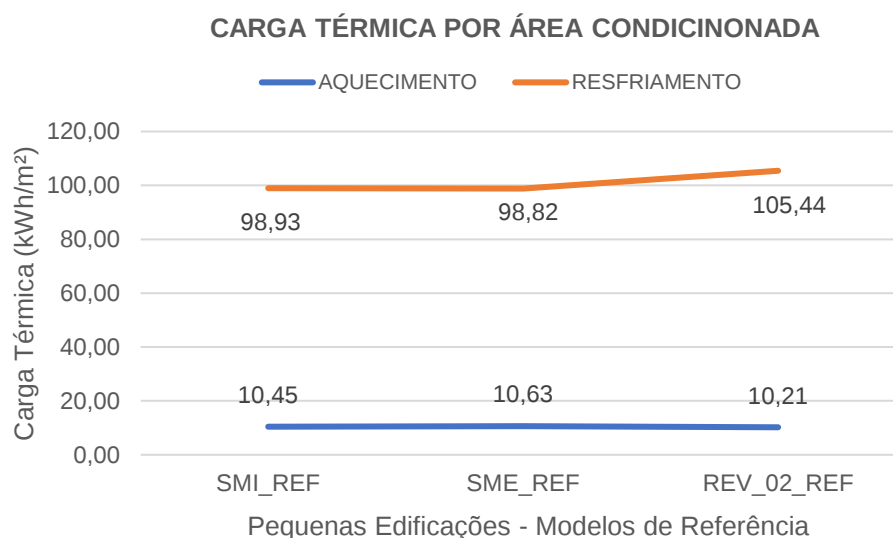


Figura 58 - Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais por área condicionada para os modelos de referência: Pequenas Edificações.

Fonte: Autor (2023).

Foi realizada a mesma análise para os modelos reais e a tendência se repetiu, com o modelo SMI_REAL apresentando os valores nominais mais discrepantes. Ao se comparar os modelos SME_REAL e REV_02 a variação foi ligeiramente diferente, ficando em 9,16 kWh/ano (2,3%) nas cargas térmicas de aquecimento, 1,18 kWh/ano (0,02%) nas de resfriamento, e 10,34 kWh/ano (0,2%) na carga total (Figura 60).

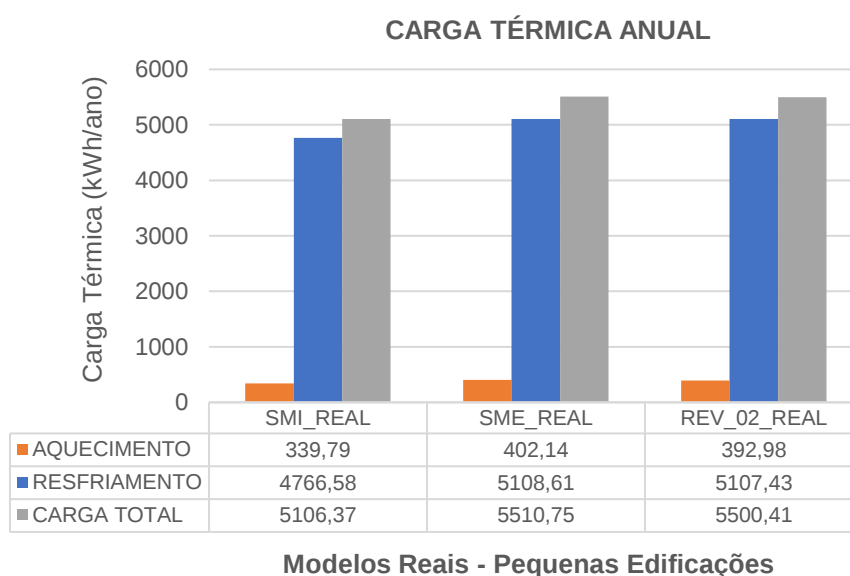


Figura 59 – Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais para os modelos reais: Pequenas Edificações.

Fonte: Autor (2023).

Na Figura 61 é possível observar que, ao contrário dos modelos de referência, na comparação de carga térmica por área dos modelos reais, o modelo REV_02_REAL obteve o menor resultado, ficando muito próximo do modelo SEM_REAL (0,04% de diferença na carga térmica total).

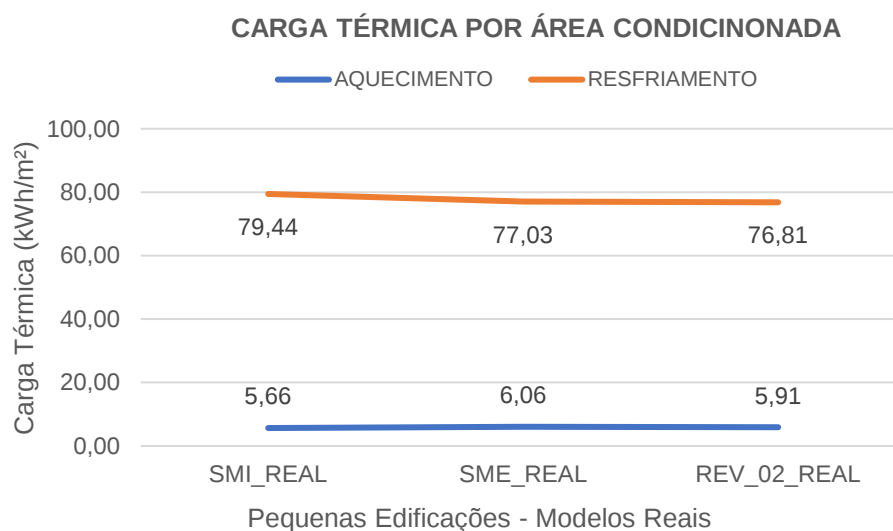


Figura 60 - Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais por área condicionada para os modelos de reais: Pequenas Edificações.

Fonte: Autor (2023).

Os modelos REV_02 tiveram todos os dados e configurações do arquivo IDF gerados pelo Revit compatibilizados em relação aos modelos criados pelo autor no Sketchup. Dessa forma, os resultados comparativos entre os modelos SMI, SME e REV_02 refletem exatamente o impacto das pequenas diferenças geométricas existentes entre eles. Pode-se observar que para uma edificação de pequeno porte a forma de exportação do modo “*Rooms or Spaces*” se assemelha a uma modelagem por limites externos.

Após essa análise preliminar, cada modelo teve sua envoltória etiquetada a partir do método de simulação considerando o percentual de redução de carga térmica entre a edificação de referência e a real. A Figura 62 demonstra as diferenças de entre as cargas térmicas totais de referência e reais e destaca a variação percentual das cargas térmicas nos modelos estudados e a Tabela 18 ilustra as etiquetas obtidas para as envoltórias simuladas.

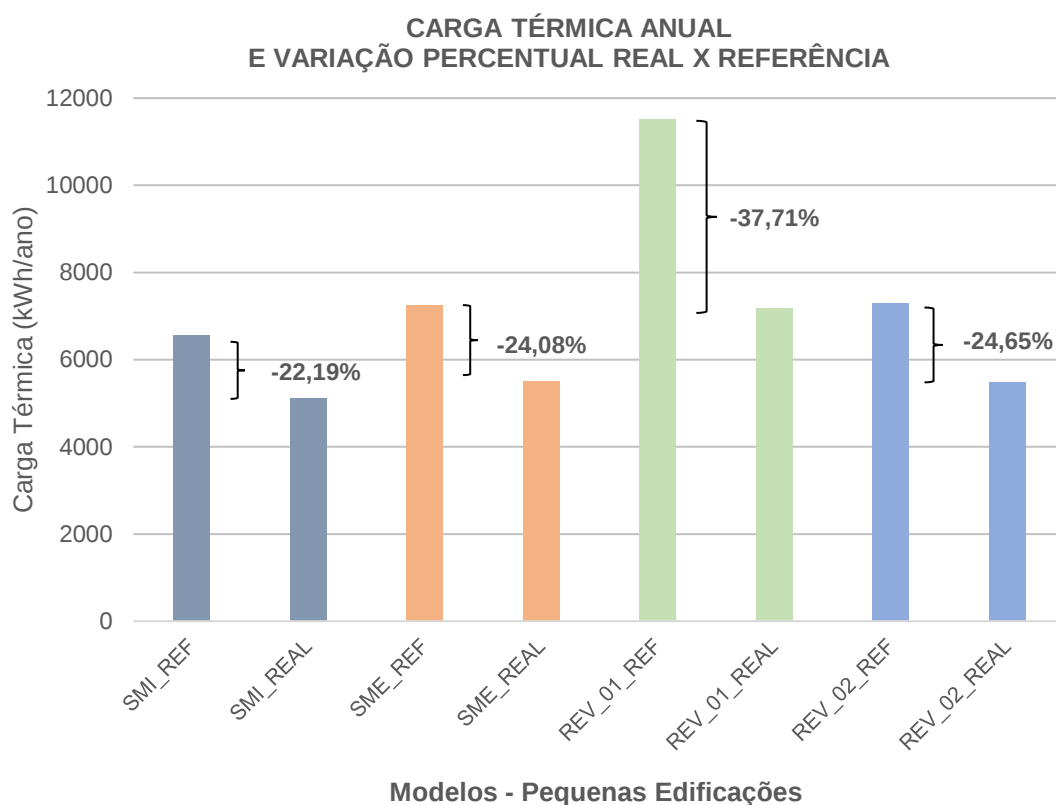


Figura 61 – Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais e variação percentual de redução das cargas térmicas entre os modelos reais e de referência: Pequenas Edificações.

Fonte: Autor (2023).

Tabela 18 – Tabela de classificação energética dos modelos reais: Pequenas Edificações.

	SMI	SME	REV_01	REV_02
ENCE ENVOLTÓRIA	B	B	A	B
	3i%≥RedCgTT>2i%	3i%≥RedCgTT>2i%	RedCgTT>3i%	3i%≥RedCgTT>2i%

Fonte: Autor (2023).

É possível observar que o modelo REV_01 foi o único que obteve uma etiqueta diferente, com uma variação percentual de carga térmica acima de 13% em relação aos demais. Também ficou evidenciado que após a correção das agendas o modelo gerado pelo *Systems Analysis* se comportou de maneira muito próxima aos elaborados no Sketchup pelo autor, com todos obtendo a etiqueta “B” para a envoltória. Apesar de o modelo SMI apresentar variações na ordem de 10% e 15% nas cargas térmicas de resfriamento e aquecimento em relação aos demais, quando foram comparadas as variações entre os modelos reais e de referências, a diferença máxima foi de 2,46%. Ainda assim, os modelos SME e REV_02 foram os que apresentaram resultados mais próximos, com 0,57% de diferença.

4.3.1.2 Grandes Edificações

A tipologia Grandes Edificações possui três pavimentos de 30 x 50 metros com pé-direito de 5 metros. Novamente a modelagem foi realizada considerando as dimensões como medidas internas e foram adicionadas três variáveis geométricas para serem testadas: divisão virtual das zonas térmicas, forro rebaixado e piso elevado. Foram criadas duas zonas no térreo, uma zona no segundo pavimento e seis zonas no terceiro. As divisões virtuais das zonas térmicas foram geradas através de separadores de espaço. Tanto o forro como o piso elevado foram criados a partir dos limites internos de acabamento das paredes. Também foram adicionadas janelas de diferentes dimensões nas quatro fachadas de todos os pavimentos, como pode ser observado na Figura 63.

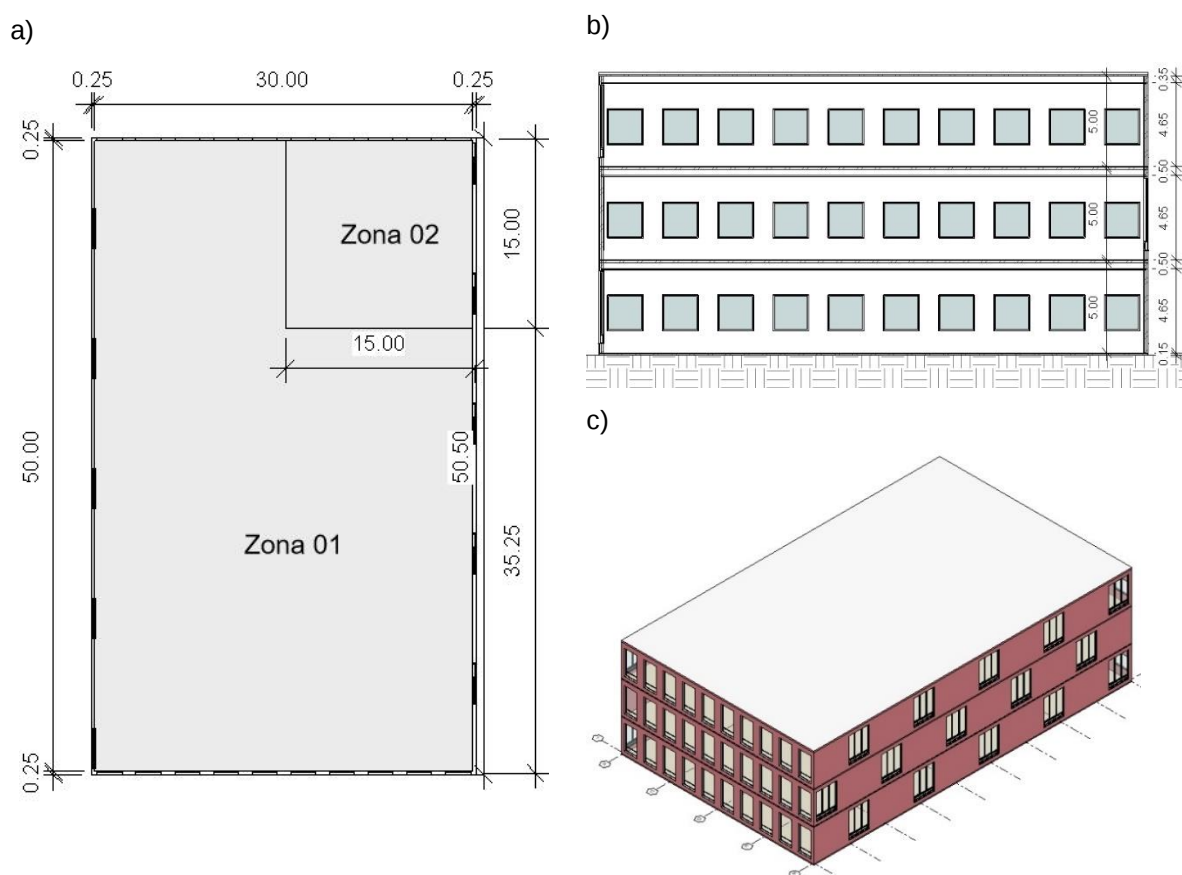


Figura 62 - Modelo Grandes Edificações: a) planta baixa; b) corte; c) Perspectiva.

Fonte: Autor (2023).

A configuração dos parâmetros de espaço foi a mesma utilizada na tipologia Pequenas Edificações, bem como os materiais construtivos da edificação real e de

referência. Também foram incluídos espaços nos vazios dos forros e dos pisos elevados, sendo caracterizados como “*Plenum*”, não ocupados.

O modelo analítico gerado apresentou pequenas inconsistências na geometria das zonas do piso elevado do segundo e terceiro pavimentos, com a criação de paredes internas sobrepostas às paredes externas. Mesmo com diversas tentativas de resolver os erros dentro do Revit, não foi encontrada uma solução adequada. Também foi constatado que, diferentemente do que acontece no modo “*Building Elements*”, o IDF gerado pelo modo “*Rooms or Spaces*” não reconhece as zonas não ocupadas, criando objetos de condicionamento de ar para todas as zonas existentes. Em razão disso, as simulações realizadas com o *Systems Analysis* utilizando os dois modos de exportação apresentaram resultados totalmente distintos. Enquanto no modo “*Rooms or Spaces*” houve um consumo total de 9.818 MWh/ano, no modo “*Building Elements*” o consumo foi de 926 MWh/ano, aproximadamente 90% menor (Figura 64).

a)		b)	
End Use	Consumption (kWh)	End Use	Consumption (kWh)
Heating	255,264	Heating	25,533
Cooling	9,066,714	Cooling	602,886
Interior Lighting	240,783	Interior Lighting	144,469
Exterior Lighting	0	Exterior Lighting	0
Interior Equipment	256,153	Interior Equipment	153,692
Exterior Equipment	0	Exterior Equipment	0
Fans	0	Fans	0
Pumps	0	Pumps	0
Heat Rejection	0	Heat Rejection	0
Humidification	0	Humidification	0
Heat Recovery	0	Heat Recovery	0
Water Systems	0	Water Systems	0
Refrigeration	0	Refrigeration	0
Generators	0	Generators	0

Figura 63 – Comparativo de consumo anuais gerado pelo *Systems Analysis* nos modos: a) “*Rooms or Spaces*”; b) “*Building Elements*”.

Fonte: Autor (2023).

Apesar das inconsistências geométricas observadas serem passíveis de correção no Sketchup, optou-se por analisar apenas modelos que pudessem ter suas geometrias corrigidas dentro do Revit, sendo descartado o uso de piso elevado. Dessa forma, foi criado o modelo analítico para a tipologia Grandes Edificações apenas com zonas térmicas virtuais e forro rebaixado, sendo que o forro precisou ser modelado a partir do eixo das paredes para ser corretamente exportado, conforme Figura 65.

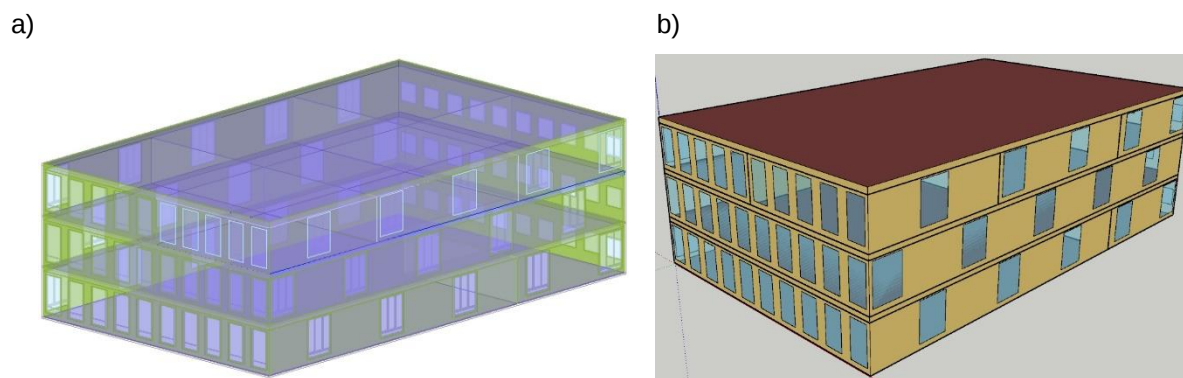


Figura 64 – Modelos analíticos para a tipologia Grandes Edificações: a) modelo criado dentro do Revit no modo “*Rooms or Spaces*”; b) arquivo IDF criado pelo *Systems Analysis* e visualizado no Sketchup, através do *plug-in* Euclid.

Fonte: Autor (2023).

Assim como nas Pequenas Edificações, o Revit utilizou o arquivo climático, errado, precisando ser corrigido. Os dados utilizados nas configurações de espaço e as propriedades térmicas dos materiais novamente foram corretamente interpretadas.

Para a execução da análise comparativa dos resultados foram utilizadas as quatro abordagens constantes na Tabela 17. A primeira análise comparou as cargas térmicas geradas por cada modelo para as edificações reais e de referência. Novamente foram descartados os resultados dos modelos originais (REV_01) devido às grandes distorções existentes causadas pelas agendas de utilização e o condicionamento das zonas não ocupadas. Nesse caso, o modelo que apresentou resultados mais discrepantes foi o SME. Nos modelos de referência, com exceção das cargas de aquecimento, o modelo REV_02 ficou dentro do intervalo estabelecido pelos modelos SMI e SME. É possível observar uma variação de 1.202,37 kWh/ano (19,6%) nas cargas de aquecimento, 2.484,40 kWh/ano (0,6%) nas de resfriamento, e 1.282,03 kWh/ano (0,3%) na carga total quando comparados os modelos SMI e REV_02 (Figura 66).

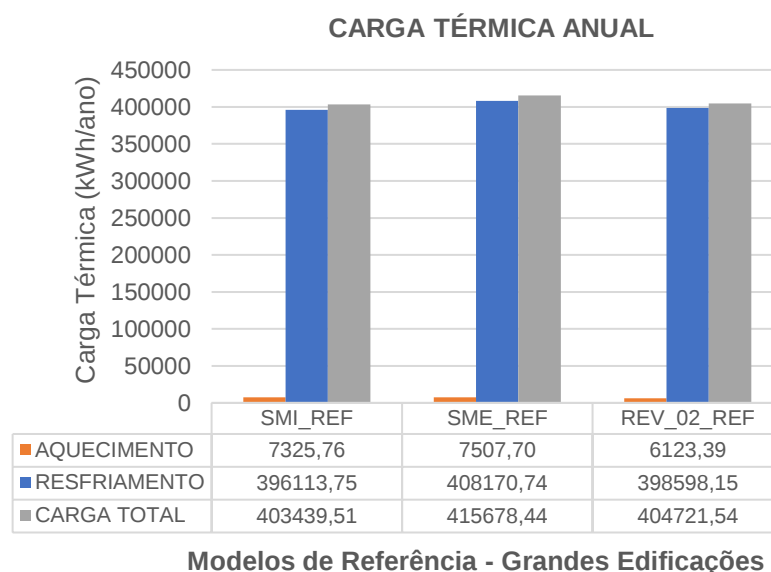


Figura 65 - Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais para os modelos de referência: Grandes Edificações.

Fonte: Autor (2023).

O gráfico ilustrado na Figura 67, de carga térmica por área, permite observar a linearidade tanto das cargas de resfriamento como das cargas de aquecimento. Enquanto nas cargas de resfriamento houve uma variação de 0,41 kWh/m² entre as cargas máximas e mínimas, nas de aquecimento a variação foi de 0,27kWh/m².

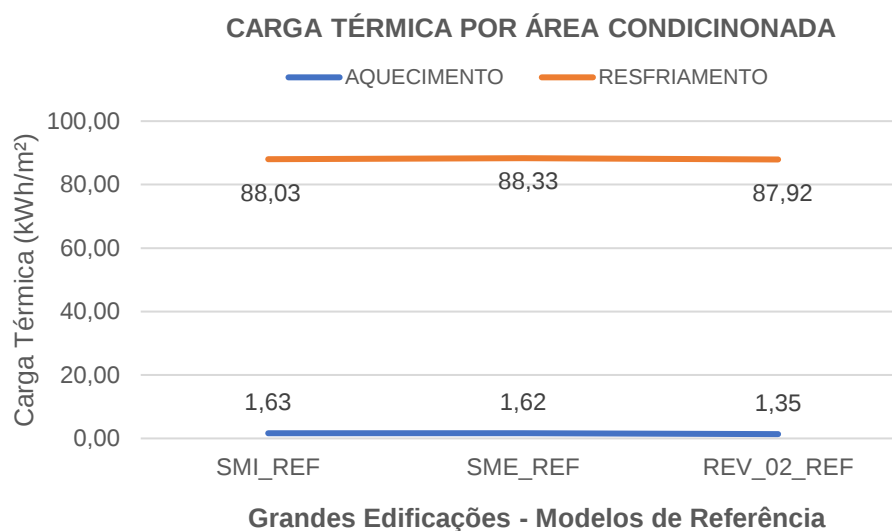


Figura 66- Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais por área condicionada para os modelos de referência: Grandes Edificações.

Fonte: Autor (2023).

Já para os modelos reais o modelo REV_02 foi o que apresentou as menores cargas térmicas nominais, evidenciando uma diferença de 103,86 kWh/ano (2,1%)

entre as cargas de aquecimento, 3.484,61 kWh/ano (1,0%) nas de resfriamento, e 3.588,47 kWh/ano (1,0%) na carga total quando comparado com o modelo SMI (Figura 68).

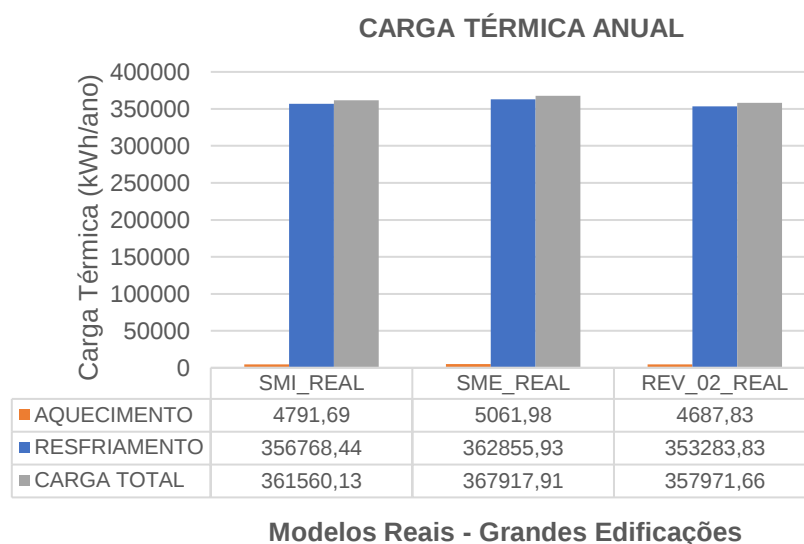


Figura 67 - Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais para os modelos reais: Grandes Edificações.
Fonte: Autor (2023).

O gráfico da Figura 69 demonstra as cargas térmicas por área condicionada para os modelos reais. Nele é possível observar uma variação de 1,81 kWh/m² entre as cargas máximas e mínimas de resfriamento e 0,07 kWh/m² nas cargas de aquecimento.

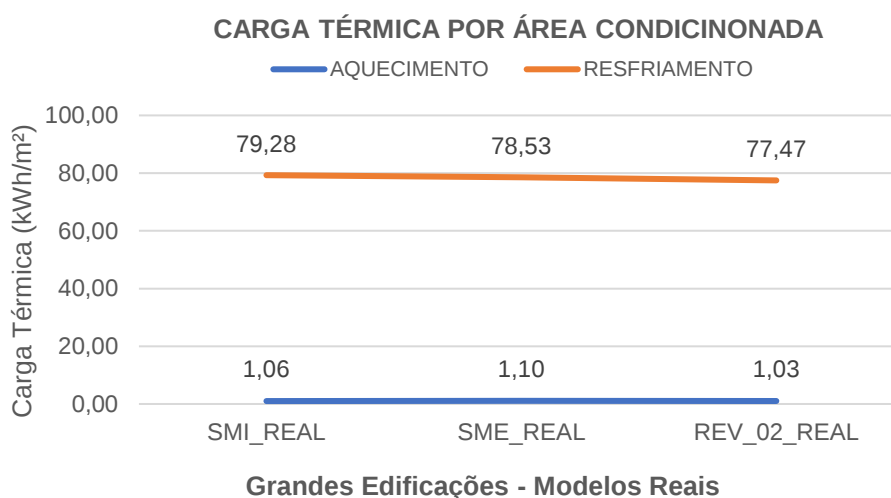


Figura 68 - Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais por área condicionada para os modelos reais: Grandes Edificações.

Fonte: Autor (2023).

A proximidade dos resultados encontrados entre os modelos SMI e REV_02 pode ser explicada pelo fato de o modo “*Rooms or Spaces*” utilizar o volume interno da zona para o cálculo das cargas térmicas. Dessa forma, para edificações de grande porte as diferenças dimensionais das superfícies das zonas térmicas tem seu impacto diminuído frente aos volumes de ar considerados. Apesar de se perceber uma variação percentual mais significativa nas cargas de aquecimento, sua variação nominal foi inferior às variações nas cargas de resfriamento.

Os modelos também tiveram sua envoltória etiquetada a partir do método de simulação da INI-C. A Figura 70 demonstra as diferenças de entre as cargas térmicas totais de referência e reais e a variação percentual das cargas térmicas nos modelos estudados, enquanto a Tabela 19 ilustra as etiquetas obtidas para as envoltórias simuladas.

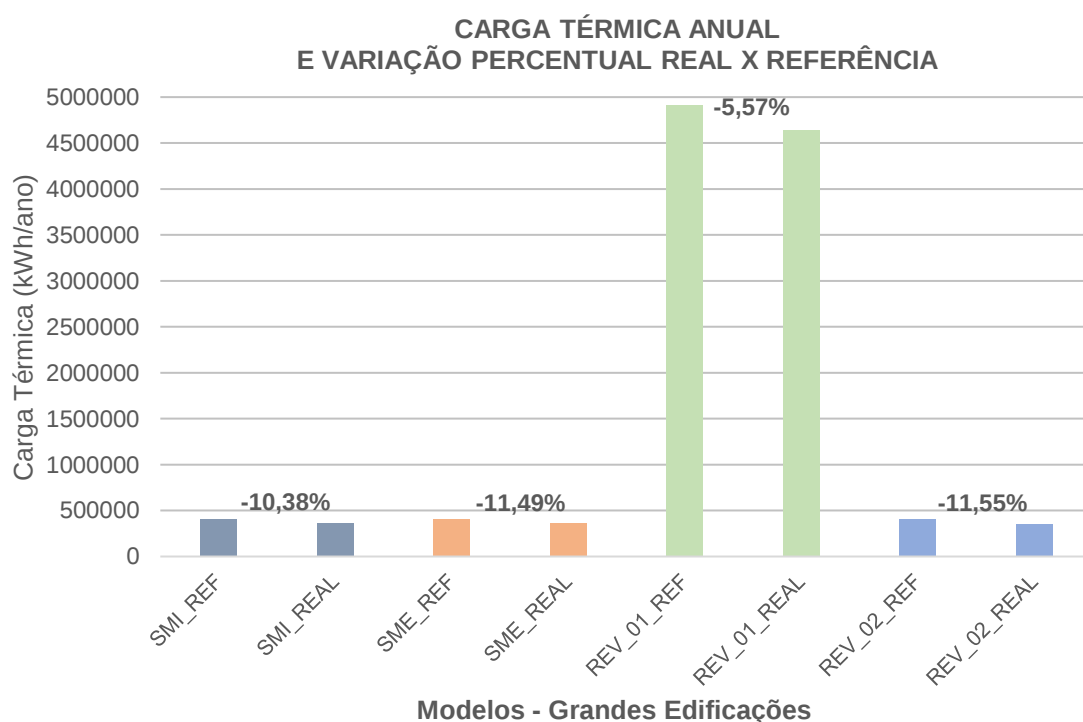


Figura 69 – Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais e variação percentual de redução das cargas térmicas entre os modelos reais e de referência: Grandes Edificações.

Fonte: Autor (2023).

Tabela 19 – Tabela de classificação energética dos modelos reais: Grandes Edificações.

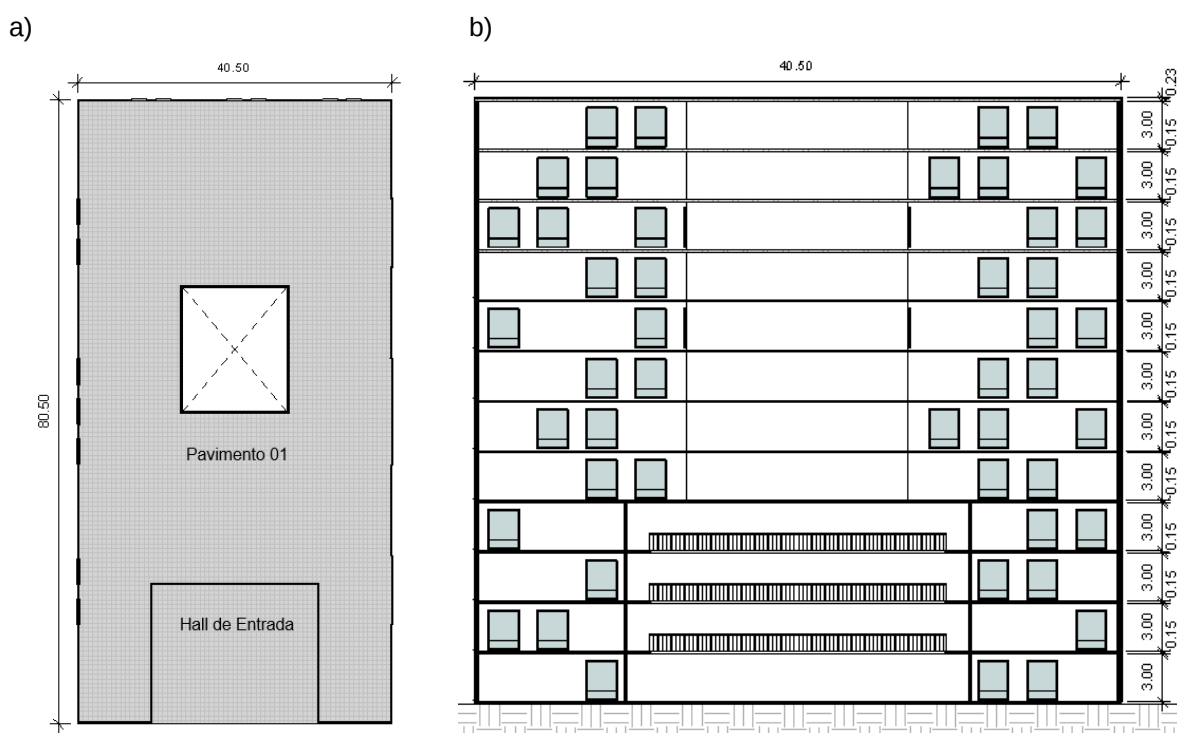
	SMI	SME	REV_01	REV_02
ENNE	C	C	D	C
ENVOLTÓRIA	2i%≥RedCgTT>i%	2i%≥RedCgTT>i%	i%≥RedCgTT≥0%	2i%≥RedCgTT>i%

Fonte: Autor (2023).

Novamente o modelo do Revit sem correções (REV_01) foi o único que destoou dos demais. Além de apresentar cargas térmicas nominais muito altas, nesse caso foi o que obteve a menor variação de carga térmica entre o modelo real e o de referência. Nos demais modelos houve uma variação de carga térmica de apenas 1,17%, permitindo inferir que quanto maior a edificação, menor o impacto das diferenças dimensionais e da forma de modelar utilizada.

4.3.1.3 Edificações Verticais

A tipologia Edificações Verticais possui doze pavimentos de 40 x 80 metros com pé-direito de 3 metros. Mais uma vez a modelagem foi realizada considerando as dimensões como medidas internas e foram adicionadas três variáveis geométricas para serem testadas: pele de vidro, poço de iluminação e pé-direito abrangendo mais de um pavimento, que podem ser observadas na Figura 71.



c)

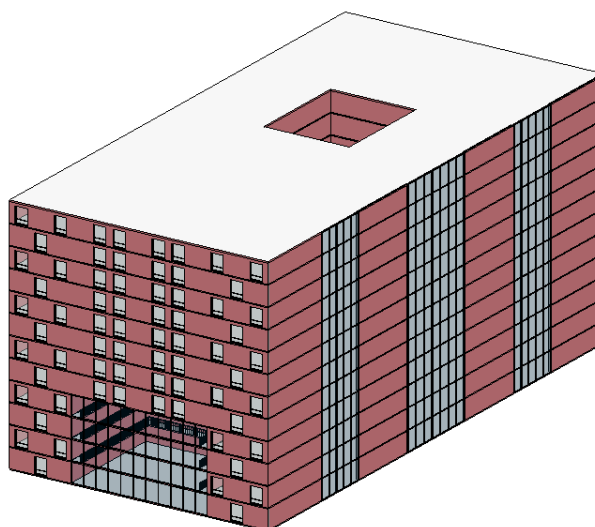


Figura 70 - Modelo Edificações Verticais: a) planta baixa; b) corte; c) Perspectiva.

Fonte: Autor (2023).

O pé-direito elevado foi alocado na entrada da edificação, onde foi criado um hall de entrada com a altura de quatro pavimentos, limitado por paredes internas, e no seu entorno foram colocadas passarelas internas com guarda-corpo. A modelagem dessa estrutura foi realizada de duas formas: na primeira o piso do pavimento foi modelado de forma única e foram adicionados os guarda-corpos nas passarelas dentro do hall; na segunda foram desenhados dois pisos por pavimento, um para o pavimento em si e outro para a passarela. A segunda abordagem permitiu que o piso das passarelas pudesse ter sua propriedade de “*Room Bounding*” (delimitação de ambientes) desligada, possibilitando assim a criação de um espaço único no hall. Já a abordagem inicial obrigou a criação de quatro espaços, sendo um no térreo e um em cada uma das passarelas dos três pavimentos superiores, através da utilização de separadores de espaço virtuais (o guarda-corpo não é capaz de delimitar espaços). Ambas as abordagens se mostraram eficientes, gerando superfícies analíticas adequadas.

A pele de vidro do hall de entrada foi modelada entre as lajes de entrepiso, enquanto as peles de vidro da fachada leste abrangeram toda a fachada (do térreo até a cobertura), faceando externamente as lajes estruturais. Para a modelagem da pele de vidro da fachada também foram utilizadas duas abordagens utilizando a ferramenta de parede cortina do Revit: na primeira as três peles de vidro foram criadas seguindo o limite exterior dos pisos (Figura 72a); na segunda as paredes cortinas

foram modeladas no mesmo local, mas com seu eixo alinhado ao eixo das paredes externas (Figura 72b). Para que os eixos das três peles de vidro laterais ficassem alinhados às paredes e ainda mantivessem a mesma representação gráfica da pele faceando a estrutura foi necessário realizar o deslocamento dos montantes e painéis dentro da família da parede cortina.

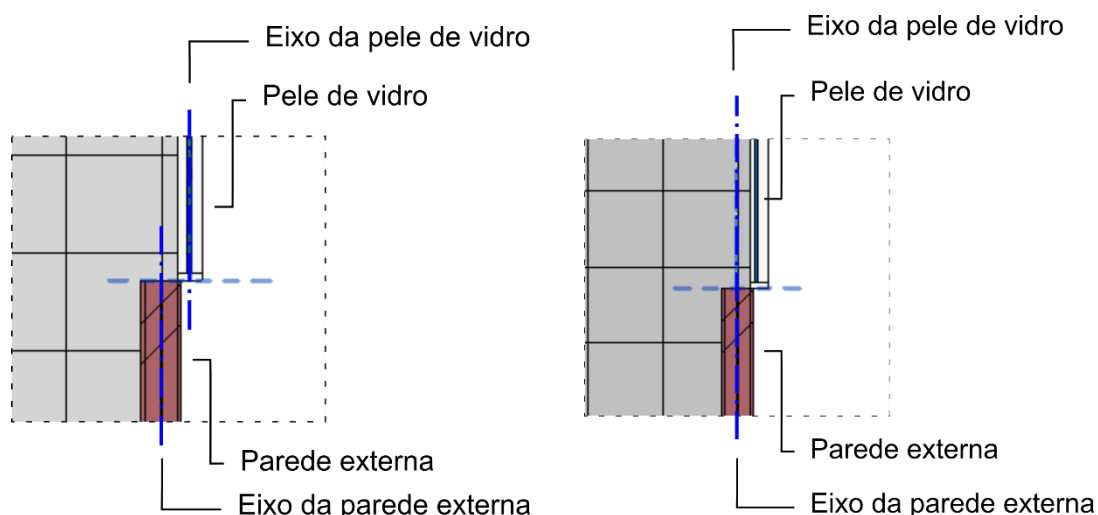


Figura 71 – Procedimento de modelagem da parede cortina dentro do Revit: a) pele de vidro faceando a face externa do piso e com o seu eixo centralizado; b) pele de vidro faceando a face externa do piso e com o seu eixo deslocado de forma a estar alinhado com o eixo da parede externa;

Fonte: Autor (2023).

Como já era esperado, a modelagem da pele de vidro que não teve seus eixos alinhados com as paredes externas apresentou inconsistências na formação das superfícies analíticas. A Figura 73 mostra a existência de vãos entre as estruturas de parede cortina e parede básica criada pelo Revit. Como a pele de vidro lateral foi desenhada externamente ao prédio, o vão observado foi de 20 cm de largura, enquanto no hall de entrada, com a parede cortina faceando internamente o limite mais externo do piso, a largura foi de 5 cm.

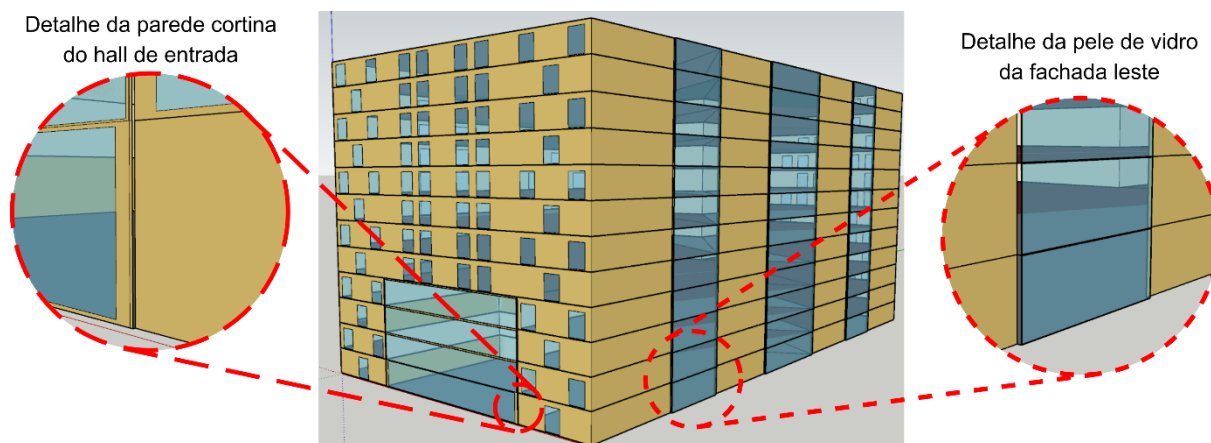


Figura 72 – Arquivo IDF criado pelo *Systems Analysis* e visualizado no Sketchup através do *plug-in* Euclid. Ampliações ilustram aberturas entre a pele de vidro e as paredes externas.

Fonte: Autor (2023).

Durante as simulações, essas aberturas geraram um aviso pelo EnergyPlus de que o ambiente não estava totalmente enclausurado. No entanto, a simulação foi finalizada sem erros severos. Assim, para o caso específico das Edificações Verticais foram acrescentadas duas novas abordagens, considerando a correção dos eixos das peles de vidro tanto para o modelo original do Revit (REV_01_eixo), como para o modelo corrigido (REV_02_eixo). Dessa forma, além de comparar as diferentes formas de modelagem, também foi possível comparar o impacto dos vazios existentes no modelo criado pelo Revit nas cargas térmicas totais e na etiqueta obtida pela envoltória.

A Figura 74 demonstra as diferenças entre as cargas térmicas para os modelos reais, conforme detalhado na Tabela 17.

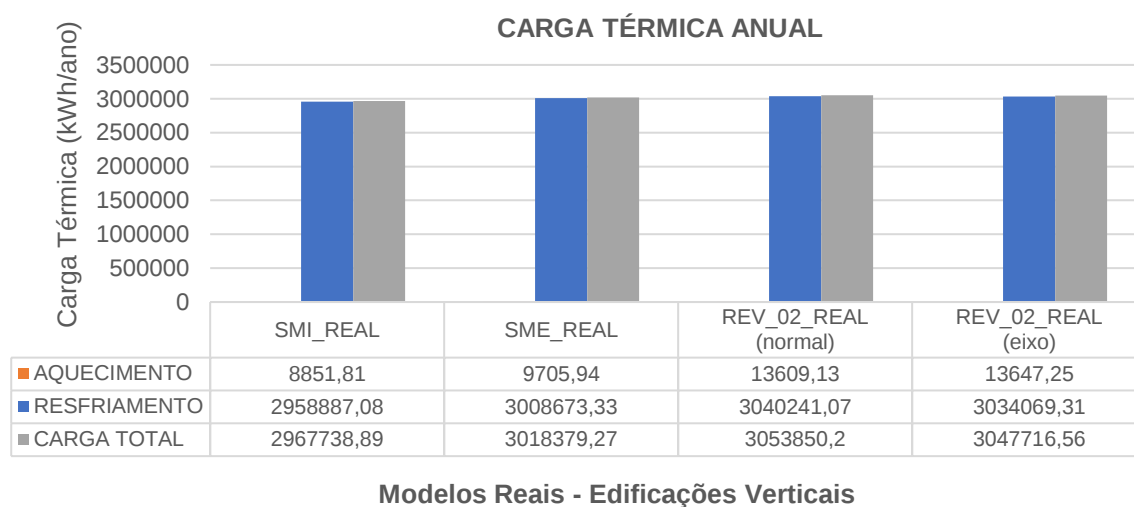


Figura 73 – Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais para os modelos reais: Edificações Verticais.

Fonte: Autor (2023).

Pode-se perceber que as inconsistências geométricas causadas pelas paredes cortina não impactaram significativamente os modelos gerados dentro do Revit, apresentando uma diferença de apenas 0,28% para as cargas de aquecimento e 0,20% para as cargas de resfriamento. Também ficou demonstrado que houve uma diferença de apenas 2,82% entre as cargas térmicas totais mínimas (modelo SMI) e máximas (modelo REV_02_normal) dos modelos avaliados.

Ao analisarmos as cargas térmicas por área condicionada das Edificações Verticais, Figuras 75 e 76, percebe-se que existe uma proximidade dos valores, tanto para os modelos reais como para os de referência. É possível observar uma variação de 1,53 kWh/m² entre as cargas máximas e mínimas de resfriamento e 0,22 kWh/m² nas cargas de aquecimento nos modelos de referência. Já para os modelos reais a variação foi de 1,54 kWh/m² para o resfriamento e 0,13 kWh/m² para o aquecimento.

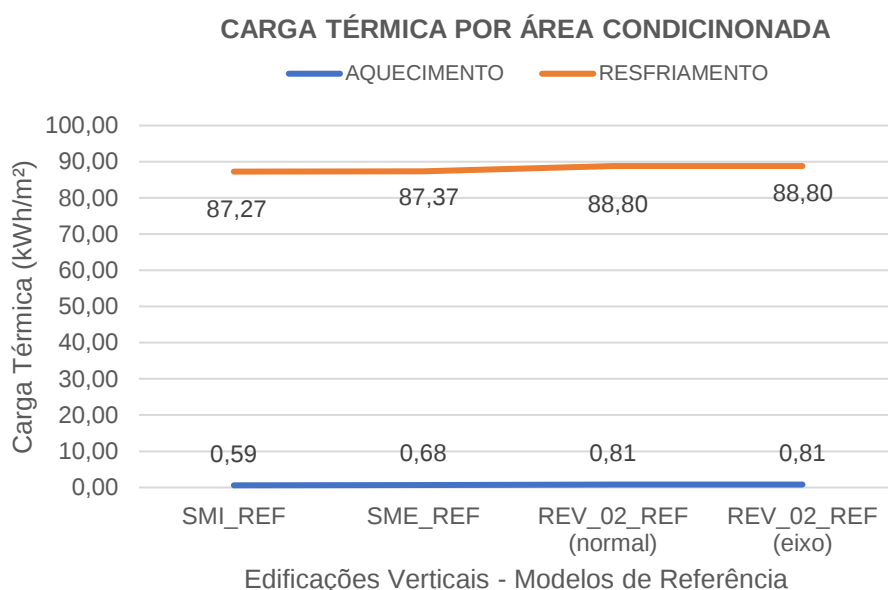


Figura 74 - Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais por área condicionada para os modelos de referência: Edificações Verticais.

Fonte: Autor (2023).

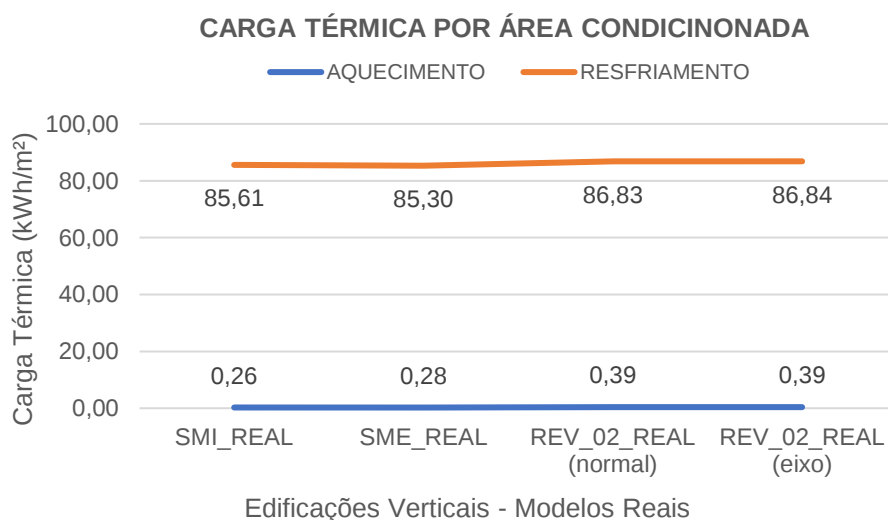


Figura 75 - Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais por área condicionada para os modelos reais: Edificações Verticais.

Fonte: Autor (2023).

Na Tabela 20 é possível verificar que todos os modelos obtiveram a mesma ENCE para a envoltória, classificação “D”, inclusive os modelos sem correção. Na Figura 77 se percebe que a variação percentual de redução de carga térmica total das edificações corrigidas REV_02_normal e REV_02_eixo, em relação aos modelos criados no Sketchup, se manteve em um intervalo entre 1,92% e 2,34%. Os testes

realizados com ventilação nas zonas abertas apresentaram variações nas cargas térmicas inferiores a 1%. Esses testes sugerem a possibilidade de o programa ter interpretado as aberturas nas paredes externas como descontinuidades das superfícies externas, impactando nas trocas térmicas superficiais, mas não acarretando a entrada de ar externo para o interior da edificação.

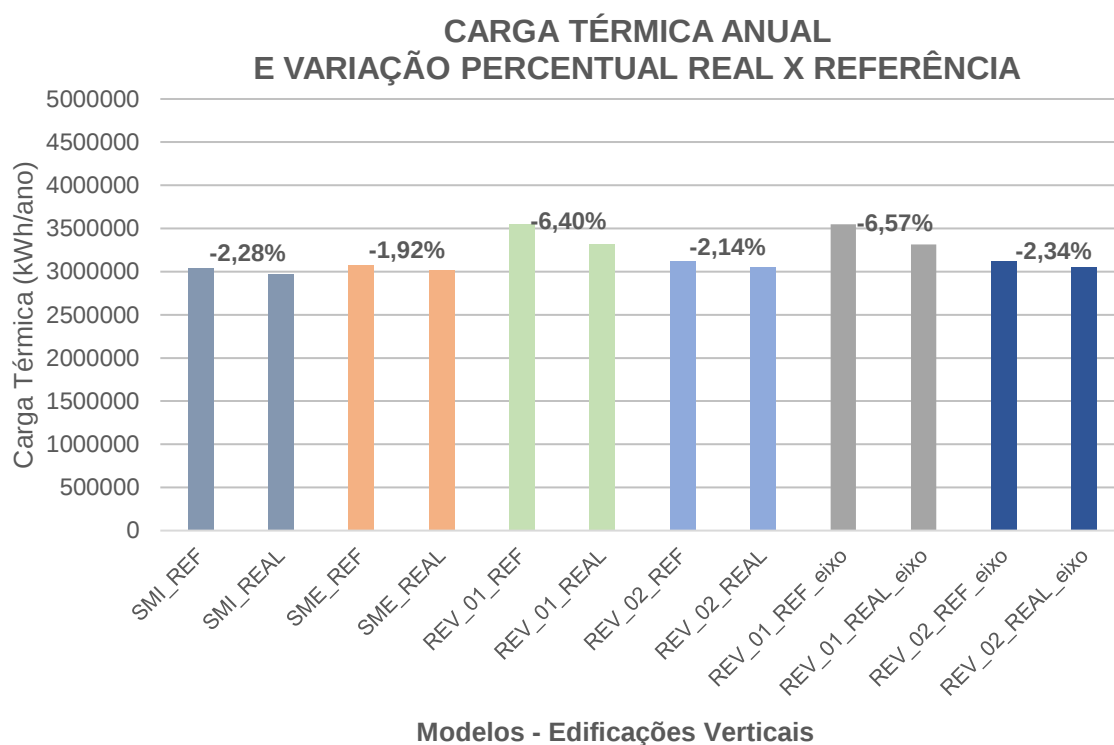


Figura 76 – Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais e variação percentual de redução das cargas térmicas entre os modelos reais e de referência: Edificações Verticais.

Fonte: Autor (2023).

Tabela 20 - Tabela de classificação energética dos modelos reais: Edificações Verticais.

	SMI	SME	REV_01	REV_02	REV_01_eixo	REV_02_eixo
ENCE ENVOLTÓRIA	D	D	D	D	D	D
	$i\% \geq \text{RedCgT} \geq 0\%$	$i\% \geq \text{RedCgTT} \geq 0\%$	$i\% \geq \text{RedCgT} \geq 0\%$	$i\% \geq \text{RedCgTT} \geq 0\%$	$i\% \geq \text{RedCgT} \geq 0\%$	$i\% \geq \text{RedCgTT} \geq 0\%$

Fonte: Autor (2023).

4.3.2 Tipologia Educacional

4.3.2.1 Anexo FAUrb (UFPel)

O projeto do Anexo FAUrb foi desenvolvido pelos servidores da Universidade Federal de Pelotas para ser construído como edificação complementar ao prédio que abriga a Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Ele foi projetado para ser uma edificação NZEB e possui três pavimentos onde estão previstos ambientes para área de convivência, ateliês, entre outros, totalizando 07 zonas térmicas de permanência prolongada. O Anexo FAUrb também foi utilizado como uma das edificações de referência no estudo de Muta (2022), onde foi desenvolvido um modelo BIM dentro do programa Revit. Para se obter uma experiência mais próxima do que acontece com os OIAs ao realizarem os procedimentos de avaliação das edificações, optou-se por etiquetar o modelo criado por Muta (2022), ao invés de um modelo criado pelo autor.

A Figura 78 ilustra o projeto da edificação, onde podem ser observadas algumas complexidades geométricas como: brises verticais e horizontais, telhados modelados comático, área externa sobre pilotis, pé-direito duplo, abertura zenital (PAF = 3,57%) e pele de vidro.



Figura 77 – Projeto do Anexo FAUrb adaptado de Muta (2022): a) planta baixa do primeiro pavimento; b) corte transversal; c) planta baixa do segundo pavimento; d) corte longitudinal; e) planta baixa do terceiro pavimento; f) perspectiva.

Fonte: Autor (2023).

Antes de iniciar o procedimento de etiquetagem, o primeiro passo foi realizar uma análise da modelagem da edificação e, com base em todos os testes realizados anteriormente, identificar possíveis causadores de inconsistências no momento da criação do modelo analítico. Nessa etapa foi possível identificar que a modelagem dos pisos não estava adequada para o propósito da simulação energética. As lajes haviam sido modeladas seguindo o projeto estrutural e os pisos estavam separados em duas estruturas sobrepostas, uma para a estrutura e outra para o acabamento. Também foi identificada a existência de vigas, pilares, a inexistência de uma claraboia, ausência de um dos portões, ausência da secretaria do LINSE, além de algumas diferenças dimensionais em relação ao projeto executivo fornecido pela UFPel. Como o modelo foi desenvolvido para facilitar a extração de dados para o método simplificado da INI-C (2022), os ambientes foram divididos em várias zonas térmicas (espaços periféricos e internos), conforme estipulado pela norma.

Posteriormente às observações iniciais, foi realizada a simulação no *Systems Analysis* a partir do modelo de Muta (2022), Figura 79, para se ter uma percepção mais clara dos problemas que seriam encontrados. Observou-se a necessidade de criar um modelo adaptado para a realização da avaliação energética, bem como foi possível perceber outros aspectos que também não estavam sendo interpretados de forma satisfatória.

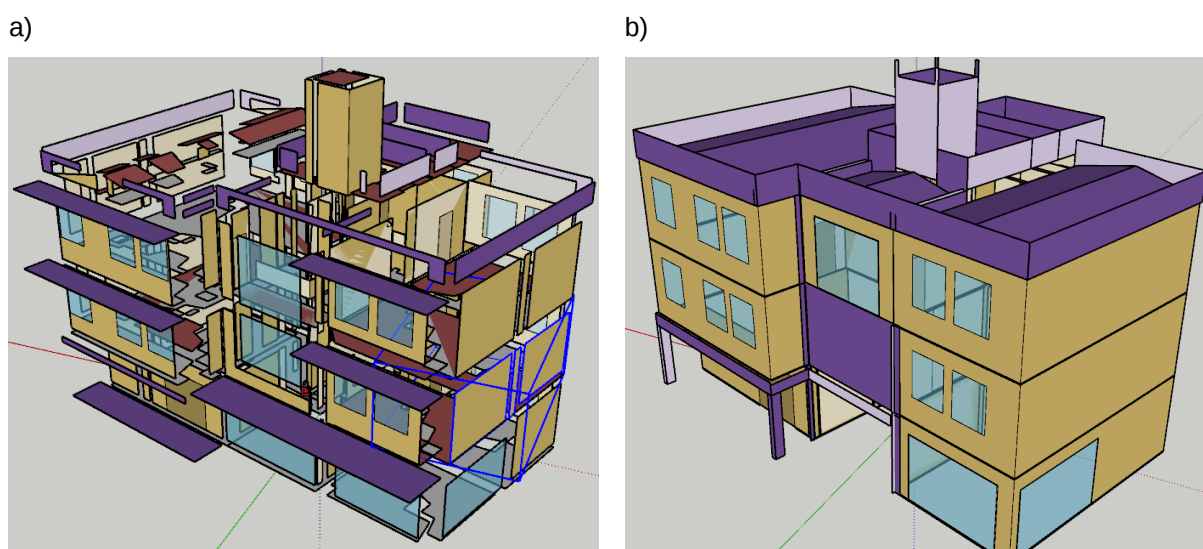


Figura 78 - Arquivos IDF criados pelo *Systems Analysis* a partir do modelo de Muta (2022) e visualizado no Sketchup através do *plug-in* Euclid, utilizando diferentes modos de exportação no Revit: a) “*Building Elements*”; b) “*Rooms or Spaces*”.

Fonte: Autor (2023).

Percebeu-se que, mesmo utilizando a categoria de exportação “*Rooms*”, o modelo de energia criado pelo “*Building Elements*” foi impactado pelos diversos “*Spaces*” (zonas térmicas) existentes, ficando com as superfícies e zonas totalmente fragmentadas (Figura 79a). Diferentemente do caso anterior, no modo de exportação “*Rooms or Spaces*”, o programa foi capaz de desconsiderar as zonas térmicas e criar o modelo a partir apenas dos ambientes (Figura 79b). Ainda assim, foi possível identificar alguns problemas na formação do modelo de energia como: os brises horizontais não foram reconhecidos; duas paredes cortina apresentaram problemas na exportação; o telhado foi reconhecido como elemento de sombreamento; não foram identificados os pisos externos; a laje de cobertura do hall não foi reconhecida. Também observou-se que a configuração dos materiais apresentava algumas divergências.

Baseado nessas observações foi criado, a partir do modelo de Muta (2022), um novo modelo BIM, com todas as alterações identificadas como necessárias para a obtenção de um modelo de energia adequado. A Tabela 21 apresenta o resumo de todas as adaptações realizadas para atingir esse objetivo. Cabe ressaltar que erros como o não reconhecimento dos brises e a não criação dos pisos externos puderam ser corrigidos alterando a configuração do “*Building Envelope*”, dentro das configurações avançadas de energia, para “*Identify Exterior Elements*”, sem necessidade de intervenções na modelagem.

Tabela 21 – Síntese das adaptações realizadas no modelo de Muta (2022) para realização das simulações.

Correção		Descrição
01	Remodelagem dos pisos	Todos os pisos de acabamento foram excluídos. Os pisos estruturais foram editados e deram origem a quatro diferentes tipos de piso, conforme os tipos de acabamento existente na edificação. Esses pisos foram modelados seguindo a face externa do núcleo nas parede externas e o eixo das paredes internas.
02	Adequação dos Espaços	Todos os espaços existentes foram excluídos e foram criados novos espaços de acordo com o uso do ambiente e o estipulado pela INI-C. Foram criados também espaços sob as coberturas de fibrocimento, já que o modo de exportação a ser usado seria o “ <i>Rooms or Spaces</i> ”.
03	Correção dos materiais e propriedades térmicas	Correção dos materiais utilizados no modelo, como a inclusão dos materiais equivalentes, bem como a alteração das propriedades térmicas.
04	Correção de duas paredes cortina	Correção na modelagem de duas paredes cortina que não estavam sendo corretamente exportadas para o modelo analítico.
05	Ajuste das coberturas	As coberturas foram modeladas com calhas em seus caimentos, deixando o perímetro do telhado afastado das platibandas e causando erro na criação dos áticos. Foram retiradas as calhas e

		os limites dos telhados foram alinhados com as platibandas existentes.
06	Exclusão de vigas e pilares	Observou-se que as vigas que eram mais espessas que suas paredes hospedeiras eram interpretadas como elementos de sombreamento, gerando conflitos no modelo analítico. Da mesma forma, os pilares geraram erros na junção de algumas paredes adjacentes. Para simplificação do modelo de energia optou-se por excluir todas as vigas que estavam tendo esse comportamento e desabilitar a opção “ <i>Room Bounding</i> ” de todos os pilares do modelo.
07	Alterações do Projeto Arquitetônico	Foram realizadas adequações para atender ao Projeto Executivo do Anexo FAUrb, como a inclusão de uma secretaria no segundo pavimento, substituição de duas janelas por um portão no térreo e a inclusão de uma clarabóia na circulação do terceiro pavimento. Também foram realizadas algumas adequações dimensionais de ambientes e esquadrias e modelado o entorno da edificação com a utilização de massas conceituais.

Fonte: Autor (2023).

As estruturas construtivas foram mantidas de acordo com o projeto executivo da edificação. As paredes externas são compostas por dois blocos cerâmicos de 9x14x19 cm assentados à cutelo com uma camada de lã de rocha de 30 mm entre eles, rebocados interna e externamente. Na maioria das paredes internas é utilizado um único bloco cerâmico assentado à cutelo, também com revestimento argamassado em ambos os lados. Apenas nas divisórias da Secretaria do LINSE, acrescentadas no segundo pavimento, foram utilizadas paredes de gesso acartonado. Na cobertura, ao invés de utilizar a telha metálica sanduíche, foi prevista uma camada de lã de rocha de 50 mm diretamente sobre a laje somada à utilização de telha de alumínio simples sobre estrutura de madeira. As esquadrias são de PVC com vidros duplos, os portões externos são de madeira e os pisos variam de acordo com o ambiente, abrangendo acabamentos em piso vinílico, concreto polido e porcelanato.

Seguindo o mesmo procedimento de criação de materiais utilizado nas edificações de escritório, foram realizadas as edições necessárias nos materiais existentes nas estruturas construtivas da edificação. Na Tabela 22 é possível observar o resultado dos atributos dos materiais para o modelo real.

Tabela 22 - Relação de materiais utilizados na modelagens dos modelos reais do Anexo FAUrb.

Materiais (real)	Espessura (m)	Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m³]	Calor específico [J/kg.K]
Reboco	0,0250	1,15	1850	1000
Bloco cerâmico Real (-5cm) - equivalente	0,2068	0,90	348	920
Bloco cerâmico REF (-4cm) - equivalente	0,0203	0,90	1547	1000
Camada de ar bloco REF (-4cm) - equivalente	0,0494	0,3088	0,01	1000
Lã de rocha	variada	0,045	200	750

Gesso acartonado	0,0125	0,35	1000	840
Argamassa contrapiso	variada	1,15	1850	1000
Piso porcelanato	0,0100	1,05	2000	920
Piso vinílico	0,0050	0,40	900	100
Piso concreto polido	0,0150	1,75	2240	1000
Madeira	0,0300	0,15	500	2300
Concreto armado	0,1000	1,75	2240	1000
Camada de ar > 5cm Real	0,0980	0,4667	0,01	1000
Alumínio	0,0010	230	2700	880

Fonte: Autor (2023).

Após as modificações realizadas foi gerado um novo modelo de energia e realizada uma nova simulação. Na Figura 80 é possível comparar o arquivo IDF criado pela ferramenta “*Systems Analysis*” (Figura 80a e 80b) e a volumetria real da edificação (foram ocultadas as volumetrias do entorno).

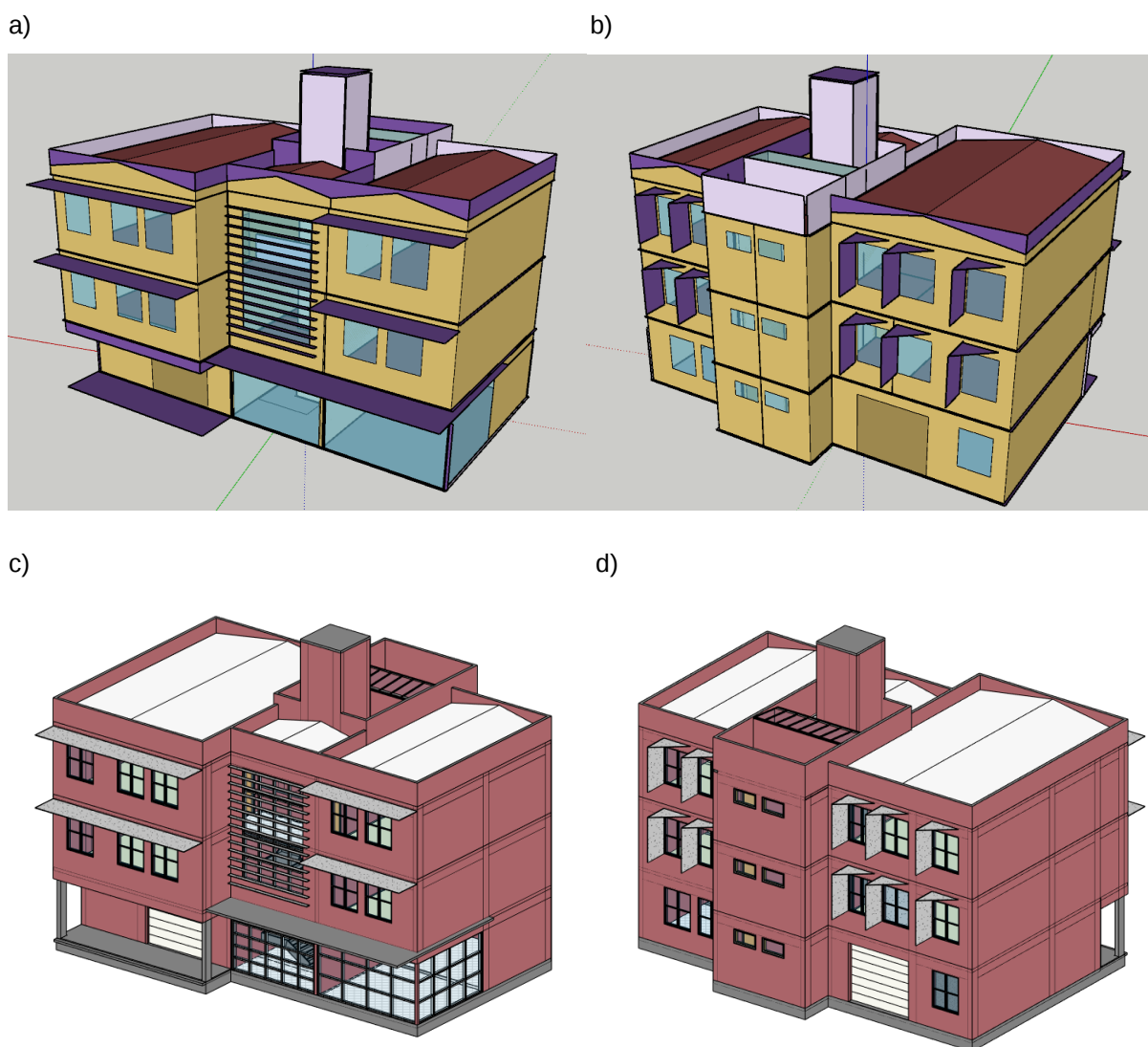


Figura 79 – Arquivo IDF criado pelo *Systems Analysis* a partir do modelo adaptado pelo autor utilizando o modo de exportação “*Rooms or Spaces*” e visualizado no Sketchup através do *plug-in* Euclid: a) fachadas norte e oeste; b) fachadas sul e leste. Modelo adaptado pelo autor e utilizado para as simulações de etiquetagem: c) fachadas norte e oeste; d) fachadas sul e leste.

Fonte: Autor (2023).

Observa-se através das imagens acima que o modelo de energia gerado pelo Revit foi bastante fiel à edificação real, reconhecendo os brises, a claraboia, os telhados inclinados, as platibandas e as peles de vidro. Por se tratar de uma edificação de uso educacional, as demais características de ocupação e uso foram aplicadas conforme os parâmetros estipulados na Tabela A.2 da INI-C para edificações educacionais de ensino superior (Figura 81). Para a edificação de referência também foram utilizadas as estruturas construtivas e parâmetros da mesma Tabela A.2.

Tabela A.2 – Valores de referência para edificações educacionais

Uso típico	Edificações educacionais			
	Condição real	Condição de referência		
		Educação infantil	Ensino fundamental e médio	Ensino superior
Geometria				
Área (m²)	Condição real			
Orientação solar	Condição real			
Pé-direito (piso a teto) (m)	Condição real			
Aberturas				
PAF - Percentual de área de abertura da fachada (%)	Condição real	40 (0,40)		
Componentes construtivos				
Parede	Condição real	Argamassa interna (2,5 cm), bloco cerâmico furado (9 cm), argamassa externa (2,5 cm)		
Up _{par} - Transmitância da parede externa (W/(m².K))	Condição real	2,39		
α _{PAR} - Absortância da parede (adimensional)	Condição real	0,5		
CT _{par} - Capacidade térmica da parede externa (kJ/(m².K))	Condição real	150		
Cobertura	Condição real	Telha de fibrocimento, câmara de ar (>5 cm) e laje maciça de concreto (10 cm)		
U _{cob} - Transmitância da cobertura (W/(m².K))	Condição real	2,06		
α _{COB} - Absortância da cobertura (adimensional)	Condição real	0,8		
CT _{cob} - Capacidade térmica da cobertura (kJ/(m².K))	Condição real	233		
Vidro	Condição real	Vidro simples incolor 6mm		
FS – Fator solar do vidro (adimensional)	Condição real	0,82		
U _{vid} - Transmitância do vidro (W/(m².K))	Condição real	5,7		
AHS - Ângulo horizontal de sombreamento (°)	Condição real	0		
AVS - Ângulo vertical de sombreamento (°)	Condição real	0		
AOV - Ângulo de obstrução vizinha (°)*	Condição real			
Iluminação e ganhos internos				
DPI - Densidade de potência de iluminação (W/m²)	Condição real	15,5**		
Ocupação (m²/pessoa)	Condição de referência	2,5	1,5	1,5
DPE - Densidade de potência de equipamentos (W/m²)***	Condição de referência	15,0		
Horas de ocupação (horas)	8			
Dias de ocupação (N _{ano})****	200			
Situação do piso	Condição real			
Situação da cobertura	Condição real			
Isolamento do piso	Condição real	Sem isolamento		
Condicionamento de ar (refrigeração)				
COP - Coeficiente de performance (W/W)	Condição real	2,60		
Temperatura setpoint (°C)*****	24,0			
Aquecimento de água*****				

Figura 80– Valores de referência para edificações educacionais extraídas da INI-C.

Fonte: Adaptado de Brasil (2022).

Por se tratar de uma edificação que já teve sua avaliação por simulação para a ENCE Geral, com projeto executivo e definições projetuais mais avançadas, optou-se por realizar a etiquetagem completa do prédio, através da ENCE Geral. Foram realizadas duas modelagens, uma no Revit (Anexo_REV) e outra no Sketchup (Anexo_SME), comparando os resultados obtidos. As cargas de iluminação, equipamentos e de condicionamento de ar foram configuradas com base nos dados fornecidos pela UFPel, sendo considerado o uso de ventilação natural associada ao

sistema de ar-condicionado da edificação (foram desconsideradas fontes de aquecimento de água e de geração de energia). Na Tabela 23 é possível observar os dados de consumo da edificação modelada pelo autor no Sketchup, através do plugin Euclid, e configurada no EnergyPlus.

Tabela 23 – Consumo elétrico anual do Anexo FAUrb para o modelo criado no Sketchup (Anexo_SME).

	ANEXO FAURB (Anexo_SME)	
	Consumo Elétrico (kWh/ano)	
	Edificação Referência	Edificação Real
Aquecimento	616,14	184,95
Resfriamento	23.506,73	7.288,35
Iluminação	17.238,65	8.745,12
Equipamentos	8.184,58	8.184,58
TOTAL	49.546,10	24.403,00

Fonte: Autor (2023).

Para a etiquetagem geral da edificação foram definidos os parâmetros necessários para uma edificação educacional. O Fator de Forma utilizado foi de 0,46 para a zona bioclimática 2, resultando em um coeficiente de redução do consumo de energia primária da classificação “D” para a classificação “A” de 0,28. Assim, o índice de intervalo entre as classes foi de 9,33%. Foi desconsiderado o fator de conversão, já que não haverá consumo térmico. A partir dos intervalos de classificação estipulados pela INI-C, representados na Figura 82 e considerando os parâmetros utilizados para a etiquetagem, foi obtida a etiqueta “A” para a edificação analisada (Tabela 24).

CLASSIFICAÇÃO DE EFICIÊNCIA				
A	B	C	D	E
RedCep>3i%	3i%≥RedCep>2i%	2i%≥RedCep>i%	i%≥RedCep≥0%	RedCep<0%

Figura 81 – Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética geral da edificação.

Fonte: Autor (2023).

Tabela 24 – Parâmetros de classificação aplicados na etiquetagem do Anexo_SME, conforme a INI-C, e a classificação obtida.

Parâmetros de Classificação	Valores
Zona Bioclimática	2
Fator de forma	0,46
CR Cep D-A (coeficiente de redução do consumo de energia primária)	0,28
i (intervalo entre as classes)	9,33%
RedCep (percentual de redução de consumo de energia primária)	50,75%
CLASSIFICAÇÃO GERAL	A

Fonte: Autor (2023).

O mesmo procedimento foi adotado para a classificação do modelo criado dentro do Revit, através do modo “Rooms or Spaces”. A Tabela 25 apresenta os dados

de consumo do modelo. Cabe ressaltar que esse modelo teve suas agendas corrigidas e as demais configurações compatibilizadas com o modelo do Sketchup. Também foi realizada a inversão das faces de um dos brises, o que gerou o mesmo efeito em cascata observado no caso 610, causando a correção das insolações nas aberturas.

Tabela 25 – Consumo elétrico anual do Anexo FAURB para o modelo criado no Sketchup (Anexo_REV).

ANEXO FAURB (Anexo_REV)		
Consumo Elétrico (kWh/ano)		
	Edificação Referência	Edificação Real
Aquecimento	539,36	194,15
Resfriamento	23.505,37	6.709,32
Iluminação	16.137,64	8.219,32
Equipamentos	7.835,37	7.835,37
TOTAL	48.017,74	22.958,16

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 26 apresenta a relação de parâmetros utilizados para o modelo Revit e a etiqueta obtida pela edificação.

Tabela 26 - Parâmetros de classificação aplicados na etiquetagem do Anexo_REV, conforme a INI-C, e a classificação obtida.

Parâmetros de classificação	Valores
Zona Bioclimática	2
Fator de forma	0,46
CR Cep D-A (coeficiente de redução do consumo de energia primária)	0,28
i (intervalo entre as classes)	9,33%
RedCep (percentual de redução de consumo de energia primária)	52,19%
CLASSIFICAÇÃO GERAL	A

Fonte: Autor (2023).

Constatou-se que a diferença entre os percentuais de redução de consumo de energia primária das duas edificações foi de 1,44% e que ambas obtiveram a mesma ENCE Geral “A”. Analisando o gráfico da Figura 83, que demonstra o consumo por metro quadrado de área condicionada da edificação real, é possível quantificar a proximidade dos valores simulados entre os modelos SME_REAL e REV_02_REAL. Foi identificada uma variação de 0,53 kWh/m² para o consumo de HVAC e 0,38 kWh/m² para o consumo de iluminação, enquanto o consumo de equipamentos se manteve o mesmo.

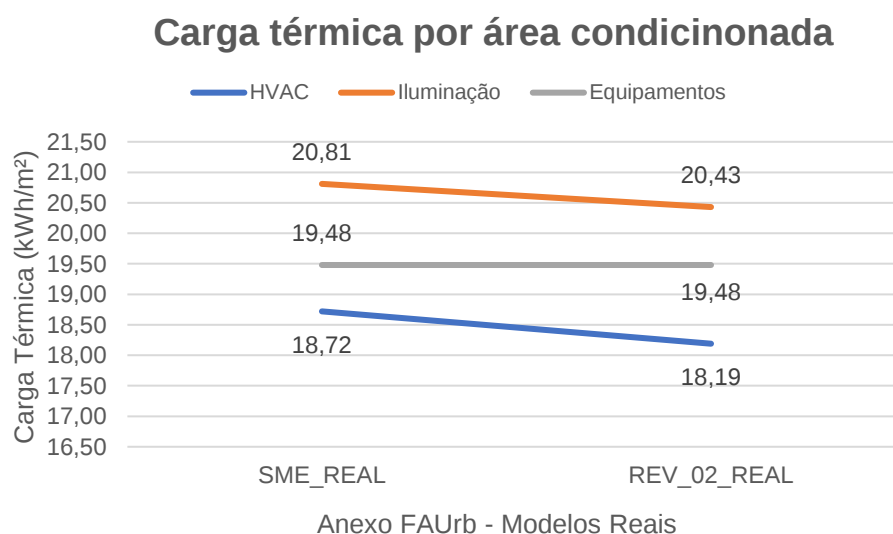


Figura 82- Gráfico comparativo de cargas térmicas anuais por área condicionada para os modelos reais: Anexo FAUrb.

Fonte: Autor (2023).

4.3.3 Análise dos resultados – Simulações para etiquetagem

As etiquetagens realizadas nos quatro modelos propostos permitiram observar algumas limitações da ferramenta “*Systems Analysis*” que ainda não haviam sido demonstradas nos testes anteriores. No modo de exportação “*Rooms or Spaces*”, por exemplo, os dados de ventilação não foram corretamente exportados e as zonas não condicionadas não foram reconhecidas. O modo “*Building Elements*”, quando testado no Anexo FAUrb, apresentou interferências dos espaços existentes no modelo, mesmo quando solicitado para considerar apenas os ambientes na exportação. Com relação às geometrias analíticas, nos casos mais complexos o Revit costuma utilizar superfícies com diversos vértices, muitas vezes consideradas como não-convexas pelo EnergyPlus, o que pode gerar erros e avisos durante a simulação envolvendo o cálculo de sombreamento.

Ao analisar os resultados e as etiquetas obtidas após as simulações é possível afirmar que a etiquetagem do modelo original do Revit, sem as correções de agenda de utilização, entradas de ar (quando utilizado o modo “*Room or Spaces*”) e brises, não apresenta resultados compatíveis com o esperado, tanto para as cargas térmicas nominais como para a variação de carga térmica entre os modelos reais e de referência. Também foi possível observar que após as correções das agendas e

adequação dos dados de infiltração e ventilação os resultados apresentados ficaram dentro do esperado ao serem comparados com os modelos criados pelo autor no Sketchup. Todas as edificações corrigidas obtiveram a mesma etiqueta dos modelos controle e quanto maior o volume da edificação, menor foi a variação percentual de carga térmica obtida entre os modelos reais e de referência, minimizando a interferência do método de modelagem e das variações dimensionais existentes nos modelos. A Figura 84 demonstra um comparativo entre as variações percentuais na redução das cargas térmicas totais das tipologias simuladas entre os modelos reais e de referência.

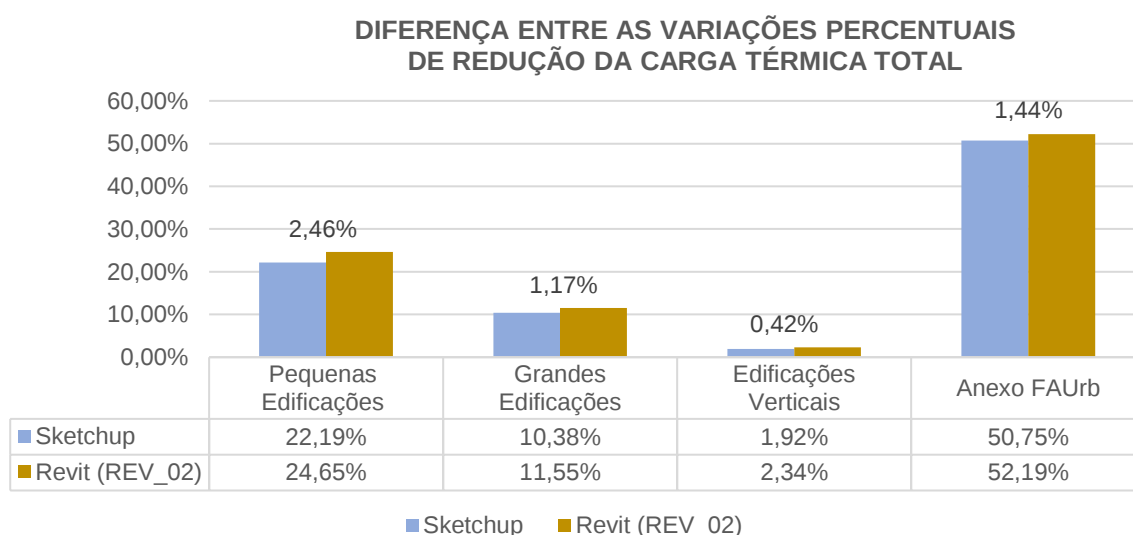


Figura 83 – Gráfico comparativo entre os percentuais de redução de cargas térmicas totais entre os modelos reais e de referência, com destaque para a diferença entre os percentuais de redução obtidos pelos modelos do Sketchup e do Revit (corrigido).

Fonte: Autor (2023).

O valor destacado dentro do gráfico representa a diferença entre as variações para os modelos do Sketchup e do modelo corrigido do Revit, demonstrando que as diferenças encontradas entre os modelos do Sketchup e do Revit ficaram dentro do intervalo de 0,42% e 2,46%.

5 CONCLUSÕES

A motivação para o desenvolvimento deste estudo partiu da necessidade de testagem de novas ferramentas que permitam a otimização dos processos de simulação energética. Através de um procedimento de simulação rápido e confiável será possível viabilizar uma política nacional de etiquetagem efetiva e abrangente. O objetivo principal da pesquisa foi avaliar a possibilidade de utilização da ferramenta “*Systems Analysis*”, do Revit 2023, no processo de etiquetagem de edificações através do método de simulação da INI-C. O trabalho identificou que a ferramenta utiliza os programas OpenStudio e EnergyPlus no plano de fundo para poder realizar suas simulações. Também foram elencadas as principais características da ferramenta, com suas potencialidades e limitações.

A metodologia adotada utilizou estudos de caso exploratórios que permitiram a identificação de diversos aspectos capazes de impactar nos resultados fornecidos pela ferramenta, atendendo adequadamente à finalidade da pesquisa. Os estudos exploratórios foram divididos em três etapas de testes: simulações exploratórias de desempenho; simulações exploratórias geométricas; simulações para etiquetagem. Em todos os testes de análise de desempenho das edificações foram criados modelos de controle, através do plugin Euclid (versão 0.9.4) do Sketchup 2020 e simulados pelo EnergyPlus (versão 9.1), para comparação dos resultados.

Nas simulações de desempenho foram testados dois casos da ASHRAE *Standard* 140 (600 e 610), onde foi possível compreender a forma de construção da geometria analítica das estruturas construtivas pelo Revit nos dois principais modos de exportação disponíveis: “*Rooms or Spaces*” e “*Building Elements*”. Também foram identificadas as configurações utilizadas pelo *Systems Analysis* para a criação do arquivo IDF, permitindo entender como os parâmetros configurados dentro do Revit são exportados. As propriedades térmicas dos materiais e as camadas dos componentes foram exportadas corretamente para o programa de simulação energética. No entanto, o cruzamento de dados evidenciou alguns problemas, como o erro na criação e aplicação das agendas de uso e o erro encontrado na insolação das janelas do modelo 610. A correção das agendas pôde ser realizada de forma simples dentro do EnergyPlus, enquanto o a insolação foi resolvida quando foi

realizada a inversão das faces do dispositivo de sombreamento, no Sketchup. Após as correções, os resultados de carga térmica obtidos foram compatíveis com o esperado para os casos 600 e 610. Para os modelos estudados foi constatada uma variação entre 1,5% e 2,8% para as cargas térmicas totais do caso 600 e 2,6% e 2,9% para o caso 610, ou seja, menos de 3%.

Após avaliar o desempenho da ferramenta, foram realizados 18 testes com enfoque em avaliar algumas complexidades geométricas comuns nas edificações. Os testes geométricos foram adaptados do *Research Project 1810*, projeto financiado pela ASHRAE para aprimoramento da interoperabilidade BIM-BEM, e contemplaram os seguintes casos: paredes externas de múltiplas camadas; separação virtual de espaços; meia parede; forro de alturas diferentes; piso elevado e forro rebaixado; informações do envelope; ambiente dentro de outro ambiente; piso e forro adjacentes; janela interna; átrio; mansarda; ambiente côncavo; sacada; beiral; pele de vidro; abertura vertical / shaft; parede curva; moldura da janela (XU, 2021). Através deles foi possível identificar como o modo de exportação utilizado nas configurações de energia do Revit influencia na criação do modelo analítico. Também foi possível apontar qual o melhor modo de exportação para as diferentes características construtivas testadas. Ao final, 83,33% dos casos tiveram sua geometria corretamente exportada pelo Revit considerando os dois modos de exportação testados e apenas a mansarda, o forro de diferentes alturas e a parede curva não tiveram sua geometria corretamente interpretada por nenhum dos dois métodos de exportação. O modo “*Rooms or Spaces*” foi identificado como o mais eficiente, capaz de exportar com precisão 77,77% das complexidades geométricas, sendo que 21,43% destas necessitam de algum ajuste de configuração posterior dentro do EnergyPlus. Esse foi o modo escolhido para as simulações para etiquetagem.

Por último, foram realizadas as etiquetagens de quatro edificações, permitindo avaliar as particularidades geométricas e de desempenho em uma única análise. Foram utilizadas três tipologias adaptadas de Melo (2012), onde foi realizada a etiquetagem da envoltória, e o prédio do Anexo FAUrb, que foi simulado para a etiqueta geral. Com o objetivo de ampliar as variáveis testadas, nas tipologias de Melo (2012) foram incluídas seis das dezoito complexidades geométricas testadas na etapa anterior. Das seis complexidades acrescentadas (separações virtuais, forro rebaixado, piso elevado, pé-direito elevado, poço de iluminação e pele de vidro), cinco delas

apresentaram exportação correta e apenas o piso elevado não foi utilizado. Após as correções das agendas de utilização e dos dados de entrada de ar, no EnergyPlus, os modelos criados no Revit apresentaram resultados compatíveis com o esperado e todos, quando comparados com seus modelos controle, obtiveram a mesma etiqueta. A diferença nos percentuais de redução de carga térmica entre os modelos real e de referência foram inferiores a 2,46%. Mesmo quando o modelo energético apresentou pequenos vazios nas superfícies, como nas edificações verticais e no Anexo FAUrb, a diferença nos resultados das cargas térmicas totais em comparação com os modelos sem vazios foi inferior a 0,1%.

Com base nos conhecimentos adquiridos nos testes realizados é possível afirmar que a ferramenta “*Systems Analysis*” representa um avanço na tentativa de resolução das limitações encontradas na interoperabilidade BIM-BEM. O fato de a ferramenta criar um arquivo IDF, um arquivo OSM e um arquivo XML acessível ao projetista permite o constante cruzamento dos dados inseridos, trazendo mais confiabilidade ao processo. Os problemas encontrados, relativos à exportação incorreta de agendas e dados de entrada de ar, puderam ser identificados e resolvidos graças a essa transparência.

Nesta pesquisa foi constatado que para se obter resultados confiáveis a partir da ferramenta são necessárias correções nas agendas de uso, nos dados de entrada de ar e realizar a ativação dos brises, não sendo possível utilizar diretamente a simulação realizada via “*Systems Analysis*” para fins de etiquetagem pela INI-C. Entretanto, cabe ressaltar que os principais gargalos existentes na interoperabilidade BIM-BEM ocorrem por inconsistências na exportação dos modelos geométricos e neste trabalho foi possível demonstrar soluções concretas para a maioria delas, indicando que a ferramenta pode ser considerada uma possibilidade de otimização no processo de etiquetagem por simulação pela INI-C. Além disso, por se tratar de uma ferramenta relativamente nova, é muito provável que esses erros na exportação de dados sejam adequados nas novas versões do Revit.

5.1.1 Limitações da pesquisa

Por se tratar de um estudo desenvolvido sob o enfoque dos OIAs, onde são avaliadas edificações com projetos definidos, normalmente não existe espaço para

adequações. Portanto, uma das limitações da pesquisa foi a não avaliação da ferramenta como uma integrante do processo projetual, inclusive com a utilização de massas conceituais para simulações energéticas.

Devido ao longo período de tempo dispendido para a realização de cada teste, outra limitação observada foi o pequeno espectro amostral analisado, impossibilitando a mensuração quantitativa dos intervalos de confiabilidade dos resultados obtidos. A dificuldade imposta pelo tempo também impediu que todas as complexidades geométricas pudessem ser incluídas nos testes de desempenho, tampouco que fossem testadas outras funcionalidades existentes na ferramenta. Outro aspecto que não foi contemplado na pesquisa foi a relação entre o nível de detalhamento do projeto e os problemas geométricos e ocasionados na exportação dos modelos, assim como não foi possível identificar o nível de informações ideais e necessárias para uma análise energética eficiente.

5.1.2 Recomendações para trabalhos futuros

Com base nos resultados deste trabalho, sugerem-se as seguintes opções de estudo para a continuidade da avaliação da ferramenta *Systems Analysis*:

1. Avaliar as demais complexidades geométricas apresentadas em estudos de caso de desempenho;
2. Avaliar o impacto das inconsistências geométricas nas simulações energéticas;
3. Aumentar o espectro amostral de testes de desempenho;
4. Avaliar outras funcionalidades da ferramenta como a criação de sistemas de ar-condicionado, aquecimento de água, entre outros;
5. Estudar a criação de parâmetros compartilhados para a inserção de novas variáveis energéticas diretamente no Revit, como alteração do arquivo climático, definição das temperaturas de solo, entre outros;
6. Avaliar simulações utilizando o outro “*workflow*” disponível na ferramenta: *HVAC Systems Loads and Sizing*;
7. Avaliar de forma aprofundada as causas e consequências do reordenamento dos vértices, bem como o a “ativação” dos brises

identificados após a inversão de uma das faces do modelo energético gerado pela ferramenta Systems Analysis;

8. Encontrar o nível de detalhamento necessário para a realização das simulações energética utilizando a ferramenta *Systems Analysis*;

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.

ANDRADE, M. L. V. X.; RUSCHEL, R. C. Interoperabilidade de aplicativos BIM usados em arquitetura por meio do formato IFC. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, v. 4, n. 2, 76-111, dez. 2009.

ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 140-2017: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs**. Atlanta, 2017.

AUTODESK – **Green Building Studio Web Service, 2014**. Disponível em: <<https://knowledge.autodesk.com/searchresult/caas/CloudHelp/cloudhelp/ENU/BPA-GBSWebService/files/GUID-DDF449B0-058E-465C-AFF4-7E45917B08EF-html>>. Acesso em: 10 jun. 2022.

AUTODESK BUILDING SOLUTIONS. **Revit 2020.1 Webinar: Revit Systems Analysis for MEP, 2019**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=8kvSB5abVH4>>. Acesso em: 15 abr. 2021.

AUTODESK BUILDING SOLUTIONS. **Revit 2022: MEP Systems Analysis, 2021**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=vjjCJelrIPU>>. Acesso em: 10 jun. 2021.

AUTODESK REVIT – **Autodesk Revit 2023**. Disponível em: <https://help.autodesk.com/view/RVT/2023/ENU>. Acesso em: 5 jan. 2023.

AZEVEDO, N. C.; TAVARES, S. F. Interoperabilidade entre as ferramentas Revit e OpenStudio para simulação termoenergética. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 11, p. e020011, 14 jul. 2020.

BARONE, G.; BUONOMANO, A.; FORZANO, C.; GIUZIO, G.F.; PALOMBO, A. Improving the Efficiency of Maritime Infrastructures through a BIM-Based Building Energy Modelling Approach: A Case Study in Naples, Italy. **Energies** 2021, 14, 4854.

BECKER, K; PARKER, J. R.; A Simulation Primer. *In*: GIBSON, D.; BAEK, Y. K. **Digital Simulations for Improving Education: Learning Through Artificial Teaching Environments**. Nova Iorque. Information Science Reference, 2009.

BUILDINGSMART. buildingSMART International – OpenBIM. Disponível em: <<https://www.buildingsmart.org/about/openbim/>>. Acesso em: 25 out. 2023.

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**. nº 121. 2021.

BRASIL. Decreto nº 10.306, de 2 de abril de 2020. Estabelece a utilização do Building Information Modelling na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal [...]. Brasília: **Diário Oficial da União**. 2020.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Portaria Inmetro nº 309, de 6 de setembro de 2022. Aprova as Instruções Normativas e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas e Residenciais – Consolidado. Brasília: **Diário Oficial da União**. 2022.

CB3E - CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Proposta de método para a avaliação da eficiência ecoenergética com base em energia primária de edificações comerciais, de serviços e públicas**. Versão 03. Florianópolis: Eletrobrás/UFSC, 2017.

CHANG, Y.; HSIEH, S. (2020). A review of Building Information Modeling research for green building design through building performance analysis. **Journal of Information Technology in Construction (ITcon)**, v. 25, p. 1-40, 2020.

CHEN; S.; JIN, R.; ALAM, M. Investigation of interoperability between building information modelling (BIM) and building energy Simulation (BES). **Int. Rev. Appl. Sci. Eng.** 9, 2, 137–144, 2018.

CHOI; J.; JUN, Y; YOON, J; SONG, Y.; PARK, K. A Study of Energy Simulation Integrated Process by Automated Extraction Module of the BIM Geometry Module. **Energies**. v. 12, 2461, 2019.

COELHO, A. C. C. **A utilização do BIM na análise da eficiência energética de edifícios: ferramentas e interoperabilidade.** 2020. 82 f. Dissertação (Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis) – Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Braga, 2020.

CRESPO, C. C., RUSCHEL, R. C.; Ferramentas BIM: um desafio para a melhoria no ciclo de vida do projeto. In: III Encontro de tecnologia de informação e comunicação na construção civil, jul. 2007, Porto Alegre/RS. **Anais.**

DESIGN BUILDER. **Geometry Areas and Volumes.** Disponível em: <<https://designbuilder.co.uk/helpv7.0/Content/GeometryAreasAndVolumes.htm>>. Acesso em: 5 ago. 2023.

EASTMAN, C., TEICHOLZ, P., SACKS, R., LISTON, K., **Manual de BIM: Um Guia de Modelagem da Informação da Construção para Arquitetos, Engenheiros, Gerentes, Construtores e Incorporadores.** Bookman, Porto Alegre, 2014.

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LEE, G. **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors and Facility Managers.** 3. ed. New Jersey: Wiley, 2018.

ELAGIRY, M.; CHARBEL, N.; BOURREAU, P.; DI ANGELIS, E.; Costa, A. IFC to Building Energy Performance Simulation: A Systematic Review of the Main Adopted Tools and Approaches. In **Proceedings of the BauSIM 2020-8th Conference of IBPSA Germany and Austria**, Graz, Austria. September, 2020.

ELNABAWI, M. H. Building Information Modeling - Based Building Energy Modeling: Investigation of Interoperability and Simulation Results. **Front. Built Environ.** v. 6:573971, 2020.

ENERGY DEPARTMENT. **Energy efficiency & renewable energy - Buildings.** Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/buildings/ashrae-standard-140-maintenance-and-development>>. Acesso em: 26 set. 2023.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus Essentials.** Disponível em: <https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.5.0/EnergyPlusEssentials.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2023.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2021.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.

FOSSATI, M.; SCALCO, V. A.; LINCZUK, V. C. C.; LAMBERTS, R. Building energy efficiency: an overview of the Brazilian residential labeling scheme. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 1216–1231, 2016.

GAO, H., KOCH, C., WU, Y. Building information modelling based building energy modelling: A review. **Applied Energy**, v. 238, p.320-343, mar. 2019.

GARCIA, E. G.; ZHU, Z. Interoperability from building design to building energy modeling. **Journal Of Building Engineering**, v. 1, p.33-41, mar. 2015.

GBXML.ORG. Green Building XML. Disponível em: <<https://www.gbxml.org/index.html>>. Acesso em: 25 mai. 2022.

GELLER, Haward S. Revolução energética: política para um futuro sustentável; tradução Maria Vidal Barbosa; revisão técnica Marcio Edgar Schuler. - Rio de Janeiro: Relume Dumará: USAid, 2003.

GERRISH, T. *et al.* Using BIM capabilities to improve existing building energy modelling practices. **Engineering, Construction And Architectural Management**, v. 24, n. 2, p.190-208, mar. 2017.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. Edifício Ambiental. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

GOURLIS, G.; KOVACIC, I. Building information modelling for analysis of energy eficiente Industrial buildings – A case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 68, p. 953-963, 2017.

HENNINGER, R. H.; WITTE, M. J. **EnergyPlus 8.3.0 - Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2011**. Illinois, EUA, 2015.

KAMEL, E.; MEMARI, A. M. Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions. **Automation in Construction**, v. 97, p. 164–180, jan. 2019.

KIM, H.; ANDERSON, K. Energy Modeling System Using Building Information Modeling Open Standards. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 27, n. 3, p. 203–211, maio 2013.

LABEEE – LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Simulação Termo-Energética de Edificações**. Florianópolis. Disponível em: <<https://labeee.ufsc.br/linhas-de-pesquisa/simulacao-termo-energetica-de-edificacoes>>. Acesso em: 29 mai. 2022.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2014.

LEITE, E. F. W.; HACKENBERG, A. M. R. Eficiência energética de envoltória: comparação dos métodos de avaliação RTQ-C e INI-C através de estudo de caso. **Gestão e Sustentabilidade Ambiental**. v. 9, n. esp, p. 532-552, fev. 2020.

LEITZKE, R. K. *et al.* Optimization of the Traditional Method for Creating a Weather Simulation File: The Pelotas.epw Case. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 12, p. 741-756, oct. 2018. DOI: <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2018.10.006>

MELO, A. P. **Desenvolvimento de um método para estimar o consumo de energia de edificações comerciais através da aplicação de redes neurais**. 2012. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012a.

MELO, A. P.; CÓSTOLA, D.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L. M. Assessing the accuracy of a simplified building energy simulation model using BESTEST: The case study of Brazilian regulation. **Energy and Buildings**, v.45, p 219-228, 2012b.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; 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.

NBS - National Building Specification. 10th Annual BIM Report 2020. New Castle Upon Tyne: NBS, 2020.

NREL – **BESTEST GSR ARCHIVE**, 2022. Disponível em: <<https://github.com/NREL/BESTEST-GSR-ARCHIVE>>. Acesso em: 02 fev. 2022.

JUDKOFF, R; NEYMARK, J. **International Energy Agency building energy simulation test (BESTEST) and diagnostic method**. Report NREL/TP-472-6231, NREL, Golden, 1995.

JUDKOFF, R; NEYMARK, J. The BESTEST method for evaluating and diagnosing building energy software. In: **Proceedings of Energy Efficiency in a Competitive Environment**, American Council for an Energy Efficient Economy (ACEEE), Golden, EUA, v.5, p. 175-192, 1998.

OPENSTUDIO. **Modeling Best Practices - OpenStudio SDK User Docs**. Disponível em: <https://nrel.github.io/OpenStudio-user-documentation/help/best_practices/>. Acesso em: 5 ago. 2023.

PBE EDIFICA. **Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações**. Edificações Etiquetadas. Disponível em: <http://pbeedifica.com.br/edificacoes-etiquetadas>. Acesso em: 05 outubro 2021a.

PBE EDIFICA. **Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações**. Sobre o PBE Edifica. Disponível em: <http://pbeedifica.com.br/sobre>. Acesso em: 02 outubro 2021b.

PIMENTEL, B. P.; SILVA, A. S.; BARBOSA, A. T. R.; REIS, M. de M. Comparação dos métodos simplificado e de simulação propostos no novo regulamento brasileiro de etiquetagem de edificações públicas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 179-200, out./dez. 2021.

PINHA, A. P. **Integração entre BIM e BPS: desafios na avaliação de desempenho ambiental na era do projeto e processos digitais**. 2017. 210 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP), São Paulo, 2017.

PORSANI, G. B.; LERSUNDI, K. V.; GUTIÉRREZ, A. S.; BANDERA, C. F. Interoperability between Building Information Modelling (BIM) and Building Energy Model (BEM). **Appl. Sci.** v. 11, p. 2167, 2021.

QUEIRÓZ, G. R.; GRIGOLETTI, G. C.; SANTOS, J. C. P. Interoperabilidade entre os programas Autodesk Revit e EnergyPlus para simulação térmica de edificações.

PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 10, p. e019005, jan. 2019.

ROBINSON, S.; Conceptual modelling for simulation Part I: definition and requirements. **Journal of the Operational Research Society**, v. 59, p. 278-290, 2008.

RODRIGUES, G. M. **Análise de metodologias para avaliação da eficiência energética de edificações públicas**. 2020. 131 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2020.

SANGUINETTI, P.; EASTMAN, C.; AUGENBROE, G., Courthouse energy evaluation: bim and simulation model interoperability in concept design. **In: Proceedings of the Building Simulation**, Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, 1922 - 1929, 2009.

SCHLUETER, A.; THESELING, F.; Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages. **Automation and Construction**, v. 18, p. 153-163, mar. 2009.

SHOUBI, M. V.; SHOUBI, M. V.; BAGCHI, A.; BAROUGH, A. S.; Reducing the operational energy demand in buildings using building information modeling tools and sustainability approaches. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 6, p. 41-55, mar. 2015.

SIRTULI, B. P.; DIAS, R. H. M. de P.; RODRIGUES, E. A. N. Eficiência energética da envoltória de edifícios históricos: métodos RTQ-C e INI-C. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 13, p. 022007, 2022.

SPIRIDIGLIOZZI, G. POMPEI, L. CORNARO, C. SANTOLI, L. BISEGNA, F.. **In: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, nº 609, 2019, Bari, Italia. BIM-BEM support tools for early stages of zero-energy building design.

SUCCAR, B. Building information modelling framework: a research and delivery foundation for industry stakeholders. **Autom. Constr.** v. 18, i. 3, p. 357–375, 2009.

VERNADAT, F.; CHEN, D.; DOUMEINGTS, G., Architectures for enterprise integration and interoperability: Past, present and future, **Computers in Industry**. v. 59: 647 - 659, 2008.

VERSAGE, Rogério de Souza. **Metamodelo para estimar a carga térmica de edificações condicionadas artificialmente**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2015.

XU, W. **Final Report of 1810-RP: Development of Reference Building Information Model (BIM) Test Cases for Improving Usage of Software Interoperability Schemas**. Wexford, Pennsylvania, 2021.

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*. v 12, 221. 2022.

YUAN, S.; O'NEIL, Z. *Testing and validating an equation-based dynamic building program with ashrae standard method of test. In: SimBuild, Third National Conference of IBPSA-USA. Berkley, California. p. 45-52, 2008.*