

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Gabriel Ramos de Queiróz

**ANÁLISE DA INTEROPERABILIDADE ENTRE OS PROGRAMAS
COMPUTACIONAIS AUTODESK REVIT E ENERGYPLUS PARA A
SIMULAÇÃO TÉRMICA DE EDIFICAÇÕES**

Santa Maria, RS
2016

Gabriel Ramos de Queiróz

**ANÁLISE DA INTEROPERABILIDADE ENTRE OS PROGRAMAS
COMPUTACIONAIS AUTODESK REVIT E ENERGYPLUS PARA A SIMULAÇÃO
TÉRMICA DE EDIFICAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Giane de Campos Grigoletti

Santa Maria, RS
2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Ramos de Queiróz, Gabriel

Análise da interoperabilidade entre os programas computacionais Autodesk Revit e EnergyPlus para a simulação térmica de edificações / Gabriel Ramos de Queiróz.- 2016.

169 p.; 30 cm

Orientadora: Giane de Campos Grigoletti

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2016

1. Interoperabilidade 2. Tecnologia BIM 3. Autodesk Revit 2016 4. Simulação térmica 5. EnergyPlus 8.4.0 I. de Campos Grigoletti, Giane II. Título.

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Gabriel Ramos de Queiróz. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: gqueiroz3@gmail.com

Gabriel Ramos de Queiróz

**ANÁLISE DA INTEROPERABILIDADE ENTRE OS PROGRAMAS
COMPUTACIONAIS AUTODESK REVIT E ENERGYPLUS PARA A SIMULAÇÃO
TÉRMICA DE EDIFICAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 16 de agosto de 2016:



Giâne de Campos Grigoletti, Dra. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)



Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos, Dr. (UFSM)

Eduardo Grala da Cunha, Dr. (UFPEl)

Santa Maria, RS
2016

DEDICATÓRIA

*A Deus e aos Santos que seguem minha vida,
por me fazerem acreditar no possível.
Aos meus pais, Tennyson e Martha, e ao meu
irmão, Diego, por serem meus maiores exemplos
e incentivadores. À Ca, por também ter me
acompanhado em todos os momentos.
A eles dedico a conclusão de mais esta etapa.*

AGRADECIMENTOS

À professora Giane Grigoletti, minha orientadora, por depositar confiança na minha capacidade e ter me aceito como seu orientando, por sempre me incentivar em ir além, pelos conhecimentos transmitidos e pela ajuda nos momentos que precisei.

Ao professor Joaquim Pizzutti, fundamental para a minha conclusão no mestrado, estando sempre presente para incentivar a longo do curso, orientar na dissertação e contribuir na banca de defesa.

Ao professor Eduardo Grala, por ter aceitado a participação na banca como membro externo, cujas considerações serão de grande valor para o avanço da pesquisa.

Ao professor Marcos Vaghetti, pela disponibilidade como membro suplente para a banca de defesa da dissertação.

À Camila Dias, meu parzinho, que sempre me deu forças e motivos para seguir em frente sem desanimar, como também contribuiu constantemente na melhora da dissertação.

À Naiara Schimaniak, que participou efetivamente das etapas iniciais da pesquisa.

Ao Norio Takaki, pela revisão do texto em inglês do Abstract.

Aos professores do curso, por trazerem novos conhecimentos que ampliaram minha visão como arquiteto, não só na minha área de pesquisa em conforto ambiental.

Aos colegas de aula, principalmente a amizade de Eudes, Gustavo, Mariela, Liége e Thesse, que tornaram esta caminhada mais divertida.

À Marília, secretária do PPGEC, por sempre esclarecer minhas dúvidas e estar disposta em resolver as pendências ocorridas ao longo do curso.

Aos familiares e amigos, próximos ou distantes, pelo constante apoio nas minhas escolhas.

A todos que de alguma forma colaboraram e incentivaram, direta ou indiretamente, muito obrigado!

RESUMO

ANÁLISE DA INTEROPERABILIDADE ENTRE OS PROGRAMAS COMPUTACIONAIS AUTODESK REVIT E ENERGYPLUS PARA A SIMULAÇÃO TÉRMICA DE EDIFICAÇÕES

AUTOR: Gabriel Ramos de Queiróz
ORIENTADORA: Giane de Campos Grigoletti

O programa computacional Autodesk Revit tem seu uso crescente na prática de projetos de arquitetura devido às vantagens pela incorporação da tecnologia BIM, a qual reúne todas as informações que representam uma edificação real em um único modelo virtual. Contudo suas capacidades ainda não são totalmente exploradas, inclusive no âmbito de simulação computacional de edificações no qual o programa carece de ferramentas para análises térmicas detalhadas do ambiente construído. Portanto, este estudo objetivou analisar o grau de confiabilidade da interoperabilidade entre os programas Autodesk Revit 2016 e EnergyPlus 8.4.0, para verificar o uso de modelos digitais de edificações criados no Revit em simulações térmicas realizadas na ferramenta EnergyPlus, uma das mais difundidas para este fim. A metodologia consistiu em estudos de caso com modelos de edificações baseados no Case 600, da norma ASHRAE Standard 140, e no Projeto Casa Eficiente, localizado em Florianópolis. Os modelos digitais de ambas as edificações foram produzidos no Revit com diferentes processos de modelagem (massas conceituais ou elementos de construção com ambientes ou espaços inseridos) e configurações do programa. Todos estes modelos BIM foram exportados nos formatos de arquivo IFC, gbXML e IDF e posteriormente convertidos para a extensão suportada pelo EnergyPlus, com o auxílio de ferramentas adicionais, para serem abertos no programa. Tais arquivos foram comparados com o modelo de referência de cada edificação produzido diretamente no EnergyPlus, por meio do programa SketchUp com o *plug-in* Legacy OpenStudio, para verificar as distorções na transferência das informações quando foi realizada a exportação e conversão dos modelos. Esta comparação foi feita com base em parâmetros definidos para as geometrias, configurações de simulação (propriedades térmicas dos materiais, padrões de uso e ocupação, entre outros) e resultados das simulações com valores de saída para as temperaturas internas mensais das zonas térmicas de cada modelo. Os resultados demonstraram variações e similaridades entre os tipos de modelagem, de processo de exportação e de formato de arquivo utilizado, cujas distorções na transferência dos dados são maiores quanto mais complexo for o modelo da edificação. A pesquisa apontou que os modelos de massas conceituais provenientes de arquivos gbXML, independentemente do modo de exportação a partir do Revit, configuraram-se como alternativa mais viável para utilização no EnergyPlus, por se manterem mais próximos à geometria da edificação, ainda que sejam transferidas configurações padrão do Revit que podem não retratar a realidade do ambiente construído. Porém, foi verificado que, de maneira geral, os modelos digitais do Autodesk Revit não são recomendados para esse tipo de exportação devido ao retrabalho diante da necessidade de correções nos arquivos. Concluiu-se que não é perfeita a interoperabilidade entre os programas computacionais Autodesk Revit e EnergyPlus, pois existe a possibilidade de transferência de informações para simulações térmicas de edificações, entretanto nesta troca há distorções nas geometrias e falta de dados necessários para a correta execução da simulação em todos os modelos exportados.

Palavras-chave: Interoperabilidade. Tecnologia BIM. Autodesk Revit 2016. Simulação térmica. EnergyPlus 8.4.0.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE INTEROPERABILITY BETWEEN AUTODESK REVIT AND ENERGYPLUS FOR THERMAL SIMULATIONS IN BUILDINGS

AUTHOR: Gabriel Ramos de Queiróz
ADVISER: Giane de Campos Grigoletti

The Autodesk Revit software has been increasingly used in architecture due to the advantages brought about by the incorporation of BIM technology, which combines all the information representing a real building into a single virtual model. However, its capabilities have not yet been fully explored, such as in building simulations, for which Revit lacks detailed thermal analytical features. Thus, this study aims to examine the reliability of the interoperability between Autodesk Revit 2016 and EnergyPlus 8.4.0 by using Revit models for thermal simulations in EnergyPlus, one of the most commonly used tools for this purpose. The methodology consists of case studies targeting building models based on Case 600, from ASHRAE Standard 140, and Casa Eficiente Project, located in the city of Florianópolis, Brazil. The digital models of both buildings were produced in Revit with different modelling processes (conceptual mass or building elements with rooms or spaces) and software settings. All of these BIM models were exported in IFC, gbXML and IDF file formats and later converted through the use of additional tools in order to be opened in EnergyPlus. Such files were compared with the reference model of each building produced directly in EnergyPlus, using SketchUp containing the plug-in Legacy OpenStudio, in order to check for any distortions occurring in the process of data transfer when performing model exports and conversions. This comparison was based on parameters defined for geometry, simulation settings (materials' thermal properties, building use and occupation etc.) and simulation results containing outputs of monthly internal temperatures for the thermal zones of each model. The results showed variations and similarities among the different types of modelling, export processes, and file formats used, revealing that distortions in data transfer become larger the more complex the building model is. This study points out conceptual mass models from gbXML files – regardless of the export mode out of Revit – as a viable alternative to be used in conjunction with EnergyPlus, as they preserve the geometrical accuracy of the building, even as some Revit default settings may be transferred over, thus failing to reflect some of the aspects of the real built environment. However, it was found that Revit models in general are not recommended for these types of exports due to the resulting rework needed for correcting files. It was concluded that the interoperability between Autodesk Revit and EnergyPlus is not perfect, as their combined use allows for data transfers that make possible the thermal simulation of buildings, however, in this exchange there are distortions in the exported geometries and lack of the necessary data for correct simulation in all exported models.

Keywords: Interoperability. Building Information Modeling. Autodesk Revit 2016. Thermal simulation. EnergyPlus 8.4.0.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Funcionamento da plataforma BIM	27
Figura 2 – Maneira lógica de projetar integrando a simulação	35
Figura 3 – Características necessárias para programa computacionais de avaliação do desempenho térmico	38
Figura 4 – Ferramentas de simulação de edificações desenvolvidas para arquitetos e engenheiros entre 1997 e 2010	49
Figura 5 – Estrutura geométrica do IFC e do gbXML	59
Figura 6 – Vistas da Casa Eficiente: (a) fachada sul e (b) fachada norte	63
Figura 7 – Resumo da metodologia	70
Figura 8 – Edificações correspondentes aos modelos digitais criados na pesquisa	71
Figura 9 – Processo de criação dos modelos para o EnergyPlus	71
Figura 10 – Geometria da edificação do Case 600	72
Figura 11 – Case 600 modelado no SketchUp pelo <i>plug-in</i> Legacy OpenStudio	75
Figura 12 – Plantas baixas da Casa Eficiente: (a) térreo e (b) pavimento superior	76
Figura 13 – Esquema das paredes: (a) dupla e (b) simples	77
Figura 14 – Esquema das coberturas: (a) telha cerâmica, (b) telha metálica e (c) cobertura vegetada	78
Figura 15 – Esquema das esquadrias	78
Figura 16 – Perspectivas da modelo da Casa Eficiente produzido no SketchUp: fachadas (a) leste e sul e (b) oeste e norte	80
Figura 17 – Tipos de modelos de edificações no Autodesk Revit 2016	83
Figura 18 – Serviço de Mapeamento na Internet: pino vermelho representa a localização da edificação, em azul as estações climáticas disponíveis e em laranja a estação climática selecionada	84
Figura 19 – Padrões de uso e ocupação definidos no Revit para o Case 600	85
Figura 20 – Modelo de massa conceitual do Case 600	86
Figura 21 – Configurações comuns de energia para o Case 600	87
Figura 22 – Configurações do modelo de energia para a massa do Case 600	87
Figura 23 – Construções conceituais do modelo de massa do Case 600	88
Figura 24 – Configurações dos serviços de construção do modelo de energia (a) e das trocas de ar por hora (b) do Case 600	89
Figura 25 – Modelo analítico de energia do Case 600 a partir de massas conceituais	90
Figura 26 – Modelo de construção do Case 600	90
Figura 27 – Exemplo de edição da parede do Case 600	91
Figura 28 – Exemplo de edição das propriedades térmicas da manta de fibra de vidro	92
Figura 29 – Configurações do modelo detalhado com ambientes para o Case 600	93
Figura 30 – Configurações do modelo de energia com ambientes do Case 600	94

Figura 31 – Espaço analítico do modelo de energia do Case 600.....	94
Figura 32 – Superfícies analíticas do modelo de energia do Case 600.....	95
Figura 33 – Espaço inserido no modelo do Case 600.....	95
Figura 34 – Configurações de espaço no Revit para o Case 600.....	96
Figura 35 – Configurações de tipo de espaço para o Case 600.....	96
Figura 36 – Propriedades de tipo de construção para espaços.....	97
Figura 37 – Definições de (a) ocupação e (b) uso para o espaço do Case 600.....	98
Figura 38 – Configurações do modelo detalhado com espaços para o Case 600.....	99
Figura 39 – Definição da localização e da estação climática da Casa Eficiente por meio do Serviço de Mapeamento na Internet.....	100
Figura 40 – Padrões de uso e ocupação definidos no Revit para a Casa Eficiente.....	101
Figura 41 – Modelo de massa conceitual da Casa Eficiente.....	102
Figura 42 – Configurações comuns de energia para a Casa Eficiente.....	103
Figura 43 – Construções conceituais do modelo de massa da Casa Eficiente.....	104
Figura 44 – Modelo analítico de energia da Casa Eficiente a partir de massas conceituais.....	104
Figura 45 – Modelo de construção da Casa Eficiente: fachadas (a) leste e sul e (b) oeste e norte.....	105
Figura 46 – Exemplo de edição da (a) parede simples da Casa Eficiente e das (b) propriedades térmicas do poliestireno extrudado.....	106
Figura 47 – Configurações do modelo detalhado com ambientes para a Casa Eficiente.....	107
Figura 48 – (a) Espaços e (b) superfícies analíticos do modelo de energia da Casa Eficiente a partir de elementos de construção, em destaque o quarto de casal.....	107
Figura 49 – Exemplo de espaço inserido para o quarto de casal no modelo da Casa Eficiente.....	108
Figura 50 – Exemplo de configurações de espaço no Revit para o quarto de casal da Casa Eficiente.....	109
Figura 51 – Exemplo de configurações de tipo de espaço para o quarto de casal da Casa Eficiente.....	110
Figura 52 – Exemplo de definições de (a) ocupação e (b) uso para o espaço do quarto de casal da Casa Eficiente.....	111
Figura 53 – Formatos de arquivos utilizados na pesquisa.....	112
Figura 54 – Exportação para arquivo IFC no Autodesk Revit 2016.....	113
Figura 55 – Processo de conversão dos arquivos IFC para formatos IDF.....	114
Figura 56 – Exemplo da associação de materiais aos elementos de construção para o modelo de construção com espaços do Case 600.....	114
Figura 57 – Opções de exportação para arquivos gbXML.....	115
Figura 58 – Opções de exportação como arquivo gbXML a partir do <i>menu</i> do Revit.....	115
Figura 59 – Exemplo de visualização de elementos do modelo nas configurações de exportação para arquivos gbXML.....	116
Figura 60 – Opções de exportação como arquivo gbXML a partir dos resultados da análise de energia do Revit.....	117

Figura 61 – Processo de conversão dos arquivos gbXML para formatos IDF	117
Figura 62 – Processo de exportação dos modelos como arquivos em formato IDF	118
Figura 63 – Erro na conversão do arquivo IFC com o modelo de massas conceituais do Case 600	122
Figura 64 – Notificações sobre a tolerância de espessuras no SBT para o Case 600	122
Figura 65 – Exemplo de aviso de erro de linguagem no EnergyPlus para arquivos IFC convertidos dos modelos de construção do Case 600	123
Figura 66 – Geometria do modelo de massas conceituais do Case 600 exportado em arquivos gbXML	125
Figura 67 – Aviso de erro na identificação das janelas nos modelos de construção do Case 600	126
Figura 68 – Geometria do modelo de construção com ambientes do Case 600 exportado em arquivos gbXML do <i>menu</i> principal do Revit	126
Figura 69 – Geometria do modelo de massas conceituais do Case 600 exportado em arquivos IDF	130
Figura 70 – Propriedades analíticas de janelas no Autodesk Revit	132
Figura 71 – Avisos sobre a tolerância de espessuras no SBT para a Casa Eficiente	139
Figura 72 – Geometria do modelo de massas conceituais da Casa Eficiente exportado em arquivos gbXML: fachadas (a) leste e sul e (b) oeste e norte	141
Figura 73 – Geometria do modelo de construção com ambientes da Casa Eficiente exportado em arquivos gbXML do <i>menu</i> principal do Revit: fachadas (a) leste e sul e (b) oeste e norte	142
Figura 74 – Geometria do modelo de construção com espaços da Casa Eficiente exportado em arquivos gbXML do <i>menu</i> principal do Revit: fachadas (a) leste e sul e (b) oeste e norte	143
Figura 75 – Geometria do modelo de construção da Casa Eficiente exportado em gbXML dos resultados do Revit e do GBS: fachadas (a) leste e sul e (b) oeste e norte	144
Figura 76 – Geometria do modelo de massas conceituais da Casa Eficiente exportado em arquivos IDF: fachadas (a) leste e sul e (b) oeste e norte	147
Figura 77 – Geometria dos modelos de construção da Casa Eficiente exportados em arquivos IDF: fachadas (a) leste e sul e (b) oeste e norte	148

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação CAD x BIM	26
Quadro 2 – Tipos existentes de conexão do BIM para BEM	45
Quadro 3 – Erros emitidos após as simulações no EnergyPlus	51
Quadro 4 – Características de clima e localização do arquivo climático DRYCOLD.TMY	74
Quadro 5 – Atividades realizadas e calor produzido nas zonas térmicas do modelo.....	82

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Ocupação da Casa Eficiente no dia 7 de janeiro de 2008	81
Gráfico 2 – Tabela de ocupação da Casa Eficiente configurada no Revit.....	102
Gráfico 3 – Comparação entre os resultados das simulações iniciais para o Case 600	133
Gráfico 4 – Comparação entre os resultados das simulações finais para o Case 600	134
Gráfico 5 – Comparação entre os resultados das simulações iniciais para as zonas do (a) quarto de casal e do (b) banheiro da Casa Eficiente	150
Gráfico 6 – Comparação entre os resultados das simulações finais para as zonas do (a) quarto de casal e do (b) banheiro da Casa Eficiente	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos fechamentos opacos empregados no Case 600	72
Tabela 2 – Propriedades relevantes das janelas.....	73
Tabela 3 – Características dos materiais empregados na Casa Eficiente	79
Tabela 4 – Resultados das simulações com modelos de massas conceituais para o Case 600	135
Tabela 5 – Resultados das simulações com modelos de construção com ambientes para o Case 600	136
Tabela 6 – Resultados das simulações com modelos de construção com espaços para o Case 600.....	137
Tabela 7 – Diferença das médias dos resultados das simulações para o Case 600	137
Tabela 8 – Resultados das simulações com modelos de massas conceituais para as zonas do quarto de casal e do banheiro da Casa Eficiente	153
Tabela 9 – Resultados das simulações com modelos de construção com ambientes para as zonas do quarto de casal e do banheiro da Casa Eficiente	154
Tabela 10 – Resultados das simulações com modelos de construção com espaços para as zonas do quarto de casal e do banheiro da Casa Eficiente	156
Tabela 11 – Diferença das médias dos resultados das simulações para as zonas do quarto de casal e do banheiro da Casa Eficiente	157

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção civil
α	Absortância
ANSI	American National Standards Institute
API	Application Programming Interface
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado
BEA	Building Energy Analysis
BEM	Building Energy Modeling
BESTEST	Building Energy Simulation Test
BIM	Building Information Modeling
BPS	Building Performance Simulation
c	Calor específico
CAD	Computer Aided Design
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
C_T	Capacidade térmica
DOE	United States Department of Energy
e	Espessura
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
ELETROSUL	Centrais Elétricas S.A.
EP	EnergyPlus
EPW	EnergyPlus Weather
FS_t	Fator de ganho de calor solar de elementos transparentes ou translúcidos
GBS	Green Building Studio
gbXML	Green Building eXtensible Markup Language
GUI	Graphical User Interface
HTML	HyperText Markup Language
IAI	International Alliance for Interoperability
IBPSA	International Building Performance Simulation Association
IDF	EnergyPlus Input Data File
IEA	International Energy Agency
IFC	Industry Foundation Classes
ISO	International Standard Organization
λ	Condutividade térmica
LABEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LMBEE	Laboratório de Monitoramento Bioclimático e Eficiência Energética
MEP	Mechanical, Electrical and Plumbing
MVD	Model View Definitions
NBR	Norma Brasileira

NREL	National Renewable Energy Laboratory
N_v	Taxa de renovação de ar
OOP	Object-Oriented Programming
OOPM	Object-Oriented Physical Modeling
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PTHP	Packaged Terminal Heat Pump
R	Resistência térmica de elementos e componentes
R_t	Resistência térmica de superfície a superfície
R_T	Resistência térmica total
RVT	Revit
ρ	Densidade de massa aparente
SBT	Space Boundary Tool
SMOT	Standard Method of Test
TM	Taxa metabólica
TMY	Typical Meteorological Year
TMY2	Typical Meteorological Year 2
TRY	Test Reference Year
U	Transmitância térmica
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
XML	Extensible Markup Language

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	PROBLEMA	18
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo Geral	19
1.2.2	Objetivos específicos	19
1.3	JUSTIFICATIVA	19
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2	REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1	TECNOLOGIA BIM (<i>BUILDING INFORMATION MODELING</i> – MODELAGEM DE INFORMAÇÕES DA CONSTRUÇÃO)	25
2.2	MODELAGEM ENERGÉTICA DA CONSTRUÇÃO (<i>BUILDING</i> <i>ENERGY MODELING</i> – BEM)	28
2.3	ASPECTOS TÉRMICOS DE UMA EDIFICAÇÃO	31
2.4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL TÉRMICA DE EDIFICAÇÕES	34
2.5	INTEROPERABILIDADE	40
2.5.1	Transformação de modelos BIM para BEM	42
2.6	PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS NA PESQUISA PARA MODELAGEM, CONVERSÃO E SIMULAÇÃO	47
2.6.1	EnergyPlus	49
2.6.2	Autodesk Revit	51
2.6.3	Autodesk Green Building Studio	52
2.6.4	OpenStudio	53
2.6.5	Space Boundary Tool	54
2.7	ARQUIVOS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS NA PESQUISA	55
2.7.1	Arquivos gbXML	56
2.7.2	Arquivos IFC	57
2.7.3	Arquivos IDF	60
2.8	EDIFICAÇÕES UTILIZADAS NA PESQUISA PARA OS MODELOS DIGITAIS	60
2.8.1	Case 600 – ASHRAE Standard 140	60
2.8.2	Projeto Casa Eficiente	62
2.9	TRABALHOS SIMILARES PRODUZIDOS NA ÁREA DA PESQUISA	65
3	MATERIAIS E MÉTODOS	69
3.1	DEFINIÇÃO DOS MODELOS DE EDIFICAÇÕES NO ENERGYPLUS	71
3.1.1	Case 600 – ASHRAE Standard 140	72
3.1.2	Projeto Casa Eficiente	75
3.2	MODELAGEM DAS EDIFICAÇÕES NO AUTODESK REVIT	82
3.2.1	Case 600 – ASHRAE Standard 140	84
<i>3.2.1.1</i>	<i>Modelo de massa conceitual do Case 600</i>	86
<i>3.2.1.2</i>	<i>Modelo de construção com ambientes do Case 600</i>	90
<i>3.2.1.3</i>	<i>Modelo de construção com espaços do Case 600</i>	95
3.2.2	Projeto Casa Eficiente	99
<i>3.2.2.1</i>	<i>Modelo de massas conceituais da Casa Eficiente</i>	102
<i>3.2.2.2</i>	<i>Modelo de construção com ambientes da Casa Eficiente</i>	105
<i>3.2.2.3</i>	<i>Modelo de construção com espaços da Casa Eficiente</i>	108

3.3	EXPORTAÇÃO E CONVERSÃO DOS MODELOS PRODUZIDOS.....	112
3.3.1	Arquivos IFC	112
3.3.2	Arquivos gbXML	115
3.3.3	Arquivos IDF	118
3.4	PARÂMETROS DE COMPARAÇÃO	118
3.4.1	Geometrias	118
3.4.2	Configurações de simulação	119
3.4.3	Resultados das simulações	119
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	121
4.1	CASE 600	121
4.1.1	Arquivos IFC	121
4.1.1.1	<i>Análise das geometrias</i>	121
4.1.1.2	<i>Verificação das configurações de simulação</i>	123
4.1.2	Arquivos gbXML	124
4.1.2.1	<i>Análise das geometrias</i>	124
4.1.2.2	<i>Verificação das configurações de simulação</i>	127
4.1.3	Arquivos IDF	129
4.1.3.1	<i>Análise das geometrias</i>	130
4.1.3.2	<i>Verificação das configurações de simulação</i>	131
4.1.3.3	<i>Comparação entre os resultados das simulações</i>	133
4.2	PROJETO CASA EFICIENTE	138
4.2.1	Arquivos IFC	138
4.2.1.1	<i>Análise das geometrias</i>	138
4.2.2	Arquivos gbXML	140
4.2.2.1	<i>Análise das geometrias</i>	140
4.2.2.2	<i>Verificação das configurações de simulação</i>	145
4.2.3	Arquivos IDF	146
4.2.3.1	<i>Análise das geometrias</i>	146
4.2.3.2	<i>Verificação das configurações de simulação</i>	148
4.2.3.3	<i>Comparação entre os resultados das simulações</i>	150
4.3	ANÁLISES GERAIS	157
5	CONCLUSÃO	161
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	162
	REFERÊNCIAS	165

1 INTRODUÇÃO

A partir das primeiras técnicas de desenho à mão livre até o posterior uso de instrumentos para a representação de edificações, foi surgindo novas possibilidades diante da necessidade de maior precisão e rapidez na entrega e aprovação de projetos arquitetônicos. Foi então que o advento da informática permitiu o surgimento de diversas ferramentas tecnológicas para o auxílio em diferentes campos do conhecimento, inclusive na Arquitetura, Engenharia e Construção civil (AEC) (CHICCA JUNIOR, 2007).

Atualmente no Brasil, o programa computacional AutoCAD da empresa Autodesk, que representa uma prancheta virtual de criação de linhas (CRESPO; RUSCHEL, 2007), é um dos mais difundidos entre os profissionais da área, inclusive ensinado na maioria das instituições de ensino do país. Porém, uma nova plataforma dessa mesma empresa vem ganhando cada vez mais usuários, o programa Autodesk Revit.

O Revit é um programa computacional de concepção de projetos de arquitetura e complementares e também um sistema de documentação do projeto que suporta todas as fases do processo (JUSTI, 2010). Seu crescimento de popularidade deve-se às vantagens da tecnologia *Building Information Modeling* (BIM, ou Modelagem de Informações da Construção). Esta tecnologia promove um método avançado de trabalho colaborativo, utilizando um modelo virtual da edificação criado a partir de um banco de dados com informações coordenadas e consistentes (CRESPO; RUSCHEL, 2007; HIPPERT; ARAÚJO, 2010).

Em suas últimas versões foi incorporada ao programa a ferramenta de análise de energia de edificações baseada na nuvem, ou seja, a simulação e o acesso aos serviços são remotos pela internet. Tal instrumento permite os usuários obterem informações energéticas sobre o consumo e os custos do ciclo de vida da edificação, auxiliando na análise do ambiente construído e na escolha de melhores alternativas de projetos (AUTODESK, 2016a).

Além disso, há outros componentes também de posse da Autodesk que, associados ao Revit, auxiliam nessa análise do ambiente construído, tais como o Green Building Studio e o CFD. A empresa também possuía outros programas para este fim, como por exemplo o Vasari e o Ecotect Analysis que não são mais desenvolvidos e fornecidos, destacando-se este último pois era um programa

abrangente de análise visando a sustentabilidade e oferecia uma ampla gama de funcionalidades e simulações para prever o comportamento de edificações (AUTODESK, 2016b).

Apesar de ser uma ferramenta bastante utilizada, o BIM ainda não está sendo aproveitado em todo seu potencial, apenas algumas de suas capacidades são exploradas (SAYEGH, 2011 apud MENEZES, 2011). É a partir desta informação que o trabalho explora a utilização adequada de potencialidades específicas desta tecnologia, por meio do sistema Revit, para a simulação de edificações, pois programas computacionais específicos para este fim são importantes ferramentas para análises detalhadas do desempenho termoenergético, devido às facilidades na manipulação das variáveis e no tempo de processamento de diferentes alternativas (LAMBERTS et al., 2010a; SPANNENBERG, 2006).

1.1 PROBLEMA

De acordo com o *site* do Ecotect Analysis (AUTODESK, 2016b), o programa parou de ser disponibilizado em 20 de março de 2015. Com isso, a empresa Autodesk irá integrar funcionalidades semelhantes do Ecotect para o Revit, maximizando os esforços de desenvolvimento no BIM e em soluções baseadas em nuvem para análise de desempenho de edificações.

Enquanto isso não ocorre, o Revit carece de ferramentas para uma análise mais aprofundada de edificações, especificamente na área da térmica. Por este motivo, a presente pesquisa acadêmica buscou alternativas para a utilização de modelos digitais produzidos no Revit para a simulação térmica de edificações na ferramenta EnergyPlus, visando contribuir para o incentivo e desenvolvimento do uso da tecnologia BIM para a análise do ambiente construído nas práticas de projeto.

Diante disso, surgiram alguns questionamentos que estabeleceram os problemas acerca do assunto abordado: o programa computacional Autodesk Revit representa uma ferramenta que pode ser utilizada no processo de simulações térmicas de edificações? É possível exportar modelos digitais produzidos no Autodesk Revit com todas as informações necessárias para simulações mais detalhadas no EnergyPlus? Se sim, como é possível e o que é necessário para realizar tais exportações? E, depois de exportado, qual a melhor opção para o processo de exportação dos modelos BIM?

1.2 OBJETIVOS

A seguir, são apresentados os objetivos propostos que guiaram a pesquisa realizada nesta dissertação.

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o grau de confiabilidade da interoperabilidade entre os programas computacionais Autodesk Revit 2016 e EnergyPlus 8.4.0 para a simulação térmica de edificações.

1.2.2 Objetivos específicos

A pesquisa tem como objetivos específicos:

- a) identificar e definir as possibilidades de diferentes configurações de modelos digitais no programa Autodesk Revit e de exportações em formatos de arquivos computacionais disponíveis, por meio de estudos de caso de edificações;
- b) avaliar a distorção na transferência de dados resultantes das exportações dos modelos virtuais e simulações térmicas na ferramenta EnergyPlus por meio de parâmetros de comparação;
- c) apontar as melhores opções de prática para a simulação térmica de edificações na ferramenta EnergyPlus a partir de modelos digitais produzidos no programa computacional Autodesk Revit.

1.3 JUSTIFICATIVA

Do ponto de vista do pesquisador, os motivos que conduziram à escolha do objeto de estudo em questão surgiram do fascínio por ferramentas de computador utilizadas para representar edificações, que facilitam o trabalho de projeto e a cada evolução aproximam-se cada vez mais da realidade das construções. Outro motivo também é a busca por uma arquitetura responsável focada na sustentabilidade como pré-requisito básico de projeto, sendo eficiente e preocupada com o conforto de seus usuários e os impactos produzidos ao meio ambiente.

No âmbito acadêmico, a inexistência de trabalhos atualizados em um campo da tecnologia que sofre constantes modificações se mostrou como fator motivador para a pesquisa, no sentido de atualizar as informações acerca do tema, envolvendo a questão térmica e utilizando programas computacionais inseridos na realidade brasileira.

Além disso, este estudo evidenciará que a adição de ferramentas tecnológicas representa um subsídio aos profissionais da área para atenderem ao desempenho das edificações e satisfação de conforto dos seus usuários, como também para reduzir os impactos produzidos ao meio ambiente, pela avaliação de alternativas arquitetônicas mais adequadas e eficientes.

Isto representa uma vantagem competitiva dentro do mercado de trabalho, fornecendo informações importantes, economias de custos e melhor coordenação e qualidade para o projeto. Ainda contribui para uma maior interação entre arquitetos e outros profissionais envolvidos, uma vez que o desenvolvimento sustentável depende dessa interdisciplinaridade de conhecimentos.

Ainda nesse aspecto, a escolha do tema pela tecnologia BIM justifica-se pelas suas vantagens e capacidade de representação virtual de uma edificação e pela grande procura de ferramentas baseadas nesta plataforma, sendo cada vez mais utilizadas em escritórios nacionais e já consolidada internacionalmente, como uma forma de preencher uma lacuna no conhecimento desses programas para a análise do comportamento térmico de edificações.

Dentre os programas computacionais existentes, o Autodesk Revit foi selecionado por ser difundido no país e possuir uma interface gráfica mais didática e visual que facilita o seu uso e pode despertar o interesse de qualquer profissional da área pela busca de mais conhecimentos acerca da avaliação do ambiente construído.

O EnergyPlus foi escolhido como ferramenta complementar de análise por possibilitar a integração com o Revit, apresentar potencialidades em simulações de edificações e ser um programa consolidado para este fim e recomendado por instruções normativas brasileiras.

Optou-se pela análise térmica para limitar a abrangência dos comportamentos que uma edificação exerce e por afetar em grande parcela no conforto de seus usuários e na eficiência energética durante o seu uso, colaborando para a escolha de melhores estratégias a serem utilizadas nos projetos arquitetônicos. Além disso, no

âmbito das certificações de sustentabilidade, o consumo de energia possui o maior impacto nas análises.

As edificações selecionadas como estudos de caso foram definidas por serem objetos representativos com informações disponíveis suficientes para a utilização no decorrer da investigação.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O corpo do trabalho está dividido em cinco seções principais, no qual aqui nesta primeira seção foi feita uma contextualização do tema, de onde o prévio conhecimento acerca do assunto fez surgir questões que motivaram a pesquisa. A partir disso foram apresentados os objetivos da dissertação. Em seguida houve a necessidade de justificar o interesse e o porquê da escolha por esse assunto, sob os pontos de vista acadêmico e pessoal.

A seção 2 trata da revisão de literatura dos elementos que fundamentaram o entendimento da pesquisa. São abordados a tecnologia BIM, a modelagem energética de edificações e o processo de transformação entre ambos para a simulação do comportamento térmico do ambiente construído, apresentando os programas computacionais e os tipos de arquivos utilizados para a produção dos modelos digitais das edificações empregadas como estudos de caso.

Deste modo, foram definidos os procedimentos metodológicos para alcançar os objetivos da investigação. A seção 3 esclarece a metodologia empregada, detalhando os processos de modelagem das edificações nos programas Autodesk Revit e EnergyPlus, as exportações dos modelos nos formatos de arquivos definidos, assim como os parâmetros de comparação utilizados com os dados obtidos das simulações executadas.

Na seção 4 são expostos detalhadamente os resultados alcançados com a pesquisa e é realizada a análise para cada variação de modelo produzido e de sua respectiva exportação, comparando-os com o modelo de referência definido para cada edificação estudada para identificar as distorções na transferência de dados durante o processo.

E a seção 5 finaliza o trabalho com as conclusões de acordo com os objetivos estabelecidos na pesquisa, fornecendo respostas aos questionamentos iniciais sobre

a interoperabilidade entre os programas Autodesk Revit e EnergyPlus para a simulação térmica de edificações.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O surgimento e a transformação da representação gráfica de edificações ocorreram diante das necessidades iminentes do homem em caracterizar o ambiente construído com o máximo de informações, o que provoca motivação suficiente para o descobrimento de novas alternativas (CHICCA JUNIOR, 2007).

Chicca Junior (2007) demonstra que desta maneira ocorreu a transformação nas representações ao longo do tempo: desde as manifestações pré-históricas do ser humano em cavernas, atravessando pela perspectiva criada no Renascimento, até a Revolução Industrial e as duas Guerras Mundiais, quando foi necessária a transição da maneira gráfica como o objeto era representado – de manual (artesanal) para digital (linha de produção acelerada em larga escala).

Com isso foram desenvolvidas tecnologias com métodos de trabalho cada vez mais aperfeiçoados, que até hoje estão otimizando integralmente os processos de desenvolvimento de projetos arquitetônicos pela expansão dos recursos da computação gráfica (CHICCA JUNIOR, 2007). Os desenvolvedores de *softwares* estão constantemente estendendo as fronteiras, introduzindo novos recursos em seus programas para apoiar o fluxo de trabalho integrado e agregar especialistas para participar desde a fase inicial do projeto (SHADRINA, 2015), como para a simulação computacional e avaliação do desempenho das edificações.

A computação gráfica é uma área destinada à geração de imagens em geral para a representação de informações ou recriação do mundo real (MACHADO, 2003 apud CHICCA JUNIOR, 2007). Quanto às potencialidades deste artifício,

é uma ferramenta de apoio ao projeto permitindo o uso de novos recursos para facilitar o método tradicional de representação. Contudo a computação gráfica se configura não apenas como uma ferramenta de digitalização de projetos. Ela permite a **avaliação** de vários aspectos de importância relevante no projeto [como por exemplo o comportamento térmico de edificações]. (CHICCA JUNIOR, 2007, p. 44, grifo nosso).

Inicialmente o desenho digital configurou-se pela representação informatizada em duas dimensões por sistemas de desenho assistido por computador (*Computer Aided Design* – CAD). Porém essa reprodução bidimensional ainda era insuficiente pela necessidade de facilitar a compreensão espacial por pessoas leigas, então o

avanço da informática permitiu também o processo de representação tridimensional dos espaços (CHICCA JUNIOR, 2007).

Os programas CAD facilitam a concepção de projetos em vistas 2D ou 3D pois possibilitam o usuário desenhar e modificar rapidamente as representações da edificação diretamente no computador em substituição à reprodução no papel (CHICCA JUNIOR, 2007; EASTMAN et al., 2014). Contudo, Crespo e Ruschel (2007) advertem que sistemas exclusivamente CAD funcionam apenas como ferramentas de traçado de linhas ou volumes do desenho e assim limitam o computador como uma prancheta eletrônica.

Além disso, a representação de entidades geométricas genéricas por esses sistemas pode ser interpretada de qualquer modo quanto aos materiais e comportamentos, tornando-os limitantes diante das novas necessidades decorrentes dos avanços tecnológicos na indústria da construção, das crescentes preocupações ecológicas e do surgimento de um trabalho colaborativo a distância devido ao crescimento da internet. Estas novas tendências levaram à necessidade de criação de ferramentas de análise dos projetos de edificações e que permitam essa interação colaborativa (EASTMAN et al., 2014; MARTINS, 2011).

Essas necessidades induziram a uma evolução das ferramentas, que estão se transformando lentamente do CAD para o conceito BIM. Estas tecnologias são bastante semelhantes em sua usabilidade e funções básicas, ressaltando a diferença em suas capacidades que serão demonstradas na seção seguinte deste trabalho, de forma que a escolha dos arquitetos em qual deles utilizar normalmente ainda é baseada em suas preferências (MARTINS, 2011; SHADRINA, 2015).

Com isso o BIM está se tornando popular nos processos de concepção de projetos de edificações, sendo progressivamente adotado por escritórios de arquitetura e com iniciativas para a sua difusão no setor da construção, apesar das dificuldades de implementação (KASSEM; AMORIM, 2015; MENEZES, 2011; SHADRINA, 2015). Como declarou Cristiano Ceccato (2011 apud MENEZES, 2011), no Seminário Internacional sobre Arquitetura Digital: BIM, Sustentabilidade e Inovação, o BIM se tornará obrigatório no mercado da construção civil, assim como o CAD é atualmente, conduzindo para um benefício em todos os aspectos das edificações uma vez que esse sistema permite incorporar análises do ambiente construído.

2.1 TECNOLOGIA BIM (*BUILDING INFORMATION MODELING* – MODELAGEM DE INFORMAÇÕES DA CONSTRUÇÃO)

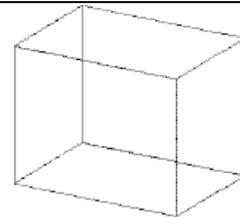
A tecnologia BIM é uma plataforma CAD para representação virtual do ambiente construído que integra a tecnologia da informação para desenho e documentação (CRESPO; RUSCHEL, 2007). Por isso é um instrumento extremamente poderoso, que proporciona capacidades mais avançadas que programas convencionais de desenho assistido por computador e possui, atualmente, um papel cada vez mais significativo na indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (KENSEK; KUMAR, 2008).

Essa tecnologia proporciona melhorias pelo aumento na dinâmica, flexibilidade e racionalização do processo produtivo, pois o projeto é criado a partir de um modelo digital 3D de base, composto por um banco de dados único e consistente com informações multidisciplinares sobre as características físicas e funcionais dos componentes da edificação, em todo o seu ciclo de vida, permitindo a parametrização dos objetos. Desenhos derivados em 2D e tabelas de quantitativos e especificações são obtidos como produto do trabalho, dos quais cortes, fachadas e detalhes podem ser facilmente extraídos, nos quais qualquer alteração é aplicada automaticamente a todos os elementos afetados (CRESPO; RUSCHEL, 2007; EASTMAN et al., 2014; HIPPERT; ARAÚJO, 2010; JEONG et al., 2014; JUSTI, 2010; KASSEM; AMORIM, 2015; KUMAR, 2008; O'DONNELL et al., 2013).

Por comparação (Quadro 1), programas CAD produzem modelos de construção baseados em entidades e permanecem como ferramentas de traçado do desenho, que não fornecem informações semânticas ricas sobre a edificação, enquanto que ferramentas BIM são derivadas do método de modelagem baseado no objeto, no qual os objetos digitais são paramétricos e codificados para descrever e representar relações, hierarquias, propriedades e comportamentos dos componentes do real ciclo de vida da construção. Assim, o BIM corresponde a um novo caminho para a representação virtual de edificações, sendo geralmente considerado mais poderoso e sofisticado; nesse sentido, é considerado mais inteligente (CRESPO; RUSCHEL, 2007; KUMAR, 2008; MARTINS, 2011; O'DONNELL et al., 2013).

Quadro 1 – Comparação CAD x BIM

	ABORDAGENS	
Plataforma	CAD convencional	BIM
Termos correlatos	Maquete eletrônica	Modelo da edificação
Característica geral 1	Não orientada a objetos e sem objetos paramétricos	Orientada a objetos com os objetos paramétricos
Característica geral 2	Desenhos técnicos desvinculados à maquete eletrônica	Desenhos técnicos vinculados ao modelo da edificação
Exemplo de <i>software</i>	AutoCAD e 3ds Max	Revit e ArchiCAD
Característica do <i>software</i>	Não utiliza o BIM	Utiliza o BIM
Os objetos são	Linhas e volumes	Paredes, portas e janelas
Visualização em 3D de um cubo como exemplo	A mesma nas duas abordagens	
O <i>software</i> entende uma parede como sendo	Um sólido ou volume em 3D	A representação de uma parede como na edificação pronta
Informações que acompanham o arquivo	Posição no espaço; componentes; linhas ou volumes; aparência; textura etc.	Geometria 3D; posição no espaço; parâmetros de controle; custos e cronogramas; especificações; fabricantes; ordens de compra; listas de pessoal; manuais de operação; registros de manutenção e de inspeções; executor etc.



Fonte: Adaptação de Hippert e Araújo (2010, p. 3).

A tecnologia BIM inclui dados suficientes não somente para a modelagem virtual do projeto da edificação, como também para sua construção, fabricação e controle (MARTINS, 2011). Menezes (2011) complementa o conceito de BIM com a noção de projeto 4D, 5D e 6D, quando são incorporados respectivamente os parâmetros de tempo, orçamento e manutenção, e ainda reforça que

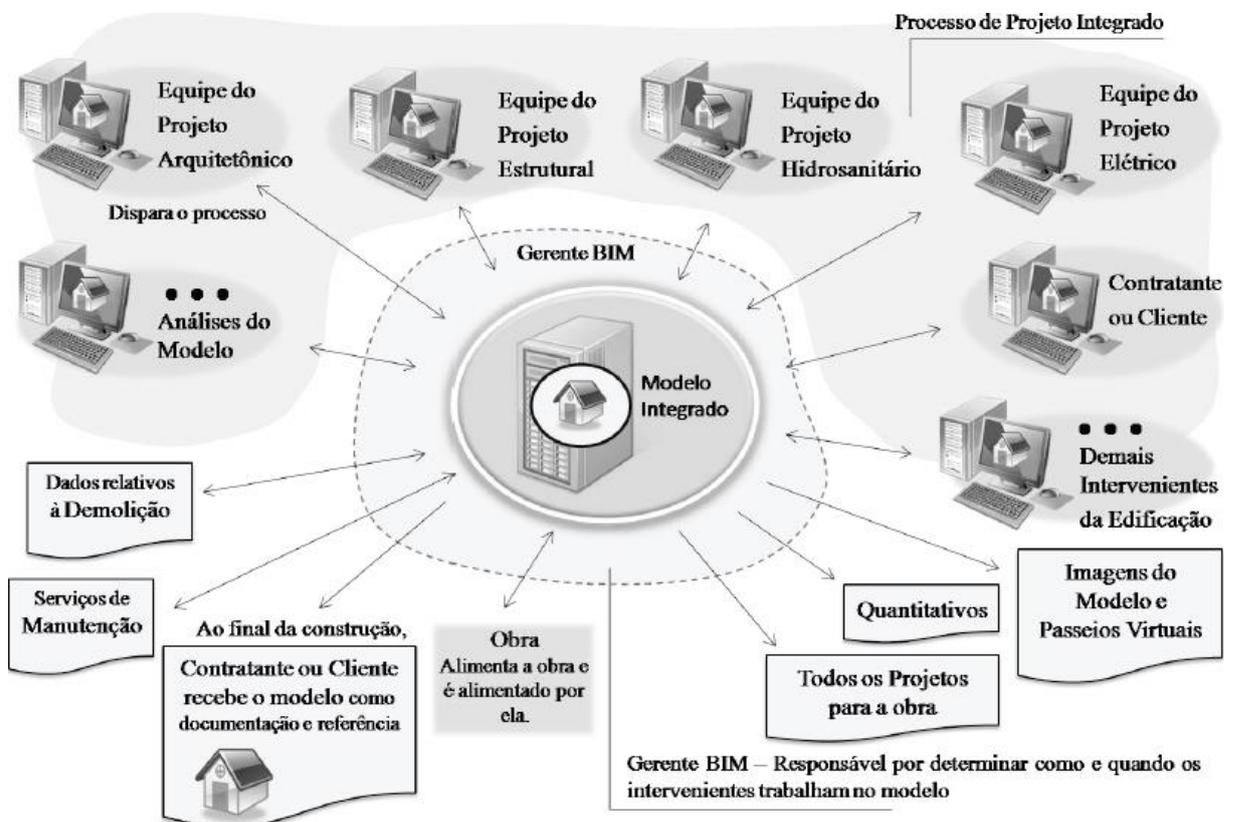
Diferentemente de um simples modelador 3D, a plataforma BIM é uma filosofia de trabalho que integra arquitetos, engenheiros e construtores (AEC) na elaboração de um modelo virtual preciso, o qual gera uma base de dados que contém tanto informações topológicas como os subsídios necessários para orçamento, **cálculo energético** e previsão das fases da construção, entre outras atividades. (MENEZES, 2011, p. 154, grifo nosso).

Essa nova abordagem de projeto digital possibilita benefícios para a construção civil e a sociedade, pois permite analisar importantes variáveis para a idealização de projetos mais eficientes, com menos consumo de energia e recursos (KENSEK;

KUMAR, 2008), e possui uma série de vantagens competitivas no mercado, como maior produtividade utilizando um único modelo digital compartilhado, minoração de erros nos desenhos, redução do retrabalho, economia de tempo, maior velocidade na entrega, mais foco no projeto, trabalho com maior qualidade, diminuição de custos e novas oportunidades de negócios (JUSTI, 2010; KASSEM; AMORIM, 2015).

Tais benefícios também são possibilitados pela integração facilitada entre todos os responsáveis pelo projeto arquitetônico e os colaboradores dos respectivos projetos complementares (Figura 1). Portanto, indica que há comunicação e colaboração eficaz entre os diferentes agentes participantes no desenvolvimento do projeto e demais intervenientes em todas as fases do ciclo de vida da edificação, compatibilização entre as informações dos projetos das diferentes áreas específicas, interoperabilidade entre outros programas de sistemas CAD-BIM e simulação propriamente dita da realidade (ANDRADE; RUSCHEL, 2009; CRESPO; RUSCHEL, 2007; KASSEM; AMORIM, 2015; O'DONNELL et al., 2013).

Figura 1 – Funcionamento da plataforma BIM



Destaca-se aqui a vantagem da possibilidade do recurso de interoperabilidade que integra programas do sistema BIM com de outras áreas, como os simuladores computacionais, ampliando seus benefícios (MARTINS, 2011). Contudo, atualmente o BIM ainda é raramente utilizado na área da construção sustentável, por isso é necessário o desenvolvimento das tecnologias de interoperabilidade para sua consolidação. Apesar disso, cada vez mais pesquisas estão sendo realizadas nesta área, como por exemplo, o desenvolvimento da transferência da geometria de uma ferramenta BIM para programas de simulação, que é uma área ativa de investigação (ANDRADE; RUSCHEL, 2009; NASYROV et al., 2014).

A maioria das tarefas executadas em programas BIM são limitadas às disponibilizadas internamente nos próprios aplicativos utilizados e que podem ser realizadas por uma única ferramenta BIM. Com isso é pouco comum o uso da interoperabilidade, não sendo critério significativo a capacidade para realização de tarefas colaborativas e de exportação e importação de arquivos em formatos universais (ANDRADE; RUSCHEL, 2009).

De acordo com os princípios do BIM, o modelo virtual da edificação produzido deve ser um modelo de referência, no qual é possível acessá-lo para fazer uso específico das informações necessárias em todas as disciplinas relacionadas à edificação, como para a realização de simulações computacionais, pois contém os dados de entrada necessários para este fim. Deste modo a informação pode chegar ao local onde se encontra a sua finalidade em sua jornada dentro do ciclo de vida do produto da construção (CRESPO; RUSCHEL, 2007; KUMAR, 2008; MARTINS, 2011).

Ainda que os processos integrados da metodologia BIM não sejam empregados em padrões de sustentabilidade, seu uso traz benefícios adicionais na avaliação da qualidade da edificação, criando uma oportunidade significativa para a sociedade alcançar processos de construção mais sustentáveis, com desempenho superior e com menos recursos e riscos (EASTMAN et al., 2014). Neste âmbito, um outro conceito de modelagem apresentado a seguir se torna relevante para a pesquisa.

2.2 MODELAGEM ENERGÉTICA DA CONSTRUÇÃO (*BUILDING ENERGY MODELING – BEM*)

Normalmente, os modelos digitais tridimensionais de edificações são gerados para outras finalidades distintas da simulação de desempenho, como por exemplo

para a representação visual da construção. Entretanto, tais modelos não possuem a qualidade necessária para a aplicação no contexto de simulação energética, tornando um grande desafio ajustar a geometria modelada e outros dados da edificação para serem utilizados em programas de simulação (NASYROV et al., 2014).

O processo de modelagem energética da construção (*Building Energy Modeling* – BEM) auxilia na concepção de edificações mais eficientes, tanto na fase de projeto quanto de operação durante seu ciclo de vida. Como uma ferramenta de projeto, o BEM pode ser utilizado para prever o uso e comportamento da edificação, estimar e comparar o desempenho de várias alternativas de projeto e identificar alterações potenciais para reduzir o consumo de energia (REEVES; OLBINA; ISSA, 2012).

Quando utilizado em conjunto com ferramentas BIM, sua interoperabilidade e integração no processo permite que as implicações ambientais das decisões de projeto tomadas no modelo BIM sejam testadas de uma forma relativamente rápida, desde que a geometria da construção não precise ser recriada na ferramenta BEM (REEVES; OLBINA; ISSA, 2012).

Os seguintes componentes são necessários para a construção de um modelo energético: geometria, propriedades dos materiais, sistemas da edificação, condições do local e informações de operação da construção. A geometria é a base do modelo, onde todas as outras propriedades são atribuídas, da qual os resultados da importação em ferramentas de análise de desempenho ainda requerem um pós-processamento através de *plug-ins* ou programas adicionais. As condições do local, tais como coordenadas e orientação da edificação, normalmente são transferidas juntamente com a geometria; enquanto que os sistemas e informações de operação da edificação não são extraídos diretamente do modelo de construção, mas são dados específicos de simulação que na prática atual consistem em conjuntos de parâmetros pré-assumidos para determinados tipos de utilização da edificação, atribuídos no modelo ou inseridos manualmente e editados diretamente na ferramenta de análise (NASYROV et al., 2014).

De um modo geral, os modelos BEM requerem uma representação mais simplificada da geometria que define as paredes e lajes como planos, onde toda transferência de calor entre elementos é ortogonal aos limites da zona, tendo como foco obter informações mais detalhadas sobre o desempenho térmico dos elementos construtivos. Em consequência dessas limitações, as definições geométricas do BEM são incapazes de modelar superfícies curvas (O'DONNELL et al., 2013).

Os limites espaciais da geometria são de grande importância para a simulação de desempenho. Não podem ser determinados se os componentes e os espaços não forem definidos corretamente e não são calculados ou são calculados incorretamente onde os elementos possuem geometrias complexas (forma livre ou mudança de espessura de parede). Isso pode resultar em falhas na transferência de geometria, das quais o cálculo incorreto ou inconsistente do volume e das superfícies externas da edificação é uma causa para falsos resultados de simulação. Assim, é essencial que os limites geográficos sejam corretamente definidos (NASYROV et al., 2014).

As dimensões das zonas térmicas de um modelo energético são diferentes dos compartimentos da edificação. Enquanto estes utilizam dimensões medidas internamente, nas zonas térmicas o ideal é adotar a face externa das paredes, havendo um pequeno aumento no volume de massa de ar interno, porém mantendo a área de superfície da sua envoltória com as dimensões reais, uma vez que a radiação solar interfere muito no desempenho da edificação.

Os materiais construtivos são especificados pelo arquiteto no modelo BIM como parte de sua rotina profissional. Quanto às suas propriedades na simulação térmica, existem aspectos que são importantes: a composição de materiais consiste de camadas correspondentes atribuídas aos respectivos elementos de construção da geometria (parede, telhado, laje etc.) e a camada de cada material deve possuir os parâmetros termofísicos necessários (espessura, condutividade, densidade etc.). Formatos BIM e de exportação incluem as entidades necessárias para a maioria das propriedades de materiais requeridas, no entanto, esses dados ainda são mal transportados entre os programas (SHADRINA, 2015).

Embora as informações de geometria sejam importantes para a simulação, estas são apenas uma parte do fluxo ideal de dados para integração entre BIM e BEM. As informações de operação da edificação dependem do seu tipo de uso e do comportamento dos usuários; portanto é difícil descrever com precisão suficiente durante a fase de projeto (NASYROV et al., 2014).

Os modelos de energia tentam reproduzir o comportamento dos ocupantes implementando rotinas (*schedules*) para a ocupação, o uso de iluminação e equipamentos, fatores importantes que influenciam diretamente nas trocas de calor das edificações. Entretanto estes cronogramas também são uma fonte comum de erros no momento de estimar o tempo e horários de uso pois o comportamento dos

ocupantes é altamente variável e quase impossível ser modelado com precisão (PEREIRA, 2009; REEVES; OLBINA; ISSA, 2012).

Como as edificações podem ser objetos experimentais grandes e relativamente complexos, os detalhes exatos de projeto, propriedades dos materiais e etapas de construção podem não ser perfeitamente conhecidos. Portanto, há algumas incertezas sobre as informações do modelo de simulação para que representem com precisão a edificação em estudo. Tais definições incompletas do modelo de simulação e o uso de dados adquiridos e transformados inadequadamente são duas das causas mais comuns para que os resultados sejam questionáveis e possam levar a decisões equivocadas (JUDKOFF; NEYMARK, 2006; O'DONNELL et al., 2013).

Especificamente na questão térmica, os elementos necessários citados acima para um modelo BEM interferem diretamente na forma como a edificação reage, como será demonstrado na próxima seção da dissertação.

2.3 ASPECTOS TÉRMICOS DE UMA EDIFICAÇÃO

As edificações são objetos físicos complexos que interagem com seu entorno imediato, sendo que todo ambiente construído possui comportamentos e desempenhos específicos diante das condições externas ao qual é submetido (SPANNENBERG, 2006). A forma como uma edificação se comporta também é afetada pelas escolhas feitas na seleção dos materiais e componentes construtivos ao projetar o envelope e os diferentes sistemas do edifício. Com isso, os arquitetos são forçados a expandir seu escopo de responsabilidade para além da função e estética de uma edificação (ATTIA, 2011; RALLAPALLI, 2010; SPANNENBERG, 2006).

Destaca-se o comportamento térmico como foco do presente trabalho, que representa uma resposta física da edificação quando submetida às variáveis climáticas externas (ventilação, insolação, temperatura, umidade etc.), comportamentos dos usuários (manipulação das esquadrias, acionamento dos sistemas artificiais de iluminação, condicionamento etc.), gerações internas (pessoas, iluminação, equipamentos etc.) e características de suas superfícies externas (cobertura, parede, piso, janelas etc.) (LAMBERTS et al., 2010b).

Nesta questão das superfícies da envoltória, há algumas grandezas térmicas que caracterizam a edificação, seus elementos, componentes e materiais que devem

ser conhecidas para a compreensão da análise de edificações e são descritas em algumas referências (ABNT, 2005a; LAMBERTS et al., 2010b; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014), como: condutividade térmica (λ), resistência térmica de elementos e componentes (R), transmitância térmica (U), capacidade térmica (C_T), calor específico (c), densidade de massa aparente (ρ), absorvância (α), entre outros.

Com o conhecimento de todas essas variáveis envolvidas na edificação (climáticas, humanas e arquitetônicas) pode-se calcular as cargas térmicas, isto é, a quantidade de calor necessária que deve ser extraída (resfriamento) ou fornecida (aquecimento) ao ar do ambiente interior para mantê-lo em condições mínimas de conforto e adequadas de temperatura e umidade. É ideal para avaliar as melhores estratégias adotadas na concepção arquitetônica ou as alterações necessárias em edificações já existentes (LAMBERTS et al., 2010b).

Em sentido amplo, a definição de desempenho pode ser resumida como a maneira como uma edificação se comporta quando sujeita a determinadas ações durante o seu uso, devendo apresentar certas propriedades que a tornem capaz de cumprir suas funções. Com isso, sua avaliação consiste em prever o comportamento da edificação e seus elementos construtivos em condições normais de exposição, verificar se tal comportamento satisfaz as exigências dos usuários e analisar sua adequação ao uso, independentemente da solução técnica adotada (ABNT, 2013; SPANNENBERG, 2006).

Há uma diferença entre comportamento e desempenho, apontada por Lamberts et al. (2010b), que precisa ser notada. O comportamento térmico são as trocas térmicas entre o ambiente interno e externo ocorridas nos elementos de vedação, sendo expresso pela variação de temperatura e umidade no interior da edificação. Quando tais fatores comportamentais da edificação em uso são comparados com parâmetros de referência para a avaliação do atendimento às exigências dos usuários, é obtido o desempenho térmico.

A avaliação de desempenho consiste em julgar a resposta física da edificação à influência do ambiente externo e do seu uso pelos ocupantes, pela verificação do atendimento dos ambientes internos a um conjunto de requisitos quantitativos e qualitativos pré-estabelecidos em função das exigências de habitabilidade dos usuários e afins para garantir a satisfação de suas necessidades quanto ao conforto térmico (LAMBERTS et al., 2010b; SPANNENBERG, 2006).

Como exemplo, cita-se a comparação dos resultados da análise comportamental com normas de desempenho, que possuem fundamento legal e estabelecem requisitos e critérios mínimos para uma edificação com base em variáveis arquitetônicas ou em exigências dos usuários, os quais devem ser atendidos pelos profissionais da construção civil para a elaboração de projetos (ABNT, 2005a, 2013). Dentre elas são destacadas as normas NBR 15220 e NBR 15575 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

O conjunto de normas NBR 15220 (ABNT, 2005a) trata especificamente sobre o desempenho térmico de edificações e estabelece diretrizes construtivas que atendem as exigências considerando as relativas zonas bioclimáticas. Já a NBR 15575 (ABNT, 2013), em todas as suas partes, é mais abrangente quanto ao desempenho de edificações habitacionais em seus variados aspectos; na questão térmica, determina que as condições térmicas no interior do edifício devem ser melhores do que o ambiente externo nos dias típicos de verão e inverno.

Particularmente como resultado de um desempenho satisfatório, segundo ANSI/ASHRAE (2004 apud LAMBERTS et al., 2010a, p. 41), o conforto térmico é “um estado de espírito do usuário, que expressa sua satisfação com o ambiente térmico onde está inserido”. Isto é, demonstra o grau de bem-estar e equilíbrio do indivíduo oferecido pelas condições térmicas do espaço construído, dependendo de aspectos físicos e subjetivos (ABNT, 2005a; SPANNENBERG, 2006).

Os autores Lamberts, Dutra e Pereira (2014) complementam que o bom desempenho durante a vida útil da edificação reflete também na sua eficiência energética, entendida como a obtenção de um serviço com menor consumo de energia quando comparada com outras construções com as mesmas condições ambientais.

Diante desse fato, faz-se necessário deixar marcado aqui as seguintes palavras:

Torna-se responsabilidade dos arquitetos a adoção de sistemas passivos e estratégias benignas, que proporcionem maior conforto ambiental com maior economia. Estes sistemas, aliados à correta eleição dos materiais, ao respeito à tradição construtiva revista sob a ótica das novas tecnologias, e à cultura regional, impulsionam ao aumento da qualidade de vida da população, e refletem a verdadeira vanguarda na arquitetura. É uma questão de ética considerar o que a natureza oferece de forma gratuita. Ao invés de usar mais energia contra a energia que é oferecida, basta aproveitá-la. (CORREA, 2001).

Em vista dos consequentes benefícios acarretados é relevante estudar o comportamento da edificação e analisar seu desempenho, inclusive por meio da simulação computacional.

2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL TÉRMICA DE EDIFICAÇÕES

A avaliação de desempenho térmico deve ser baseada em métodos consistentes capazes de produzir uma interpretação objetiva sobre o comportamento esperado do sistema nas condições de uso definidas, exigindo experiência do profissional analista e o domínio de uma ampla base de conhecimentos científicos sobre cada aspecto envolvido na edificação (ABNT, 2013).

Essa avaliação pode ser feita tanto inicialmente na fase de projeto, através de simulação computacional ou verificação do cumprimento de diretrizes construtivas, quanto após a sua construção, por meio de medições *in loco* das variáveis representativas de desempenho (ABNT, 2005b).

Nesta pesquisa destaca-se a simulação computacional, definida como o ensaio realizado com o auxílio de um modelo digital (FLÓRIO, 2005 apud CRESPO; RUSCHEL, 2007). Com os avanços tecnológicos, várias ferramentas computacionais de simulação têm sido desenvolvidas para o profissional conhecer o comportamento de cada elemento construtivo e prever o desempenho de sua proposta arquitetônica, facilitando a análise, diagnóstico e avaliação de edificações para a concepção e operação de projetos mais eficientes quando aliados à aplicação de recursos bioclimáticos (LAMBERTS et al., 2010a; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; PEREIRA, 2009).

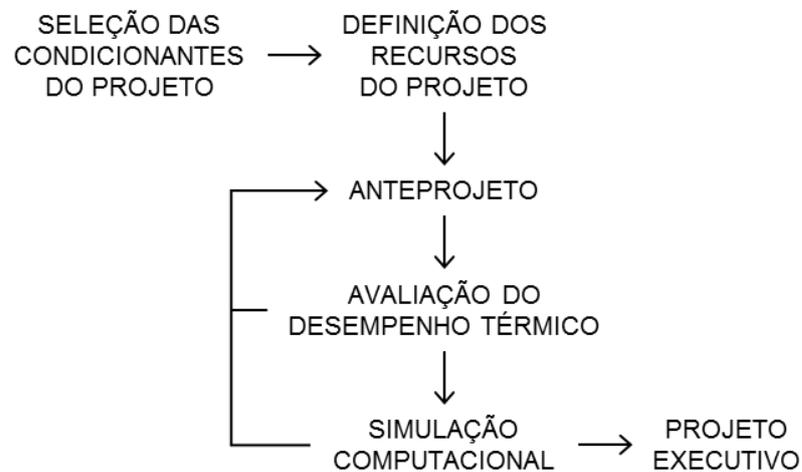
A simulação de desempenho de edificações (*Building Performance Simulation* – BPS) pode ser empregada em diferentes níveis de detalhe em todas as fases do processo de planejamento para edifícios novos, projetos de *retrofit* ou reformas para justificar quantitativamente decisões de projeto e operações de construção. Sua capacidade de comparar um modelo com diferentes opções em forma de custo-efetividade é uma de suas grandes vantagens (NASYROV et al., 2014; O'DONNELL et al., 2013; PEREIRA, 2009; RALLAPALLI, 2010).

A conexão entre projeto arquitetônico e análise energética também torna possível validar o consumo de energia e o conforto dos ocupantes em uma edificação

nas diferentes etapas do processo de concepção, principalmente nas fases iniciais do projeto quando as decisões mais importantes são feitas (NASYROV et al., 2014).

Seguindo o raciocínio, Lamberts, Dutra e Pereira (2014) deixam um alerta de que o profissional da área deve saber avaliar a importância da simulação na otimização do seu projeto, orientando as decisões arquitetônicas ou comprovando sua eficiência e custo x benefício. Os autores sugerem uma sequência de procedimentos relacionados à simulação para o projeto de arquitetura, apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Maneira lógica de projetar integrando a simulação



Fonte: Adaptação de Lamberts, Dutra e Pereira (2014, p. 291).

Entretanto, as ferramentas de simulação são utilizadas geralmente no final do processo de desenvolvimento do projeto para analisar as decisões tomadas, pois normalmente é um processo dispendioso e de trabalho intensivo para recriar o modelo de construção a ser utilizado para a análise (KUMAR, 2008). Como o processo de concepção arquitetônica não é intuitivo, o uso de ferramentas de simulação de desempenho de edificações tem sido indispensável quando integrado durante as fases iniciais do projeto, nas quais 20% das decisões tomadas influenciam posteriormente 80% de todas as decisões de projeto (ATTIA, 2011).

A Parte 1 da NBR 15575 (ABNT, 2013) orienta a utilização do programa computacional EnergyPlus para a análise do desempenho térmico de edificações. Quando não for utilizado, o programa a ser empregado deve ser validado por uma norma do Instituto Americano de Normas (*American National Standards Institute* –

ANSI) em parceria com a Associação Americana de Aquecimento, Refrigeração e Ar-condicionado (*American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers – ASHRAE*), a norma ASHRAE Standard 140.

A ANSI/ASHRAE Standard 140-2011: *Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs* (ASHRAE, 2012) é a primeira norma que trata do método padrão de testes para a avaliação de programas computacionais de análise energética de edificações, como um fluxograma rigoroso de validação, testes e diagnósticos de modelos de simulação computacional.

A norma adota a metodologia desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis (*National Renewable Energy Laboratory – NREL*) do Departamento de Energia dos Estados Unidos (*Department of Energy – DOE*). Este método consiste em avaliar a precisão de programas de simulação energética, além de identificar e diagnosticar as variações nos resultados que podem ser causadas por diferenças algorítmicas, limitações de modelagem, erros de codificação ou nos dados de entrada (JUDKOFF; NEYMARK, 2006).

Judkoff e Neymark (2006) esclarecem que a metodologia de validação da ASHRAE Standard 140 está estruturada em uma matriz com três tipos de testes: os testes comparativos, a verificação analítica e a validação empírica, sendo que cada um é subdividido para a envoltória e os equipamentos mecânicos da edificação. Essas verificações são denominadas de Testes de Simulação Energética de Edificações (*Building Energy Simulation Tests – BESTEST*).

A validação de programas de simulação consiste de uma combinação dessas três técnicas, podendo também haver testes de sensibilidade que comparam pequenas alterações de entrada com uma linha de referência (RALLAPALLI, 2010). Reeves, Olbina e Issa (2012) complementam que os métodos podem ser para condições idealizadas, descritas pelos padrões da indústria, ou realistas, com dados medidos em edificações reais.

Neste trabalho destaca-se o teste comparativo, no qual um programa computacional é comparado com si próprio ou com outros programas de mesma finalidade, como é o caso do Autodesk Revit com o EnergyPlus na presente pesquisa. Essa técnica comparativa é um teste relativo do modelo e do processo de solução, cujas vantagens são: a inexistência de incerteza nos dados de entrada, possibilidade de ser realizada em qualquer nível de complexidade, permitir muitas comparações de diagnósticos, rapidez e baixo custo. Todavia, apresenta a desvantagem de que não

há padrão de verdade absoluta, apenas intervalos de aceitação com base estatística são possíveis (JUDKOFF; NEYMARK, 2006).

Os autores (JUDKOFF; NEYMARK, 2006) definem que o termo modelo significa a representação da realidade para um comportamento físico dado; o termo processo de solução engloba os cálculos matemáticos e a codificação computacional para resolver um determinado modelo; e o termo padrão de verdade absoluta representa o padrão de precisão para prever o comportamento real no qual compara os resultados da simulação com um experimento empírico perfeitamente executado com todos os dados de entrada bem definidos, ou seja, estabelece a validação empírica para avaliar a capacidade de um programa para analisar o comportamento físico de uma edificação.

Judkoff e Neymark (2006) ainda sugerem que a utilização da técnica comparativa seja entre vários programas, com diferentes soluções de modelagem térmica e abordagens em uma variedade de casos representativos. Assim, os desvios nas previsões indicam as áreas para uma investigação mais aprofundada. As ferramentas podem ser testadas por comparação com qualquer programa que tenha concluído com sucesso os três testes e seja considerado validado para os casos de teste em que a exigência aceitável foi alcançada, como é o caso do EnergyPlus.

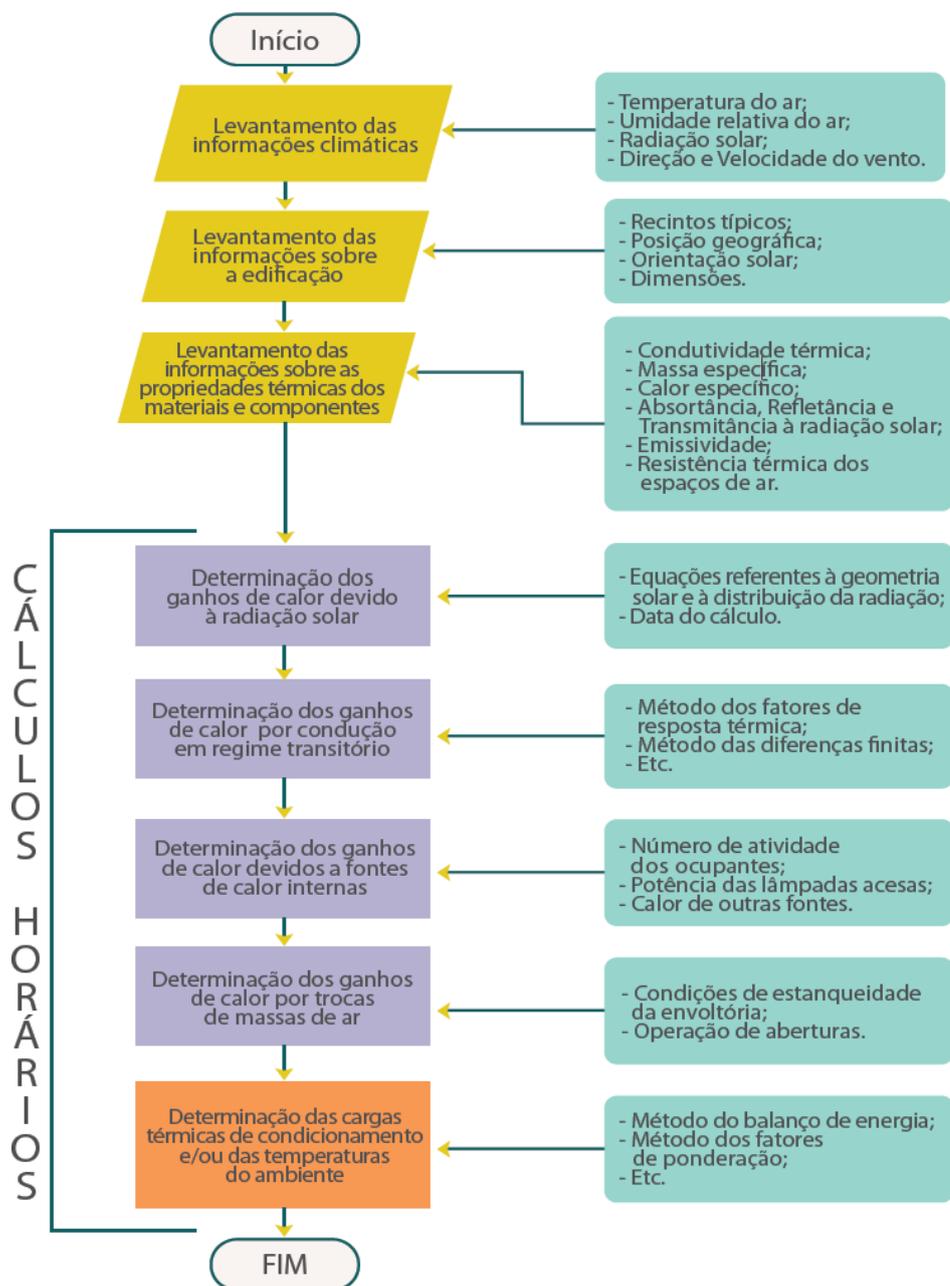
De acordo com os mesmos autores (JUDKOFF; NEYMARK, 2006), outra questão a ser considerada é o grau de controle sobre as possíveis fontes de erros na simulação (externas e internas), a partir do qual a metodologia do NREL dividiu os testes comparativos em diferentes níveis. Quanto mais realista for o caso de teste, maior será a dificuldade em estabelecer as causas e diagnosticar os problemas; caso contrário, mais fácil será localizar as fontes de erro ou imprecisão.

O nível mais simples, utilizado na presente investigação, compara as simulações sem tentar eliminar as fontes de erro, pois é a forma mais similar como uma ferramenta de simulação é utilizada na prática; contudo, torna-se difícil interpretar os resultados e obter uma conclusão sobre a precisão do modelo, pois todas as fontes possíveis de erro ocorrem simultaneamente. No nível mais detalhado, todas as fontes conhecidas de erro são controladas para identificar e quantificar fontes desconhecidas e revelar relações de causa associadas (JUDKOFF; NEYMARK, 2006).

Sob outro ponto de vista, o guia orientativo da Câmara Brasileira da Indústria da Construção para atendimento à NBR 15575 (CBIC, 2013) indica que o programa deve permitir a determinação do comportamento térmico de edificações sob condições

dinâmicas de exposição ao clima, ser capaz de reproduzir os efeitos de inércia térmica e reunir as características básicas da Figura 3; o relatório de avaliação do desempenho térmico deve apresentar os resultados de temperatura dos ambientes analisados. A previsão exata das temperaturas é crucial para o sistema de eficiência energética e para o conforto e saúde dos ocupantes (RALLAPALLI, 2010).

Figura 3 – Características necessárias para programa computacionais de avaliação do desempenho térmico



Quanto aos cuidados que se deve ter ao manipular os programas de análise, Batista, Lamberts e Westphal (2005, p. 154) exigem “um conhecimento aprofundado a respeito das diversas variáveis envolvidas no balanço térmico de uma edificação [...] para assegurar a correta interpretação dos resultados das simulações”.

A simulação computacional requer uma grande quantidade de dados válidos para ser executada com precisão, sendo que atualmente os profissionais especializados reúnem e combinam as informações necessárias para (re)construir o modelo no respectivo programa de simulação. Este trabalho é demorado e muitas vezes exige mais tempo do que o disponível para o processo de projeto; além disso, se uma pequena parte dos dados é inválida ou inconsistente, os resultados da simulação se tornam inaceitáveis (NASYROV et al., 2014).

O guia da CBIC (2013) complementa que na simulação computacional deve-se incluir simultaneamente todos os elementos da edificação e fenômenos intervenientes ao comportamento térmico, considerando a edificação como um todo para a geometria do modelo e cada ambiente como uma zona térmica. O programa deve ser alimentado por dados reais fidedignos às características construtivas da edificação – dimensões em planta baixa e corte, aberturas e seus tipos, materiais das paredes e cobertura etc. –, condições climáticas para os dias típicos – temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar, nebulosidade, ventos etc. – e propriedades térmicas dos materiais e componentes construtivos – condutividade, resistência e transmitância térmica, calor específico, densidade, emissividade, absorvância, características dos vidros etc.

A temperatura do solo do entorno da edificação também é informação importante para a simulação de edificações térreas, pois “as trocas de calor entre piso e solo são determinantes no resultado final das trocas de calor do ambiente” (PEREIRA, 2009, p. 40).

Os cálculos matemáticos e a codificação computacional para resolver um determinado modelo pode ser perfeito, enquanto que o modelo pode permanecer inadequado para uma dada situação física. Com isso é necessário cuidado minucioso para descrever a edificação o mais claramente possível e assim minimizar as incertezas. Isso significa a determinação de tantas propriedades dos materiais e outros dados do modelo de simulação quanto possível, incluindo os parâmetros gerais de construção e medições meteorológicas detalhadas (JUDKOFF; NEYMARK, 2006).

Não importa qual programa computacional é utilizado, a calibração de modelos de simulação é necessária e crucial para testar sua precisão em alcançar resultados

satisfatórios e confiáveis, ou seja, em representar com fidelidade o comportamento mais próximo da realidade da edificação. O processo de calibração compara e verifica a semelhança entre os resultados da simulação com medições da edificação real e ajusta o modelo e os valores de suas variáveis até que seus resultados se aproximem dos dados medidos (LAMBERTS et al., 2010a; PEREIRA, 2009; RALLAPALLI, 2010).

Apesar dessas ferramentas não serem ainda amplamente utilizadas por profissionais da construção civil, diversos autores destacam a eficiência dessas análises de desempenho para o controle ambiental de modo inteligente. Com o aumento da complexidade dos projetos arquitetônicos e a necessidade de integração entre todas as variáveis, haverá a tendência ao uso da simulação computacional pela sua importância e grande utilidade nas análises termoenergéticas de edificações (LAMBERTS et al., 2010a; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Outro aspecto relevante e particularmente de interesse para a presente investigação é a questão da interoperabilidade entre os diferentes programas de simulação, que será tratada na seção seguinte.

2.5 INTEROPERABILIDADE

Vários tipos de informação são trocados em diversos formatos entre os diferentes participantes durante todo o ciclo de vida do projeto, construção e uso de uma edificação, obrigando o desenvolvimento da interoperabilidade para a troca de dados entre sistemas, onde cada um possui formato e linguagem do qual interage (CRESCO; RUSCHEL, 2007; EASTMAN et al., 2014).

A interoperabilidade de programas computacionais é a capacidade de troca de informações entre dois ou mais sistemas ou elementos. O processo deve ser um intercâmbio contínuo de informações entre as ferramentas, eliminar a necessidade de geração de dados de entrada duplicados que já tenham sido gerados e permitir que os mesmos tenham atualizações bidirecionais tais que as mudanças em um programa sejam capazes de fluir entre os sistemas de forma automatizada e sem obstáculos (ANDRADE; RUSCHEL, 2009; KENSEK; KUMAR, 2008).

Programas interoperáveis oferecem a vantagem de agilizar a transferência de informações entre si. Se a troca de dados entre várias aplicações for perfeita, há uma redução no tempo, esforço e custos envolvidos no projeto, pois a duplicação de dados e a redundância na geração do modelo pode ser eliminada; levaria também a uma

melhor consciência nas decisões iniciais do processo de concepção e colaboração entre as equipes envolvidas (KUMAR, 2008).

Como uma edificação é um objeto complexo que demanda um projeto com maior número de profissionais especializados nos diversos sistemas integrados, então é necessária maior colaboração, mais programas de análises envolvidos e maior interoperabilidade entre esses sistemas. Uma melhor interoperabilidade proporciona simulações mais precisas e melhores resultados, pois todos os participantes do processo contribuem de forma direta e mais efetiva no projeto, desde que os programas dialoguem entre si de forma dinâmica e amigável (MARTINS, 2011).

A forma atual de trabalhar no campo da simulação envolve um arquiteto que projeta a edificação e um especialista em energia que tem que recriar manualmente o modelo térmico utilizando programas de análise e geralmente também preencher eventuais lacunas nos dados. Automatizar a troca de dados modifica essa abordagem, empregando um único modelo da edificação que leva à economia de tempo e redução de erros (NASYROV et al., 2014).

Com isso a reutilização de dados produzidos pelos profissionais durante o desenvolvimento de projetos de edificações possui valor para a criação de modelos energéticos a serem utilizados em simulações computacionais. Vários protótipos de pesquisa e produtos comerciais foram criados para aumentar a utilização desses dados nas simulações de edificações, tais como o Autodesk Green Building Studio. Porém continua difícil a geração de um modelo BEM confiável e de alta qualidade utilizando as ferramentas atuais (JEONG et al., 2014).

A troca de dados entre representações de edificações e simulações tem sido um grande desafio, pois trata-se de um processo de tradução trabalhoso e sujeito a erros, resultando na omissão das simulações de desempenho durante a concepção de edificações. Embora ferramentas têm sido desenvolvidas para apoiar a geração de um modelo de energia a partir de um modelo de projeto, ainda existem desconexões por não aproveitarem a programação orientada ao objeto (*Object-Oriented Programming* – OOP) e não permitirem facilmente o mapeamento de um modelo de construção orientado ao objeto (JEONG et al., 2014).

Andrade e Ruschel (2009, p. 80) indicam que “para que se tenha uma boa interoperabilidade é de fundamental importância a implementação de um padrão de protocolo internacional de trocas de dados nos aplicativos e nos processos do projeto”, como exemplo o IFC, que será tratado mais adiante nesta revisão de literatura.

A Aliança Internacional para Interoperabilidade (*International Alliance for Interoperability* – IAI), uma entidade americana de pesquisadores, realiza esforços para unir o desenho a informações textuais por meio de um modelo de distribuição de dados que descreve as especificações dos objetos da construção e os conceitos abstratos, dando suporte à estrutura de dados de sistemas de modelo orientado ao objeto. Com isto o modelo pode ser utilizado como referência para estudos de outras especialidades, por exemplo o comportamento térmico (CRESPO; RUSCHEL, 2007).

Kensek e Kumar (2008) apontam que quase 3% dos custos de projetos estão relacionados com a falta de compatibilidade entre os programas, que muitas vezes leva ao trabalho redundante e uma necessidade de gastar mais tempo e dinheiro em soluções padronizadas que elevam os custos do projeto. Idealmente, ferramentas de projeto e de simulações devem ser muito bem integradas de forma que uma mudança na concepção das edificações se refletiria e seria atualizada automaticamente no desempenho previsto. Esta interoperabilidade ajudaria na otimização do desempenho e na concepção de edificações mais eficientes (KUMAR, 2008).

Ainda que grande parte do processo tenha sido automatizada, a intervenção do usuário para simplificar os modelos, escolher as configurações e corrigir os erros ainda é necessária. Os atuais mecanismos de simulação possuem seus próprios formatos de dados de entrada, consistindo em arquivos de texto não orientados ao objeto com sintaxe e semântica altamente especializada. Com isso a ausência de uma interface padrão nas ferramentas exige esforços adicionais e a compreensão dos processos de simulação para que arquitetos obtenham resultados confiáveis de análise da edificação (JEONG et al., 2014).

Em outra publicação dos mesmos autores (JEONG et al., 2013), relata-se que a maioria das aplicações atuais de simulação térmica exige a produção da geometria da construção por ferramentas de desenho assistido por computador ou pelo intercâmbio de dados BIM com o processo de modelagem térmica, este último abordado a seguir. No entanto, a interoperabilidade entre estes sistemas computacionais continua sendo um problema.

2.5.1 Transformação de modelos BIM para BEM

O BIM foi divulgado como uma possível solução em fornecer aos arquitetos uma ferramenta descritiva da edificação para auxiliar em projetos sustentáveis, que

forneceria o elo perdido entre programas CAD e ferramentas de análise energética (KENSEK; KUMAR, 2008). A viabilização do projeto integrado com os participantes do processo depende que o BIM possua interoperabilidade com outros sistemas, porém esta comunicação nem sempre ocorre da maneira ideal, principalmente quando envolve programas de outras áreas como de simulação e análise, sendo geradas análises deficientes pelas restrições existentes na importação e exportação dos modelos digitais (EASTMAN et al., 2014; MARTINS, 2011).

Como o BIM está ganhando popularidade, surgiram projetos de pesquisa focados em melhorar a transferência de dados com diversos programas computacionais especializados. Tal progresso estabeleceu a base para um maior desenvolvimento e extensão do BIM para incluir ferramentas de desempenho e executar a modelagem de energia da edificação (BEM) (SHADRINA, 2015). A vantagem óbvia que o BIM e a interoperabilidade têm para oferecer é que os dados dos modelos podem ser exportados para programas de simulação e não precisam ser criados desde o início. Entretanto essa interoperabilidade ainda é uma área em desenvolvimento (KUMAR, 2008).

Dados para diferentes finalidades podem ser extraídos do modelo BIM, que fornece a capacidade de armazenar informações centralmente, evitando a repetição e redundância de dados. No entanto, pesquisas sobre a interoperabilidade de ferramentas BIM e de simulação ainda revelam que muitos problemas não foram resolvidos, demandando mais investimentos e estudos, e que ferramentas de simulação baseadas em modelos BIM são pouco utilizadas na indústria de AEC (MARTINS, 2011; NASYROV et al., 2014).

Shadrina (2015) identifica que diferentes problemas relacionados aos programas e baseados na comunicação dificultam o intercâmbio perfeito de informações entre BIM e BEM em todas as fases do projeto:

- a) a perda de dados na fase de concepção conceitual impede que os profissionais troquem informações e realizem várias simulações de desempenho para avaliar as alternativas de projeto;

Normalmente na prática atual, se a simulação é executada, isso acontece na última etapa do projeto a fim de obter o certificado de energia, significando que a fase inicial continua não sendo abordada para análise de desempenho das edificações. Este problema pode ser resolvido criando um aplicativo de análise de energia incorporado ao programa computacional de projeto, pois é melhor implementar uma

transferência sem falhas de informações se não há necessidade dos processos de exportação e importação e se o mesmo modelo é simplesmente visto em um *plug-in*. Porém, a precisão dos resultados produzidos por ferramentas incorporadas de simulação e seu uso como fonte confiável de informação é lento e questionável. Os resultados de simulação não são óbvios para os arquitetos, que necessitam assim da interpretação de especialistas em análise de desempenho para melhorar o projeto de edificação (SHADRINA, 2015).

- b) a inconsistência dos formatos de exportação e importação impede a perfeita transferência de dados durante a fase de projeto;
- c) responsabilidade obscura para os parâmetros BEM em programas BIM.

Em casos de aplicação do BIM, a criação do modelo principal é responsabilidade de um arquiteto que encaminha o modelo para outros especialistas através dos formatos de exportação. O especialista em análise de desempenho de edificações necessita de parâmetros, especialmente os de materiais, então o arquiteto precisa especificá-los para que possam ser exportados. Porém o arquiteto, autor e gerente do modelo BIM, não está interessado em tais dados pois é parte do processo BEM, enquanto que o especialista não trabalha na ferramenta BIM e sim em seus próprios aplicativos de análise. Se ninguém é responsável pelos parâmetros de simulação no modelo BIM, estes não serão especificados ou sua exportação para os formatos de arquivos adequados não será suportada.(SHADRINA, 2015).

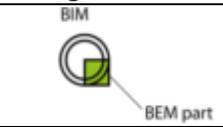
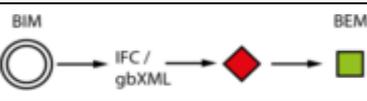
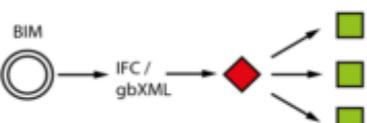
O desenvolvimento de ferramentas é impulsionado pela demanda do mercado, portanto, a fim de permanecerem competitivos, os produtores de *softwares* não gastam seus recursos na implementação de soluções BIM que não são absolutamente necessárias. Desta forma os modelos para a maioria das simulações são criados utilizando programas como o SketchUp e a geometria original do BIM apenas como uma referência. Outro fator influente a favor da criação manual do modelo BEM para importação é que o modelo de energia nunca é uma cópia exata do modelo arquitetônico (SHADRINA, 2015).

O cenário ideal é quando todos os especialistas trabalham em diferentes conjuntos de dados do modelo BIM, alterando suas partes que são atualizadas no modelo comum. No momento essa prática só é possível quando todos os especialistas trabalham em programas que são compatíveis uns com os outros (SHADRINA, 2015).

Após a identificação dos problemas acima, Shadrina (2015) ressalva que a implementação de simulação integrada só é possível com o estabelecimento da troca

perfeita de dados entre as ferramentas de projeto (incluindo BIM) e as de análise de desempenho. Várias iniciativas podem ser descritas (Quadro 2) no desenvolvimento atual de programas, que tem como alvo a melhoria da transferência de dados entre BIM e BEM.

Quadro 2 – Tipos existentes de conexão do BIM para BEM

Imagem simbólica	Descrição	Exemplos
	Aplicações de análise energética incorporadas ao <i>software</i> BIM	EcoDesigner para Graphisoft ArchiCAD, AX-3000 para Allplan
	<i>Plug-ins</i> específicos para conectar um programa BIM com uma ferramenta BEM	ArchiCAD > <i>plug-in</i> A-Null > Archiphysik, Revit > Revit2Radiance > Radiance
	<i>Plug-ins</i> para vincular ferramentas de <i>design</i> paramétrico e de simulação	Ladybug, Honeybee, Galapagos para Grasshoper (Rhino), Green Building Studio (GBS) para Autodesk Revit
	Programas para pós-processamento de dados do BIM para o BEM	IFC > Space Boundary Tool > EnergyPlus, gbXML > DesignBuilder > EnergyPlus
	Plataformas comuns para conectar várias ferramentas BEM utilizando o IFC ou gbXML como importação	DeST, Autodesk Ecotect

Fonte: (SHADRINA, 2015, p. 4, tradução nossa).

A interoperabilidade do BIM com programas de análise energética é uma área emergente e está ganhando cada vez mais atenção na indústria da construção. Para que os programas BIM sejam robustos e verdadeiramente informativos, é necessário estabelecer sua integração com programas de modelagem de energia da maneira mais completa possível (KENSEK; KUMAR, 2008).

De acordo com Martins (2011, p. 23), “o sucesso da interoperabilidade entre sistemas BIM e simuladores ambientais é inversamente proporcional à quantidade de retrabalho necessária para completar ou recompor o modelo e realizar a simulação”, podendo contribuir efetivamente para a eficiência energética e outros benefícios quando a interoperabilidade é realizada integralmente.

As estruturas diferentes de dados entre os sistemas BIM e os mecanismos de simulação normalmente impedem a tradução ou troca eficiente das informações; por

esta razão, a interoperabilidade representa um problema para os profissionais que utilizam a tecnologia BIM. A eficiência e eficácia dessa tradução pode ser alcançada quando os dois domínios possuírem o mesmo método de modelagem, tal como o método orientado ao objeto. Além disso, um modelo de troca de dados abrangente pode apoiar o mapeamento direto entre eles e facilitar a implementação de uma interface de usuário de fácil utilização (JEONG et al., 2014).

A interoperabilidade entre o BIM e a análise energética também pode ser feita pela transferência de dados BIM para modelos de energia e vice-versa via arquivos interoperáveis ou pela incorporação de funções de análise de energia dentro de programas BIM. Esta integração de funções de simulação em programas BIM elimina a necessidade de importar e exportar informações através de formatos de arquivo intercambiáveis, mas limita as opções de escolha do programa a ser utilizado para aqueles predeterminados pelos fabricantes de *softwares* (KENSEK; KUMAR, 2008).

Maile et al. (2007 apud NASYROV et al., 2014, p. 481, tradução nossa) indicam que há seis etapas no processo de troca de dados de um modelo BIM para um programa de simulação:

- a) determinação da localização da edificação para que o modelo possa ser ligado a informações climáticas específicas do local;
- b) definição da geometria, materiais e espaços da edificação;
- c) atribuição dos espaços para zonas térmicas;
- d) alocação de cargas dos espaços e de iluminação;
- e) definição dos sistemas técnicos e seus componentes;
- f) execução da simulação.

O processo de conversão da geometria do modelo geralmente envolve o pré e pós-processamento. O pré-processamento consiste na preparação dos dados brutos do programa BIM, por exemplo a exclusão de dados irrelevantes para elementos de simulação ou espaços, enquanto que o pós-processamento inclui o mapeamento de dados ou a alocação dos elementos entre o arquivo e o modelo interno da ferramenta de simulação. No entanto, podem ocorrer problemas durante esse processo, como a simplificação automática de paredes, que por vezes leva a inconsistências no modelo térmico (NASYROV et al., 2014).

Do conjunto total de dados contidos em um modelo BIM, devem ser extraídos os dados relevantes a serem transferidos para a simulação da edificação. Estes dados são conhecidos como uma camada de interação entre dois domínios e identificados

como: geometria, propriedades dos materiais, sistemas de construção, condições do local, informações de operação da edificação, entre outros (NASYROV et al., 2014).

2.6 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS NA PESQUISA PARA MODELAGEM, CONVERSÃO E SIMULAÇÃO

Para garantir a conformidade com os padrões exigidos, várias ferramentas de simulação de energia foram desenvolvidas ao longo das últimas décadas e têm sido tradicionalmente cada vez mais utilizadas para analisar o comportamento e desempenho das edificações e o conforto térmico dos seus ocupantes. Atualmente, é vasto o número de programas computacionais de simulação disponíveis, com interfaces de usuário e mecanismos de simulação diferentes, cujas informações obtidas são utilizadas para prever vários aspectos do comportamento dos edifícios em relação ao seu ambiente externo, analisar e avaliar projetos e edificações, auxiliar na tomada de decisões adequadas e melhorar os processos a fim de projetá-los com mais sustentabilidade, conforto e eficiência energética (KUMAR, 2008; NASYROV et al., 2014; RALLAPALLI, 2010).

Podem variar de ferramentas simples e amigáveis, que fornecem apenas uma rápida análise anual, para programas extensos e sofisticados, que utilizam modelos mais detalhados que precisam de conhecimentos especializados e executam simulações que fornecem análises detalhadas de hora a hora. A maioria destes programas incluem uma série de funções, como modelagem em 3D, simulações e análises térmicas, e possuem a capacidade de importar desenhos de CAD ou outros formatos (KUMAR, 2008; RALLAPALLI, 2010).

Os avanços tecnológicos em programas de computador forneceram ferramentas de simulação energética que são mais eficazes para modelar os processos térmicos, visuais, de ventilação e outros consumos de energia que ocorrem em uma edificação e prever seu desempenho energético e ambiental. Durante o seu processo de cálculo, leva em consideração os fatores climáticos externos, fontes internas de calor, materiais e sistemas para modelar com precisão a edificação (RALLAPALLI, 2010).

A Associação Internacional de Simulação de Desempenho de Edificações (*International Building Performance Simulation Association – IBPSA*) possui disponível na internet uma lista com mais de 400 programas de simulação computacional, que

abrangem desde *softwares* de pesquisa até produtos comerciais para análises de eficiência energética, desempenho e sustentabilidade em edificações, anteriormente hospedada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (IBPSA, 2016; RALLAPALLI, 2010).

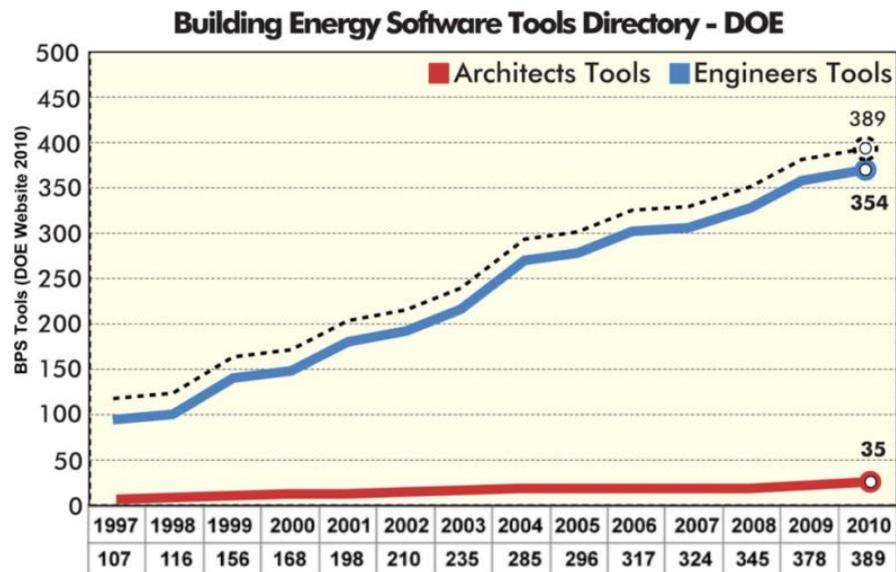
Levando em consideração a variedade significativa de tais programas computacionais, é importante considerar e analisar os limites de aplicabilidade das soluções existentes para diferentes casos de complexidade de simulações, bem como a confiabilidade e simplicidade de troca de dados e interfaces de fácil utilização, que são os principais aspectos do uso prático dessas ferramentas. Devido à grande quantidade de dados de entrada e a disponibilidade de complexos motores de renderização de geometria 3D, interfaces e troca de dados eficazes são cruciais para permitir um desempenho mais rápido e confiável das ferramentas de simulação (NASYROV et al., 2014; RALLAPALLI, 2010).

Apesar da proliferação dos programas computacionais para simulação, as barreiras ainda são grandes pois arquitetos e usuários não especialistas frequentemente encontram limitações para integrá-los no processo de projeto, principalmente durante a fase inicial decisiva que aborda mais a geometria e o envelope da edificação. Essas ferramentas são pouco utilizadas devido à complexidade e dificuldade de aprendizado, que exigem uma grande quantidade de dados de entrada nas simulações e conhecimentos multidisciplinares dos usuários. Os profissionais atuantes na construção civil necessitam de ferramentas que forneçam respostas muito específicas com o mais alto nível de precisão e detalhe de simulação (ATTIA, 2011; LAMBERTS et al., 2010a; PEREIRA, 2009; RALLAPALLI, 2010).

Ainda assim, a maioria dessas ferramentas de simulação são inadequadas e incompletas para serem utilizadas pelos arquitetos, pois são incapazes de apoiar e informá-los adequadamente durante as fases iniciais do projeto. Das 389 ferramentas listadas no *site* do DOE em 2010 (Figura 4), menos de 40 eram direcionadas a estes profissionais que concentram as decisões sobre o projeto arquitetônico (ATTIA, 2011).

Em outra publicação, Attia et al. (2009) relatam que a maioria das ferramentas de simulação de edificações são desenvolvidas por pesquisadores técnicos, cientistas da construção ou engenheiros de Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado (AVAC), preocupados principalmente com sua validação definida pelo BESTEST.

Figura 4 – Ferramentas de simulação de edificações desenvolvidas para arquitetos e engenheiros entre 1997 e 2010



Fonte: (ATTIA, 2011, p. 5).

Portanto, é compreensível os problemas dos arquitetos em interagir com tais ferramentas, pois são profissionais que possuem métodos diferentes e visualmente orientados para organizar as informações. Então o advento do BIM e sua possível ligação com ferramentas de simulação demonstram que há um objetivo comum e uma oportunidade de melhorar a relação entre arquitetos, engenheiros e até mesmo construtores para desenvolver projetos integrados (ATTIA et al., 2009).

Nesta seção do trabalho serão abordados os programas e ferramentas computacionais que foram empregados na execução da pesquisa da dissertação.

2.6.1 EnergyPlus

O EnergyPlus é a mais recente geração e um dos mais utilizados programas computacionais desenvolvidos pelo Departamento de Energia americano para simulação de carga térmica e análise energética de edificações e seus sistemas. Foi criado a partir das melhores características das ferramentas BLAST e DOE-2, este último é um dos mais populares utilizados pela comunidade de simulação energética de edificações. Além disso, adiciona novos recursos de modelagem por possibilitar

produzir novas e complexas edificações que não podem ser modeladas por outros programas desse tipo (DOE, 2015; LAMBERTS et al., 2010a; MELO; WESTPHAL; MATOS, 2009; PEREIRA, 2009; RALLAPALLI, 2010; WESTPHAL, 2006).

O EnergyPlus é um programa de fonte aberta para simulação termoenergética de toda a edificação. O programa permite ao usuário simular o desempenho do edifício com base em arquivos climáticos e nos dados do modelo de entrada da construção, enquanto que os parâmetros de saída podem ser calculados para diferentes períodos de tempo. Qualquer localização na Terra pode ser calculada desde que exista um arquivo climático; com isso a ferramenta é utilizada em todo o mundo (PEREIRA, 2009; SHADRINA, 2015).

Enquanto o programa incorpora o que foi eficaz do BLAST e DOE-2, contém uma série de características de simulação diferenciadas que podem proporcionar resultados mais precisos mas com execução mais lenta em comparação ao DOE-2, incluindo cálculos de hora em hora ou sub-horários e sistemas de climatização modulares configuráveis pelo usuário, cujo desempenho dinâmico é integrado com a simulação baseada no equilíbrio de energia da edificação, bem como estruturas de dados de entrada e saída que podem facilitar o desenvolvimento de módulos e interfaces de terceiros (RALLAPALLI, 2010).

Rallapalli (2010) também comenta que a simulação do EnergyPlus baseia-se principalmente na entrada de arquivos de texto, o que aumenta o esforço para definir todos os dados de entrada necessários em comparação aos mecanismos com interfaces gráficas de usuário (*Graphical User Interface – GUI*), sendo que os mais avançados destes são o DesignBuilder e o OpenStudio.

Destacam-se algumas outras capacidades do EnergyPlus: relatórios padrões e definíveis pelo usuário; equilíbrio de calor baseado em solução técnica para cargas térmicas, que permite o cálculo simultâneo de efeitos radiante e convectivo nas superfícies interna e externa durante cada período de tempo; modelagem melhorada de transferência de calor do solo através de técnicas de análise simplificadas; cálculo de índices de conforto térmico baseados na atividade dos usuários, temperatura interna de bulbo seco, umidade etc.; cálculos avançados de infiltração de ar e de aberturas que permitem a correta atribuição da energia solar absorvida pelos componentes de janela; e integração com outros sistemas, como fotovoltaico, aquecimento solar e outros (MELO; WESTPHAL; MATOS, 2009; PEREIRA, 2009; RALLAPALLI, 2010).

O EnergyPlus tem sido amplamente revisado e validado em vários conjuntos de testes, com uma confiabilidade atestada do seu algoritmo no que diz respeito ao comportamento térmico de edificações. Utilizando o protocolo de avaliação da ASHRAE/BESTEST, os resultados do programa em todas as edificações de teste se apresentaram dentro da faixa de aceitação definida pelo padrão da ANSI/ASHRAE Standard 140-2011 (ATTIA, 2011; PEREIRA, 2009; RALLAPALLI, 2010).

Para o melhor entendimento da presente pesquisa, após a execução das simulações, o EnergyPlus pode emitir três níveis de erro, apresentados no Quadro 3, que exigem ações distintas.

Quadro 3 – Erros emitidos após as simulações no EnergyPlus

Erro	Significado
<i>Warning</i>	Erro leve, que deve ser corrigido quando aplicável. Não compromete o andamento da simulação.
<i>Severe</i>	Deve ser corrigido obrigatoriamente.
<i>Fatal</i>	Simulação será abortada.

Fonte: (WESTPHAL, 2006, p. 9).

2.6.2 Autodesk Revit

No âmbito desta pesquisa foi estudado mais profundamente o programa computacional Autodesk Revit, que é uma plataforma que utiliza a tecnologia BIM. Trata-se de um programa para o desenvolvimento de projetos de edificações e a criação de modelos de construção (JUSTI, 2010; SHADRINA, 2015), que possui os módulos *Architecture*, *Structure* e *Mechanical, Electrical and Plumbing* (MEP), voltados para projetos arquitetônicos, estruturais e de instalações (mecânicas, elétricas e hidrossanitárias), respectivamente.

O Revit vem se destacando por sua utilização cada vez mais crescente, aliada à multidisciplinaridade, inovação e vantagens proporcionadas pelo BIM, firmando-se como nova ferramenta-base de trabalho para arquitetos e indispensável para acompanhar as necessidades do mercado. Assim justifica-se sua escolha, a partir da necessidade em averiguar se os profissionais de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) possam também aproveitá-lo como uma ferramenta com capacidade para uma análise térmica confiável e efetiva de edificações.

O sistema Revit possui famílias de objetos que representam componentes da edificação, os quais são livremente manipuláveis e representados automaticamente em 2D e 3D dependendo da necessidade. Cada elemento possui propriedades paramétricas e alguns possuem fórmulas embutidas que remetem a um comportamento real do objeto modelado, como a resistência térmica de superfície a superfície de um componente (R_t). Sendo assim, são inteligentes pois agem em resposta ao que o usuário definiu em seus parâmetros (CRESPO; RUSCHEL, 2007).

O programa também permite a utilização de massas conceituais e/ou elementos de construção para a criação de modelos analíticos de energia, os quais são utilizados para executar toda a simulação de energia da edificação com o serviço na nuvem da ferramenta Autodesk Green Building Studio; o servidor retorna os resultados da simulação que são exibidos no próprio Revit. O modelo analítico de energia também pode ser exportado para aplicativos de terceiros para análise adicional em diversos formatos de arquivos comuns (AUTODESK, 2016a).

Quanto ao comportamento térmico, a ferramenta de análise energética do Revit considera a entrada mínima de dados e variáveis necessários para programas de avaliação de desempenho e produz resultados que condizem com os esperados.

Ocorrem limitações na saída de dados, principalmente no que se refere às temperaturas internas dos ambientes, pois o programa não gera estes dados considerados pela norma NBR 15575-1 como critérios de exigências do desempenho térmico pelo método de simulação. Tais resultados, ainda que pouco detalhados, de certa forma são práticos para o profissional da construção civil, pois disponibilizam informações de rápida visualização e fácil interpretação do panorama total da edificação para o auxílio na tomada de decisões.

Apesar de ainda não serem conhecidas todas as suas potencialidades, é interessante a utilização de instrumentos complementares ao Revit para um diagnóstico satisfatório do ambiente construído, como aplicativos de terceiros mais direcionados para esse fim, como o EnergyPlus.

2.6.3 Autodesk Green Building Studio

O Autodesk Green Building Studio (GBS) é uma ferramenta de análise de energia com base na *web* que oferece suporte à integração com a tecnologia BIM, com isso pode ser utilizado com o programa Revit nos processos de simulação.

Também é possível obter arquivos com dados de entrada para o EnergyPlus a partir do GBS após a execução da simulação (DONG et al., 2007; JEONG et al., 2013).

O GBS é um programa de análise energética baseada em nuvem que suporta a geração de cenários com base em *scripts* para a otimização do desempenho de edificações. O programa é um sucessor direto do Autodesk Ecotect Analysis, cujas funções estão sendo distribuídas dentro do pacote de programas de arquitetura da empresa Autodesk (SHADRINA, 2015).

O Green Building Studio possui uma boa capacidade de troca de dados com o modelo BIM do Revit, porém é uma solução fechada específica da Autodesk com opções limitadas para a simulação energética de edificações (NASYROV et al., 2014). A ferramenta importa com êxito somente arquivos gbXML produzidos pelos produtos da Autodesk, como o Revit, mas ao contrário de outras ferramentas de simulação feitas para as plataformas BIM, também suporta a exportação para ferramentas externas de análise energética, como o EnergyPlus (SHADRINA, 2015).

2.6.4 OpenStudio

O programa computacional OpenStudio é uma coleção de ferramentas para a modelagem energética de edificações (BEM) que fornece uma interface gráfica de usuário (GUI) para o mecanismo de simulação do EnergyPlus. Embora seja baseado em uma ferramenta de simulação complexa, o programa traduz o EnergyPlus para a linguagem específica do arquiteto por uma interface visual orientada em diferentes níveis de detalhe (ATTIA, 2011; SHADRINA, 2015).

O programa possui o *plug-in* gratuito Legacy OpenStudio que utiliza a mecânica de análise de edificações do EnergyPlus e é baseado no Google SketchUp, uma ferramenta de modelagem intuitiva, de fácil utilização e popular entre arquitetos. Ou seja, o Legacy OpenStudio permite o uso do SketchUp para criar e editar rapidamente zonas e superfícies, atribuir materiais e exportá-los para o arquivo de dados de entrada do EnergyPlus, fazendo o usuário produzir com menos esforço o modelo digital da edificação em vez de introduzir dados geométricos numericamente (coordenadas de todos os vértices de cada elemento construtivo) em uma interface de usuário baseada em texto como acontece no EnergyPlus (ATTIA, 2011; RALLAPALLI, 2010; SHADRINA, 2015).

Um arquivo com dados de entrada do EnergyPlus (arquivo IDF) é criado utilizando as capacidades tridimensionais do programa de desenho 3D do Google e com isso pode ser realizada a simulação do modelo com o EnergyPlus, visualizando os resultados sem sair do SketchUp. Para isso o usuário deve executar o visualizador de resultados do próprio OpenStudio para receber os resultados da simulação, que são básicos e com vários formatos de saída (ATTIA, 2011; RALLAPALLI, 2010).

O *plug-in* também possui a capacidade de buscar superfícies e subsuperfícies pelo nome do objeto, inserir ganhos internos e ar externo para cálculos de carga, adicionar o sistema de climatização e definir e alterar padrões de construção (RALLAPALLI, 2010). Entretanto, segundo Attia (2011), o *plug-in* é limitado para a modelagem da geometria e alguns parâmetros básicos de entrada, como um banco de dados insuficiente para a definição dos elementos de construção, sem a possibilidade de atribuir materiais e características construtivas.

Uma característica do *plug-in* importante para a presente pesquisa é que sua modelagem possui um esquema automático de cores para identificar superfícies (pisos, paredes e coberturas), subsuperfícies (portas e janelas) e grupos de sombreamento. Pisos são cinzas, paredes são bege e coberturas são vermelhas, nos quais cores mais escuras identificam o exterior de uma superfície, enquanto que cores mais claras identificam o seu interior; portas são identificadas na cor marrom e janelas são de um azul translúcido; e elementos de sombreamento são representadas na cor roxa (VERSAGE; LAMBERTS, 2010).

Attia (2011) também aponta que a ferramenta possui integração com arquivos CAD e incorpora a geometria no arquivo IDF, permitindo o uso do modelo da edificação por profissionais mais experientes em simulação, porém não permite qualquer troca direta com ferramentas BIM ou gbXML.

2.6.5 Space Boundary Tool

Transformações de geometrias baseadas no formato de arquivo IFC têm sido desenvolvidas para o EnergyPlus, como por exemplo soluções de *software* como o Space Boundary Tool (SBT), que traduz a geometria contida no arquivo IFC e o transforma em um formato exigido para apoiar ferramentas arquitetônicas em aplicações de simulação energética. O SBT é uma interface de usuário para o EnergyPlus compatível com o IFC, utilizado como ferramenta de pré-processamento

de arquivos IFC que fornece dados de entrada para o mecanismo de simulação do EnergyPlus (NASYROV et al., 2014; O'DONNELL et al., 2013; SHADRINA, 2015).

Detalhadamente, o SBT é um programa computacional de transformação do BIM para o BEM que importa o arquivo IFC, calcula e adiciona limites de espaço para identificar diferentes tipos de superfícies de transferência de calor para a modelagem energética da edificação, reconhece os materiais e os mapeia com as composições e camadas (parâmetros Construções e Materiais, respectivamente no EnergyPlus) do arquivo IDF especificado pelo usuário. Então combina os limites de espaço, materiais mapeados e outras informações necessárias do IFC para o arquivo IDF do EnergyPlus (O'DONNELL et al., 2013; SHADRINA, 2015).

2.7 ARQUIVOS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

Com o desenvolvimento da tecnologia da informação, ocorreram progressos significativos na área de intercâmbio de dados na indústria da construção focados nas informações requeridas para a geometria e desempenho da edificação, como para as simulações termoenergéticas e de conforto, projetos AVAC e de iluminação, análise do ciclo de vida da construção e verificação do planejamento de obra (DONG et al., 2007).

Os modelos atuais são capazes de encapsular e facilitar a troca de todas as informações relacionadas a todo ciclo de vida de uma edificação em um esquema de dados abrangente, desde sua concepção – para avaliar o desempenho total da edificação –, construção – para avaliar custo e cronograma – até sua operação – ocupação e controles de sistemas (DONG et al., 2007).

Arquivos computacionais baseados em diferentes formatos de trocas são utilizados para a passagem de informações entre programas, sendo que alguns apresentam maior capacidade de interoperabilidade e outros limitam-se a trocas internas (ANDRADE; RUSCHEL, 2009). Os fluxos de trabalho para criar um modelo de simulação compatível em sistemas BIM são diferentes para cada ferramenta de simulação e formato de exportação. Várias das iniciativas de transformação do BIM para BEM são baseadas na troca de dados BIM para modelos de energia por meio de arquivos interoperáveis; esforços como as extensões de arquivos *Industry Foundation Classes* (IFC) e *Extensible Markup Language* (XML) são um passo nesta direção (KENSEK; KUMAR, 2008; SHADRINA, 2015).

Para implementar a troca de informações utilizando aplicativos de terceiros dentro da metodologia BIM é necessário um esquema de dados abertos; especificamente no contexto do Autodesk Revit, os esquemas IFC ou gbXML podem ser utilizados para a transmissão de dados. Estes formatos abertos expansíveis para modelos de dados da edificação têm a capacidade de armazenar informações sobre as coordenadas geográficas de localização do edifício e sua orientação solar, normalmente transmitidas juntamente com os dados de geometria dos componentes da construção. Entretanto pode levar mais 10 anos até que os usuários mudem sua rotina de projeto para implementar plenamente esses arquivos (NASYROV et al., 2014; SHADRINA, 2015).

2.7.1 Arquivos gbXML

A aplicação do formato de arquivo *Green Building Extensible Markup Language* (gbXML) é somente na área de simulação energética, sendo suportado por diversas ferramentas BIM e BEM. Possui a capacidade de transportar informações de detecção do ambiente construído para o fácil intercâmbio de dados entre programas BIM (por exemplo, o Revit da Autodesk, que suporta o gbXML 0,36, e o ArchiCAD da Graphisoft) e ferramentas de análise de energia (por exemplo, DOE-2 e e-QUEST), através do serviço de *web* do Green Building Studio (DONG et al., 2007; NASYROV et al., 2014; SHADRINA, 2015).

O esquema gbXML foi desenvolvido especialmente para facilitar a transferência de informações da edificação armazenadas em modelos de simulações, incluindo características de produto e dados de desempenho de equipamentos, o que permite atualmente a interoperabilidade integrada entre modelos de construção e uma grande variedade de ferramentas de análise. O esquema carrega uma descrição detalhada de um único ou um conjunto de edificações para simulação e análise de energia (KUMAR, 2008; NASYROV et al., 2014).

O esquema se utiliza do formato XML, que é uma linguagem padronizada para a descrição de informações que fornece um formato de arquivo robusto, irrestrito e verificável para o armazenamento, recuperação e transmissão de textos e dados através da *web*, por ser extensão do formato *HyperText Markup Language* (HTML) (ANDRADE; RUSCHEL, 2009; CRESPO; RUSCHEL, 2007; DONG et al., 2007).

O gbXML adota uma abordagem flexível, de código aberto e um esquema de dados relativamente direto por possuir menos camadas de complexidade, sendo bem-sucedido em oferecer serviço de simulação baseada na *web* para a indústria. Permite a criação de linguagem personalizada para a troca de informações dentro e entre os respectivos domínios de interesse. Possui um formato de linguagem global com sintaxe consistente e pode potencialmente representar qualquer modelo computacional de construção através da tradução com mecanismos adequados de mapeamento (DONG et al., 2007).

Sendo assim, a vantagem do gbXML é ser um formato fácil de ser compreendido e implementado por desenvolvedores de programas de simulação de desempenho de edificações, facilitando a importação de dados para ferramentas BEM, permitindo a criação de esquemas definidos pelo usuário e ajudando os arquitetos a se concentrarem em seu trabalho principal, sem terem que pensar sobre a troca de dados. A desvantagem é que compreende apenas uma parte das informações de um modelo BIM, necessitando a conversão para outros formatos (ANDRADE; RUSCHEL, 2009; NASYROV et al., 2014; SHADRINA, 2015).

Em termos de geometria, arquivos gbXML aceitam a forma retangular que é suficiente para a simulação de energia. Porém carregam informações adicionais do que simplesmente a própria geometria (área, volume, pontos cartesianos, coordenadas etc.) e incluem dados referentes à hierarquia de componentes, tais como edifício, zonas, espaços, superfícies, aberturas e tipo de construção (DONG et al., 2007; KUMAR, 2008).

2.7.2 Arquivos IFC

O formato de arquivo *Industry Foundation Classes* (IFC) designa uma coleção de classes desenvolvida pela Aliança Internacional para Interoperabilidade (IAI), atualmente mantida pela buildingSMART, para facilitar a interoperabilidade entre programas BIM, principalmente utilizado por especialistas em MEP e AVAC, sendo incentivado como um padrão de troca de dados abertos baseados no modelo da edificação. É reconhecido pela Organização Internacional de Normas (*International Standard Organization* – ISO) por meio da norma ISO 16739 (ANDRADE; RUSCHEL, 2009; KUMAR, 2008; O'DONNELL et al., 2013; SHADRINA, 2015).

Esse formato é um tipo de linguagem de comunicação que foca na modelagem do produto e processos da indústria da AEC, sendo o principal instrumento para estabelecer a interoperabilidade dos programas para este fim. Seu uso tem permitido a exploração dentro do BIM para que ferramentas sejam capazes de ler dados do projeto referentes à sustentabilidade, eficiência energética, térmica e outros (ANDRADE; RUSCHEL, 2009)

O IFC é um padrão internacional, aberto e acessível ao público que armazena informações da edificação em um banco de dados, permitindo que sejam compartilhadas e mantidas durante todo o ciclo de vida do projeto de construção. O modelo IFC consiste em entidades que descrevem componentes tangíveis da geometria (paredes, portas, vigas, móveis etc.) e conceitos mais abstratos do espaço como materiais, atividades etc. As informações transportadas pelo arquivo IFC são abrangentes, levando informações geométricas que são englobadas por parâmetros de tipo e instância definidos pelo usuário no modelo de construção (ANDRADE; RUSCHEL, 2009; KUMAR, 2008).

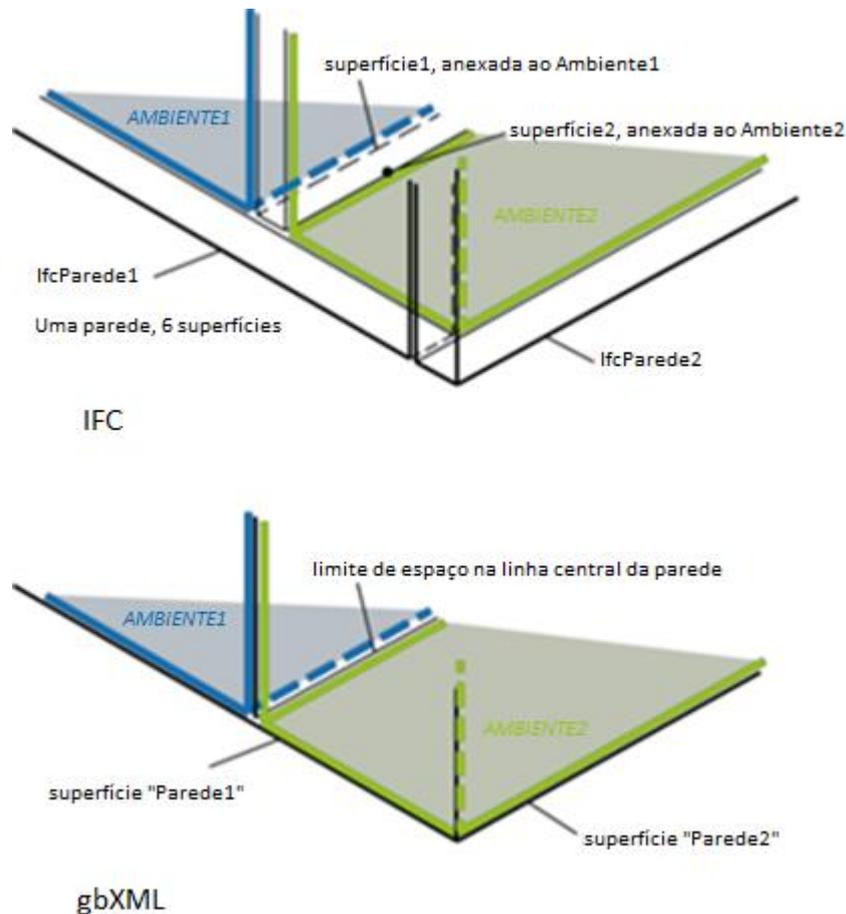
O esquema atualmente é o único modelo de dados existente que é de domínio público, não proprietário e bem desenvolvido para arquitetura. O principal benefício do formato é que abrange uma área mais ampla e avançada de aplicação que o gbXML, cobrindo todo o ciclo de vida da edificação. Mesmo assim seu uso atende a requisitos para certas funções específicas, não suportando muitas outras tarefas (ANDRADE; RUSCHEL, 2009; EASTMAN et al., 2014; NASYROV et al., 2014; O'DONNELL et al., 2013).

O IFC adota uma abordagem abrangente e genérica para representar um projeto inteiro de edificação, com isso tem a capacidade de representar qualquer forma geométrica da construção. Utiliza também uma abordagem relacional que pode rastrear todas as mudanças semânticas quando alterado o valor de um elemento no esquema, com isso mantém automaticamente a integridade semântica. Entretanto é um esquema de representação de dados relativamente complexo e com arquivos grandes (DONG et al., 2007).

A organização espacial da geometria no IFC é um dos maiores obstáculos em usá-lo para a simulação térmica. Elementos de construção são divididos em várias superfícies, mantendo geometricamente a espessura do elemento (Figura 5), enquanto que os programas de simulação requerem dados de superfície e adiciona

analiticamente a espessura dos elementos, como é executado no gbXML (SHADRINA, 2015).

Figura 5 – Estrutura geométrica do IFC e do gbXML



Fonte: (SHADRINA, 2015, p. 6, tradução nossa).

Quando o IFC é utilizado para especificar o modelo de informações da edificação como um todo, diferentes vistas de um modelo BIM são determinadas como definições de exibição do modelo (*Model View Definitions – MVD*), que é uma lista de requisitos de troca para o modelo IFC para extrair um determinado subconjunto de dados (NASYROV et al., 2014; SHADRINA, 2015).

Há um tipo de MVD para a troca de dados de simulação na versão certificada do IFC (versão 2x3): a MVD para a análise energética da edificação (*Building Energy Analysis – BEA*). A MVD-BEA especifica os diferentes componentes necessários do IFC para a análise de energia, incluindo local, informações de edifício e espaço,

geometria dos principais elementos construtivos, sistemas de climatização e de iluminação. No entanto, atualmente nenhuma ferramenta de simulação comercialmente disponível suporta diretamente dados de entrada do formato IFC (NASYROV et al., 2014).

Programas BIM suportam a versão IFC 2x3, utilizada na presente pesquisa, que contém especificação de mais de 600 classes de objetos que abrangem dados suficientes e necessários para a representação de modelos de edificações (ANDRADE; RUSCHEL, 2009; SHADRINA, 2015).

2.7.3 Arquivos IDF

O *Input Data File* (IDF) é o principal formato de arquivo de dados de entrada que o programa EnergyPlus e outras ferramentas de análise utilizam para executar a simulação de edificações (DOE, 2015; SHADRINA, 2015).

O EnergyPlus faz a leitura do dicionário de dados (.idd) e o arquivo de dados de entrada (.idf) antes de executar qualquer outra tarefa, no qual a quantidade de objetos pode variar dependendo da complexidade da edificação modelada (DOE, 2015; WESTPHAL, 2006).

2.8 EDIFICAÇÕES UTILIZADAS NA PESQUISA PARA OS MODELOS DIGITAIS

Duas edificações com diferentes níveis de complexidade foram escolhidas para serem utilizadas como estudos de caso no decorrer da pesquisa. Elas serão contextualizadas nas subseções a seguir e novamente abordadas e descritas mais adiante no capítulo sobre a metodologia do trabalho.

2.8.1 Case 600 – ASHRAE Standard 140

A norma americana ANSI/ASHRAE Standard 140-2011 (ASHRAE, 2012), como já comentada anteriormente, aborda sobre o método padrão de testes para a validação de programas computacionais que realizam simulações energéticas de edificações com variados graus de complexidade de modelagem, compondo todos os testes possíveis de ocorrer.

Essa norma especifica os procedimentos de teste para avaliar as habilidades técnicas e as possibilidades de aplicação de programas de computador que calculam o desempenho térmico de edificações e de seus sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado (AVAC). Apesar de não poder analisar todos os algoritmos dentro de um programa, as avaliações podem ser utilizadas para indicar as principais falhas ou limitações em suas capacidades (ASHRAE, 2012).

O método padrão de teste (*Standard Method of Test – SMOT*) consiste em uma sequência de avaliações que examina vários modelos térmicos, descritos detalhadamente na norma, que são relevantes para simular o desempenho energético de uma edificação e de seus equipamentos mecânicos (ASHRAE, 2012).

Os valores de saída (*outputs*) são comparados e utilizados em conjunto com a lógica de diagnóstico para identificar as fontes de diferenças previsíveis do programa computacional, que possivelmente podem ser causadas por variações algorítmicas, limitações de modelagem, diferenças de dados de entrada (*inputs*) ou erros de codificação (ASHRAE, 2012).

Na norma (ASHRAE, 2012), os casos de testes são divididos em duas classes para satisfazer diferentes níveis de detalhamento de modelagem dos programas computacionais. Para o presente trabalho destacam-se os testes da Classe I, desenvolvidos pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável dos Estados Unidos (NREL) em parceria com Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency – IEA*) e projetados para diagnósticos mais detalhados do que a Classe II.

Na Classe I, os modelos térmicos são destinados especificamente a testes de diagnóstico para programas capazes de realizar simulações horárias, como é o caso do EnergyPlus. Além disso, o método de teste emprega avaliações comparativas entre programas e foca nas cargas térmicas dos elementos do envelope da edificação e na performance dos equipamentos mecânicos (ASHRAE, 2012).

Por ser um documento relevante, inclusive recomendado pela norma NBR 15575-1 (ABNT, 2013) e pelos regulamentos brasileiros de eficiência energética – RTQ-C e RTQ-R (BRASIL, 2012, 2013) – quanto à validação de programas de simulação de edificações, a ASHRAE Standard 140 foi utilizada como referência para a escolha do modelo que foi empregado na pesquisa.

Como todos os modelos térmicos da norma representam simplificações da realidade, foi escolhido o caso de teste *Case 600* por ser a edificação que serve de base para praticamente todos os outros modelos de simulação da Classe I.

O Case 600 é um modelo simplificado composto por uma única zona de baixa massa térmica (cobertura, piso e paredes leves), retangular e sem divisórias internas. Seu teste analisa a capacidade dos programas em modelar as cargas do envelope da edificação e simular efeitos combinados como massa térmica, fator de ganho de calor solar das janelas (FS_t), calor gerado internamente e infiltração de ar (ASHRAE, 2012).

Sua escolha também se justifica pela explicação de Nasyrov et al. (2014) em que utilizar um modelo idealista e abstrato torna possível identificar os pontos fracos potenciais e quaisquer dados ausentes após a exportação ou importação de procedimentos.

2.8.2 Projeto Casa Eficiente

A fim de complementar a investigação, foi buscado um exemplo representativo de edificação real do cotidiano e com potencial para a análise do comportamento térmico, no caso uma habitação unifamiliar.

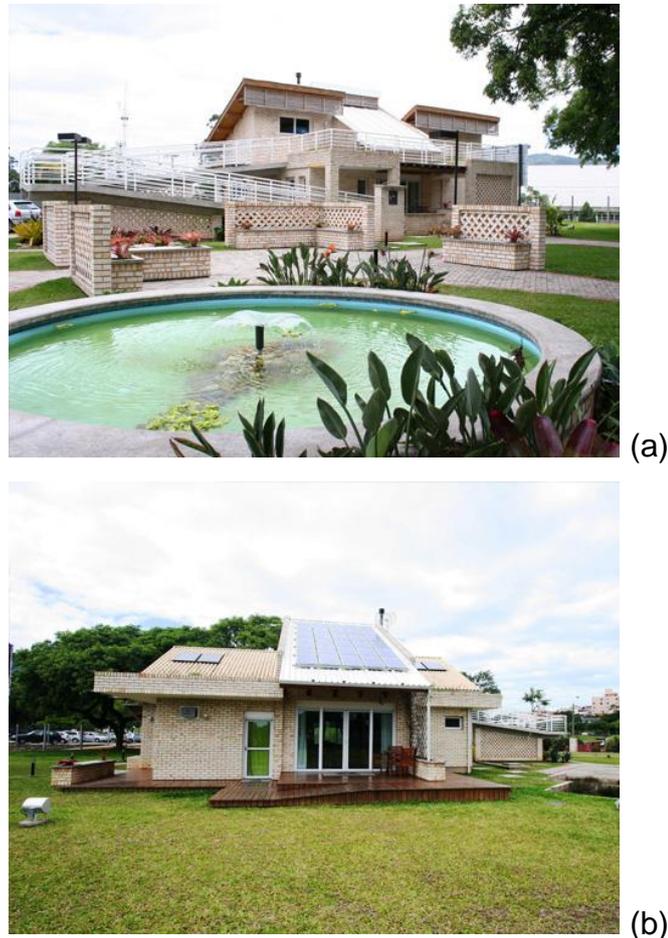
Então foi escolhido o projeto Casa Eficiente, resultado da coordenação da Centrais Elétricas S.A. (ELETROSUL) em parceria com a Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRÁS), através do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), e desenvolvido pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), por meio do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) (ELETROSUL, 2015; LAMBERTS et al., 2010a).

Constitui em um espaço concebido para contribuir na divulgação, desenvolvimento e aplicação de conceitos e soluções em conforto ambiental, eficiência energética e conservação do meio ambiente, visando a sustentabilidade, aprimoramento e modernização do fazer arquitetônico. Dessa forma é um instrumento educativo destinado à visitação e sensibilização pública, disseminador de boas práticas no setor da construção civil, principalmente em edificações residenciais, tornando-se referência nacional para a comunidade acadêmica e profissionais que atuam nesta área (ELETROSUL, 2015; LAMBERTS et al., 2010a, 2010b).

A Casa Eficiente trata-se de uma habitação unifamiliar de classe média para atender quatro pessoas com área útil de 206 m² em dois pavimentos (Figura 6). O programa de necessidades consiste em: dois quartos (solteiro e casal), sala de estar e jantar, cozinha, área de serviço coberta, banheiro, área para recepção (decks

externos), mezanino e duas áreas técnicas (reservatórios de água) (ELETROSUL, 2015).

Figura 6 – Vistas da Casa Eficiente: (a) fachada sul e (b) fachada norte



Fonte: (ELETROSUL, 2015).

A edificação foi inaugurada em 29 de março de 2006 e está localizada no pátio da sede da ELETROSUL, na cidade de Florianópolis-SC, onde o clima é definido como tropical temperado, super úmido, com verão quente e inverno ameno, sub-seco. Foi concebida pelas arquitetas Alexandra Albuquerque Maciel e Suely Ferraz de Andrade, com sistemas e soluções integradas para eficiência energética e desempenho térmico satisfatório pensados desde as etapas iniciais como premissas de projeto (ELETROSUL, 2015; LAMBERTS et al., 2010a, 2010b).

A partir do estudo detalhado das características da região litorânea de Santa Catarina, o projeto arquitetônico foi desenvolvido para o melhor aproveitamento e a

correta adequação das condições climáticas locais, como orientação e radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar, ventos predominantes e o entorno próximo. Também teve o intuito de definir soluções de projeto para utilizar as diversas estratégias bioclimáticas, que exigem menores investimentos, minimizam a dependência de condicionamento artificial e assim proporcionam maior redução do consumo energético (ELETROSUL, 2015; LAMBERTS et al., 2010b).

A ELETROSUL (2015) detalha que houve a preocupação para o equilíbrio entre a tecnologia e o aproveitamento de fontes naturais de energia durante a concepção da edificação, com sistemas alternativos de resfriamento e aquecimento ambiental, prioridade em materiais locais renováveis ou de menor impacto ambiental, uso de vegetação para criação de microclima local agradável, entre outras condicionantes de projeto.

Dentre as estratégias passivas utilizadas no projeto para condicionamento de ar e conforto térmico dos usuários e para evitar ganhos de calor excessivos no verão e reduzir as perdas no inverno, destacam-se (ELETROSUL, 2015):

- a) volumetria e orientação da edificação em função das condições de insolação e ventilação do entorno, para aproveitamento da radiação solar e captação dos ventos predominantes, respectivamente;
- b) ventilação cruzada em todos os ambientes de maior permanência (quartos e sala), pela disposição das esquadrias em fachadas opostas em cada ambiente;
- c) isolamento térmico nas coberturas e inércia térmica das paredes, com o amortecimento e atraso térmico nas temperaturas internas em relação ao ambiente externo, reduzindo a transmissão de calor e as amplitudes térmicas;
- d) toda a área molhada da casa (cozinha, serviço e banheiro), de menor permanência dos ocupantes, foi concentrada no lado oeste, funcionando como barreira contra a insolação nesta orientação;
- e) vidros duplos nas esquadrias, para melhor isolamento térmico e acústico, e persianas externas de PVC e proteções solares externas com vegetação, para sombreamento diurno;
- f) emprego de insuflamento mecânico do ar externo durante o verão, para a ventilação nos dormitórios no período noturno através de equipamentos;

g) circulação de água quente em tubulação no interior dos quartos para aquecimento ambiental.

Como a Casa Eficiente é um centro com potencial para a promoção do ensino e do desenvolvimento científico e tecnológico, foi também criado o Laboratório de Monitoramento Bioclimático e Eficiência Energética (LMBEE). O LMBEE a equipou com um amplo sistema de monitoramento termoenergético e uma estação meteorológica própria, para o controle diário e comparação das variáveis ambientais internas e externas e dos fluxos de calor através das vedações (paredes e coberturas) (ELETROSUL, 2015; LAMBERTS et al., 2010a, 2010b), possibilitando um acompanhamento do comportamento térmico da edificação.

Os pesquisadores do LMBEE também realizaram simulações computacionais do desempenho termoenergético da habitação após a sua construção. Para isto utilizaram o programa computacional EnergyPlus, por meio de um modelo digital que representou ao máximo a realidade da casa já construída (LAMBERTS et al., 2010a). Como resultados, obtiveram o comportamento das temperaturas internas de ambientes específicos, como a sala, o quarto de casal e o banheiro, para compará-los com dados reais medidos internamente com equipamentos e no ambiente externo e avaliá-los quanto ao desempenho térmico (LAMBERTS et al., 2010a).

Suas atividades de pesquisa e os resultados obtidos ao longo de dois anos e meio foram apresentados em quatro publicações técnicas direcionadas à construção civil e ao desenvolvimento de projetos adequados ao meio ambiente, sendo relevantes para este trabalho o primeiro e o último volume: Volume 1 - Bioclimatologia e Desempenho Térmico (LAMBERTS et al., 2010b) e Volume 4 - Simulação Computacional do Desempenho Térmico-Energético (LAMBERTS et al., 2010a), respectivamente.

Tais publicações serviram de orientação para a modelagem e simulação do projeto Casa Eficiente nos programas computacionais que são objetos de estudo da presente pesquisa, a ser explicado na seção sobre a metodologia.

2.9 TRABALHOS SIMILARES PRODUZIDOS NA ÁREA DA PESQUISA

Pesquisas na área sobre interoperabilidade entre programas computacionais já ocorrem há mais de 10 anos, sendo que a questão da simulação de edificações foi mais incorporada a partir da última década. Abaixo serão apresentados alguns

trabalhos que foram encontrados no decorrer da pesquisa e considerados relevantes pela semelhança com a presente dissertação.

No artigo publicado na conferência internacional ACADIA 2013, Jeong et al. (2013) investigaram uma nova plataforma para visualizar os resultados do desempenho térmico de edificações no sistema BIM, por codificação de cores dos componentes construtivos com base em valores do fluxo de energia. A plataforma desenvolvida combinou o BIM com resultados baseados no objeto de ferramentas de simulação energética, integrando a capacidade de visualização de tais programas para o BIM através da modelagem física orientada ao objeto (*Object-Oriented Physical Modeling* – OOPM).

Em artigo mais recente publicado pelos mesmos autores (JEONG et al., 2014), eles investigaram uma nova abordagem para vincular o BIM, comumente utilizado para projetos arquitetônicos, com a modelagem energética de edificações (BEM) que oferece suporte às simulações de energia. Com isso desenvolveram um novo programa computacional para exportar modelos BIM do Revit para modelos de energia baseados no Modelica, uma linguagem de modelagem física orientada ao objeto, utilizando a interface de programação de aplicativos (*Application Programming Interface* – API) do Revit através da linguagem de programação C# para acessar diretamente a representação de dados orientados ao objeto. Assim surgiu a ferramenta BIM2BEM para conectar o Autodesk Revit com a biblioteca de construções do Modelica, que gera automaticamente o modelo BEM chamado de ModelicaBEM. Este modelo traduz informações obtidas do BIM e pode executar simulações térmicas sem a necessidade de importação ou exportação, facilitando a reutilização de dados originais do BIM em simulações de edificações.

Kumar (2008), em seu trabalho de mestrado, utilizou o Revit MEP como *software* BIM para comparar e testar sua interoperabilidade com programas de modelagem e análise energética como o Ecotect e o IES<VE>. A pesquisa analisou quais informações associadas ao modelo de construção, além da geometria, que foram mantidas e o que foi perdido durante o processo de transferência de dados de um formato para outro com os tipos de arquivo DXF, gbXML e IFC. O estudo também testou a transferência de informações entre o modelo de construção do MEP e o seu modelo analítico.

Kensek e Kumar (2008) apresentaram um estudo para avaliar se programas BIM são suficientemente robustos para permitir uma interoperabilidade sem falhas de

seu modelo de construção com o modelo analítico de energia. Para isso utilizaram o Autodesk Revit MEP como programa BIM e o IES<VE> para a análise de energia, escolhidos devido à integração entre ambos. Outra parte do estudo melhorou a interface MEP-IES através da criação de um arquivo modelo (*template*) do Revit para resolver as lacunas entre esses programas, o qual pode ser importado para um projeto no Revit, tornando o modelo BIM mais exato e informativo quando utilizado em conjunto com o IES<VE>.

Durante o evento ECPPM 2014, Nasyrov et al. (2014) exibiram um trabalho que analisou, com base em um modelo idealizado, a interoperabilidade, confiabilidade e usabilidade de implementações atuais que visam proporcionar um fluxo de dados entre modelos BIM e ferramentas de simulação de desempenho energético de edificações. Foram utilizados: Autodesk Revit e Graphisoft ArchiCAD como ferramentas BIM; Green Building Studio, Ecotect e EnergyPlus como ferramentas de simulação; Space Boundary Tool, Legacy OpenStudio para o SketchUp e Simergy como interfaces de usuário para o EnergyPlus; e gbXML e IFC como formatos de arquivo para troca de dados. Constatou-se que a geometria da edificação não é o único dado necessário, as informações complementares também são indispensáveis na troca. Entretanto, os resultados mostraram que não foi possível a troca direta de informações do modelo térmico da edificação sem uma edição manual, requerendo a compreensão das limitações no uso de modelos BIM para simulações.

Shadrina (2015) expôs uma contribuição adicional que expande a discussão sobre o método mais eficaz para exportar os dados de materiais construtivos de modelos em plataformas BIM (ArchiCAD, Allplan e Revit) para ferramentas de simulação térmica (EnergyPlus e Archiphysik), seja com os formatos de arquivo IFC ou gbXML ou pela necessidade do auxílio de *plug-ins* adicionais. Como conclusão foram sugeridas orientações e recomendações sobre o melhor fluxo de trabalho para cada plataforma BIM, assim como para aplicações que auxiliam o mapeamento dos dados necessários do IFC ou gbXML para o arquivo de entrada de dados (IDF).

Martins (2011) verificou o nível de interoperabilidade entre sistemas BIM e simuladores ambientais, com um mesmo modelo de edificação exportado no esquema gbXML, para simulações e análises de iluminação natural e artificial. Os resultados demonstraram que a interoperabilidade entre os sistemas Graphisoft ArchiCAD 14 e Autodesk Revit Architecture 2011 e os simuladores ambientais Autodesk Ecotect

Analysis 2011 e IES<VE> 6.1.1 é incompleta e incipiente, sendo necessário reconfigurar o modelo após a exportação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

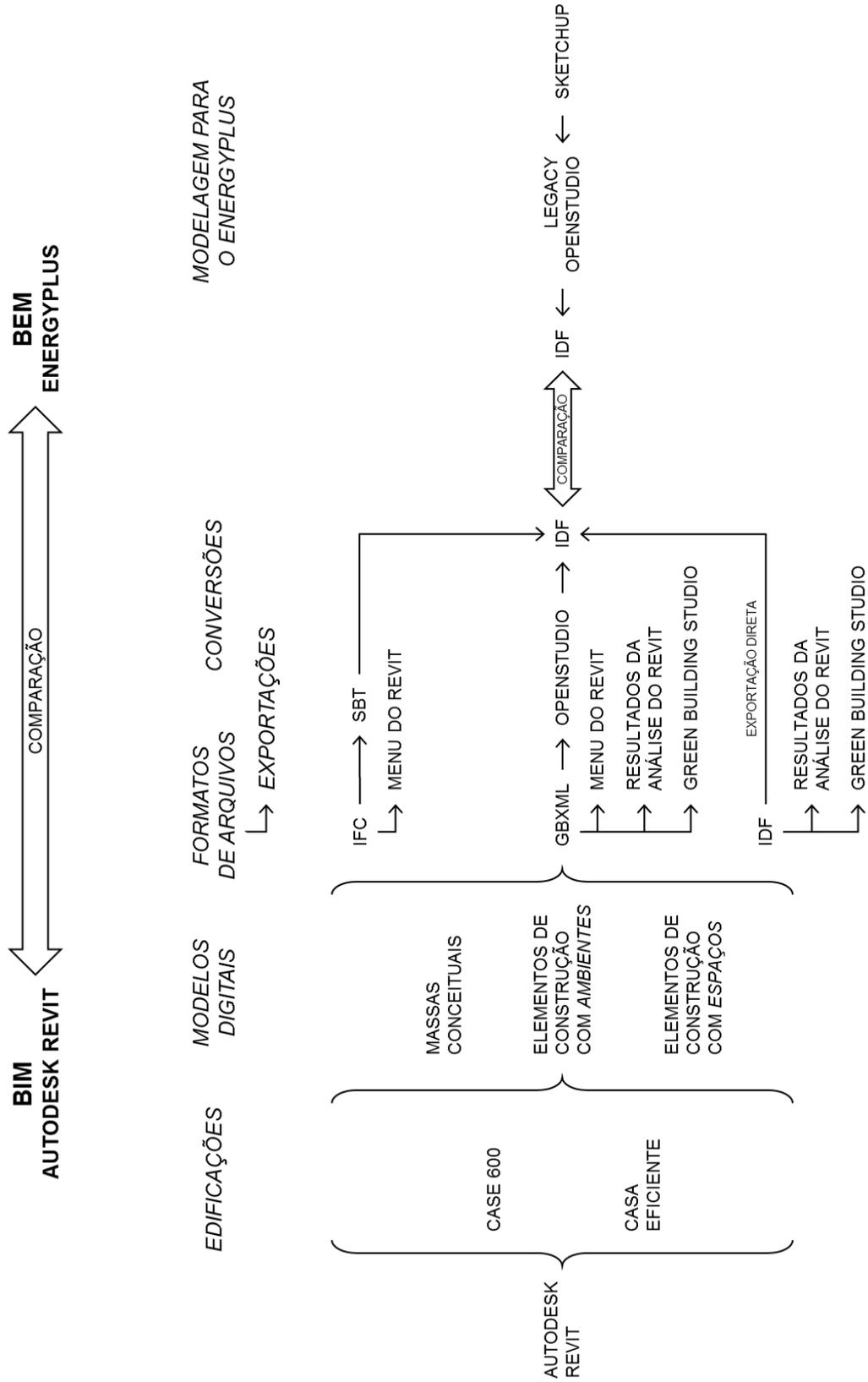
O método de pesquisa da dissertação foi do tipo experimental. De maneira geral, a metodologia foi empregar o processo de simulações térmicas para estudar a transformação de modelos BIM em modelos de energia de edificações (BEM), tendo como instrumentos principais os programas computacionais Autodesk Revit e EnergyPlus.

Com o intuito de dar a orientação necessária às etapas e ao desenvolvimento da presente pesquisa, o procedimento metodológico do trabalho consistiu sucintamente em:

- a) revisão de literatura, onde se encontraram informações já disponíveis acerca do assunto, a fim de esclarecer conceitos dos elementos utilizados na pesquisa que envolvem o tipo proposto de análise do ambiente construído;
- b) estudos de caso, constituídos por edificações representativas para a investigação, por meio da coleta de informações suficientes para a produção de modelos digitais com diferentes configurações nos programas Autodesk Revit e EnergyPlus para o consequente desenvolvimento da análise proposta;
- c) exportações e conversões de todos os modelos criados no Revit para o formato de arquivo suportado pelo EnergyPlus, com o auxílio de ferramentas adicionais; todos os programas computacionais foram escolhidos por serem gratuitos (versão estudantil no caso do Autodesk Revit) e utilizados em suas versões mais recentes até o primeiro trimestre de 2016;
- d) cruzamento comparativo dos dados obtidos pelos modelos virtuais produzidos no Revit com o padrão de referência do EnergyPlus, por meio de parâmetros definidos para a realização da análise da interoperabilidade entre os respectivos programas computacionais estudados nesta pesquisa.

Detalhando essa etapa da pesquisa, iniciou-se o processo de investigação experimental, resumido na Figura 7, após a leitura da bibliografia disponível que proporcionou o embasamento necessário para o conhecimento das informações pertinentes que orientaram o trabalho.

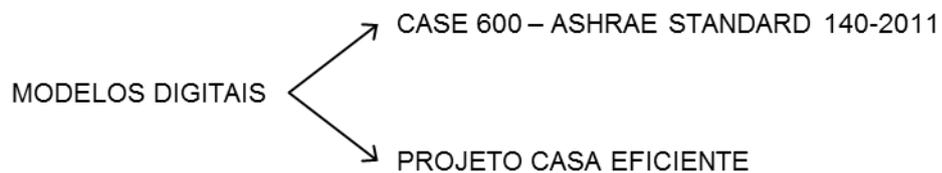
Figura 7 – Resumo da metodologia



3.1 DEFINIÇÃO DOS MODELOS DE EDIFICAÇÕES NO ENERGYPLUS

Para garantir uma investigação ampla e com resultados consistentes, foram definidas duas edificações (Figura 8) com diferentes níveis de complexidade para a realização dos experimentos. Isso permitiu obter variações de geometrias criadas e comportamentos térmicos com diferenças consequentes nos resultados que foram comparados entre si.

Figura 8 – Edificações correspondentes aos modelos digitais criados na pesquisa



Fonte: Autor.

As edificações, já contextualizadas na revisão de literatura, são: o caso de teste Case 600 da norma ASHRAE Standard 140, pois representa um modelo simplificado, com uma única zona térmica, e de maior controle de suas variáveis; e o Projeto Casa Eficiente, mais complexo, cujos dados divulgados são bem detalhados e possui diferentes elementos de edificação e ambientes adjacentes.

Inicialmente as duas edificações foram modeladas no programa SketchUp 2016, com o auxílio do *plug-in* Legacy OpenStudio (versão 1.0.14), para serem gerados os arquivos em formato IDF que foram configurados no EnergyPlus, versão 8.4.0, como esquematizado na Figura 9 e descritas nas subseções a seguir. Estes modelos serviram como padrão de referência para a comparação dos modelos BIM criados no Revit.

Figura 9 – Processo de criação dos modelos para o EnergyPlus



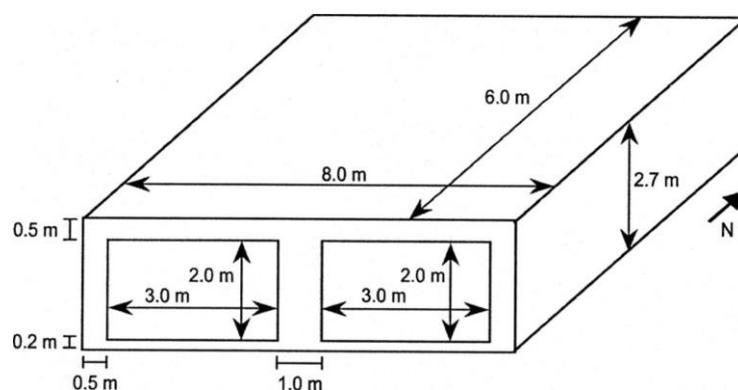
Fonte: Autor.

3.1.1 Case 600 – ASHRAE Standard 140

O caso de teste Case 600 foi produzido para o EnergyPlus de acordo com as especificações da norma ASHRAE Standard 140.

A edificação foi modelada no SketchUp para corresponder a uma zona térmica com volume de ar interno de 129,6 m³, conforme a Figura 10. Desse modo, a geometria representa um prisma retangular com área de 48 m² (ASHRAE, 2012).

Figura 10 – Geometria da edificação do Case 600



Fonte: (ASHRAE, 2012, p. 16).

O envelope do modelo é composto por piso, paredes e cobertura com baixa massa térmica. A Tabela 1 apresenta as características desses fechamentos opacos da edificação com suas respectivas camadas e propriedades térmicas dos materiais correspondentes.

Tabela 1 – Características dos fechamentos opacos empregados no Case 600

(continua)					
Material (do interior para o exterior)	Espessura [m]	Condutividade térmica [W/(m·K)]	Resistência térmica [(m ² ·K)/W]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/(kg·K)]
<i>Parede externa</i>					
Placa de gesso acartonado	0,012	0,160	0,075	950	840
Manta de fibra de vidro	0,066	0,040	1,650	12	840
Lambri de madeira	0,009	0,140	0,064	530	900

Tabela 1 – Características dos fechamentos opacos empregados no Case 600

Material (do interior para o exterior)	Espessura [m]	Condutividade térmica [W/(m·K)]	Resistência térmica [(m ² ·K)/W]	Densidade [kg/m ³]	(conclusão)
					Calor específico [J/(kg·K)]
Piso					
Piso de madeira	0,025	0,140	0,179	650	1200
Isolamento	1,003 ¹	0,040	25,075	0,001 ²	100 ²
Cobertura					
Placa de gesso acartonado	0,010	0,160	0,063	950	840
Manta de fibra de vidro	0,1118	0,040	2,794	12	840
Deck cobertura	0,019	0,140	0,136	530	900

Fonte: Adaptação de ASHRAE (2012, p. 17).

¹ A ASHRAE Standard 140 aponta que o material de isolamento do piso deve ter espessura elevada, com 1,003 m, para efetivamente desvincular termicamente o piso do solo.

² A mesma norma indica que a densidade e o calor específico do isolamento do piso devem possuir o menor valor possível que o programa permite; no EnergyPlus, foram adotados os valores apresentados na tabela.

As janelas (Tabela 2) são dois elementos localizados na fachada sul e com área total de 12 m², não possuem áreas de caixilhos e são do tipo dupla, compostas por dois painéis de vidro e uma camada interna de ar.

Tabela 2 – Propriedades relevantes das janelas

Propriedade	Valor
Número de camadas de vidro	2
Espessura do vidro (e)	3,175 mm
Espessura da camada de ar (e)	13 mm
Condutividade térmica do vidro (λ)	1,06 W/(m·K)
Resistência térmica da janela (R_T)	0,333 m ² ·K/W
Transmitância térmica da janela (U)	3,00 W/(m ² ·K)
Densidade do vidro (ρ)	2500 kg/m ³
Calor específico do vidro (c)	750 J/(kg·K)

Fonte: Adaptação de ASHRAE (2012, p. 19).

O arquivo climático utilizado para as simulações, denominado DRYCOLD.TMY, foi fornecido com os documentos eletrônicos disponibilizados na compra da norma. Algumas características do clima e do local da edificação estão sintetizadas no Quadro 4. O formato do arquivo é do tipo *Typical Meteorological Year* (TMY), o qual foi

convertido em formato *EnergyPlus Weather* (EPW), próprio para o EnergyPlus, por meio da ferramenta *Weather Statistics and Conversions* instalada com o programa.

Quadro 4 – Características de clima e localização do arquivo climático DRYCOLD.TMY

Característica	
Local	Stapleton, Denver, Colorado, EUA
Clima	Inverno seco e verão quente e úmido
Latitude	39,8° Norte
Longitude	104,9 Oeste
Altitude	1609 m
Fuso horário	-7
Terreno	Plano e desobstruído

Fonte: Adaptação de ASHRAE (2012, p. 154).

As temperaturas mensais do solo do entorno do modelo estão presentes no arquivo climático, entretanto foi utilizado o pré-processador Slab, vinculado ao EnergyPlus, para a obtenção de dados mais confiáveis. Essa ferramenta calcula as temperaturas médias mensais baseadas nas temperaturas médias internas e externas da edificação de acordo com o clima determinado (PEREIRA, 2009).

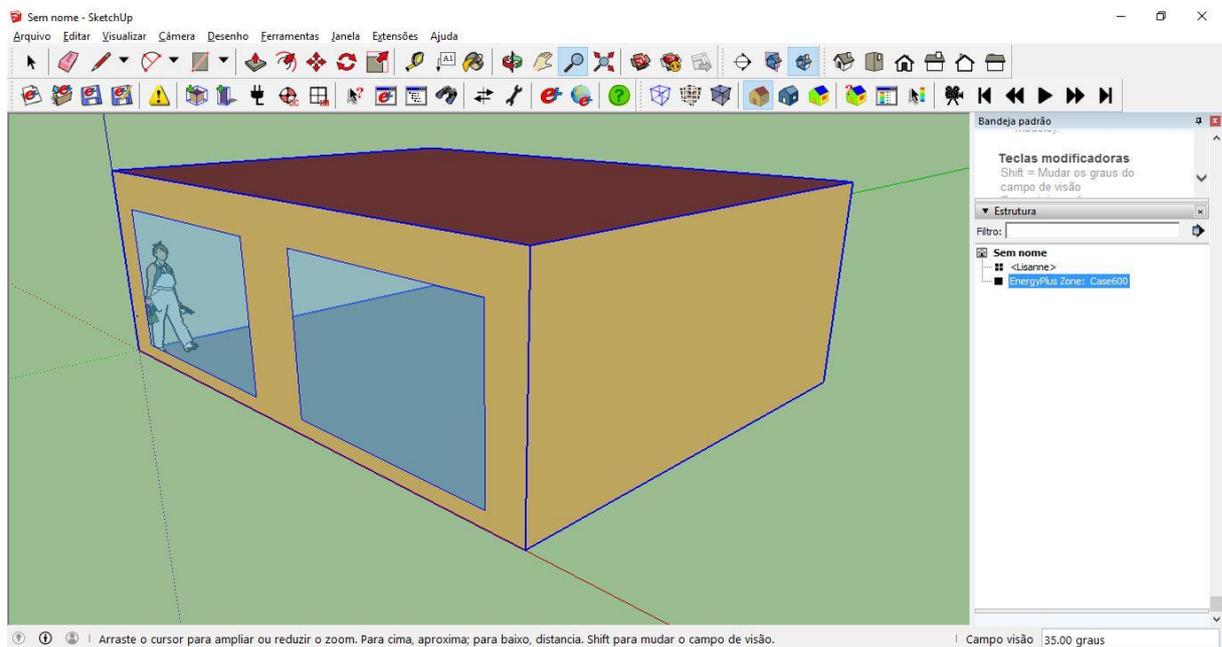
De acordo com a norma (ASHRAE, 2012), a taxa de renovação de ar (N_v) foi configurada para 0,5 trocas de volume de ar por hora, continuamente 24 horas por dia durante o ano inteiro. Os ganhos internos de calor, gerados por equipamentos, sistema de iluminação e ocupantes, também foram definidos sem interrupções durante todo o ano, com carga total de 200 W sendo 100% de calor sensível.

A norma também recomenda que padrões para horários de verão e feriados não sejam utilizados nas simulações e que estas sejam executadas para o ano inteiro (ASHRAE, 2012). Outras configurações relacionadas ao que foi apontado até aqui foram mantidas com os valores padrões do programa EnergyPlus.

Não foram configurados sistemas mecânicos de AVAC para que os resultados das simulações para temperaturas internas dos ambientes não ficassem compreendidos entre as temperaturas de *setpoint* do termostato de controle para aquecimento e resfriamento.

A geometria do modelo digital de teste Case 600 produzido para o EnergyPlus 8.4.0 pode ser visualizada pelo SketchUp, na Figura 11, a partir de seu arquivo IDF.

Figura 11 – Case 600 modelado no SketchUp pelo *plug-in* Legacy OpenStudio



Fonte: Autor com base no programa SketchUp 2016.

3.1.2 Projeto Casa Eficiente

Com relação ao Projeto Casa Eficiente, os desenhos técnicos da edificação (plantas, cortes, fachadas, detalhes, especificações, entre outros) foram adquiridos em formato 2D por contato com uma das responsáveis pelo projeto arquitetônico, a arquiteta Alexandra Maciel. A partir disso foi possível transferir as informações do projeto para a modelagem computacional com os programas SketchUp e EnergyPlus.

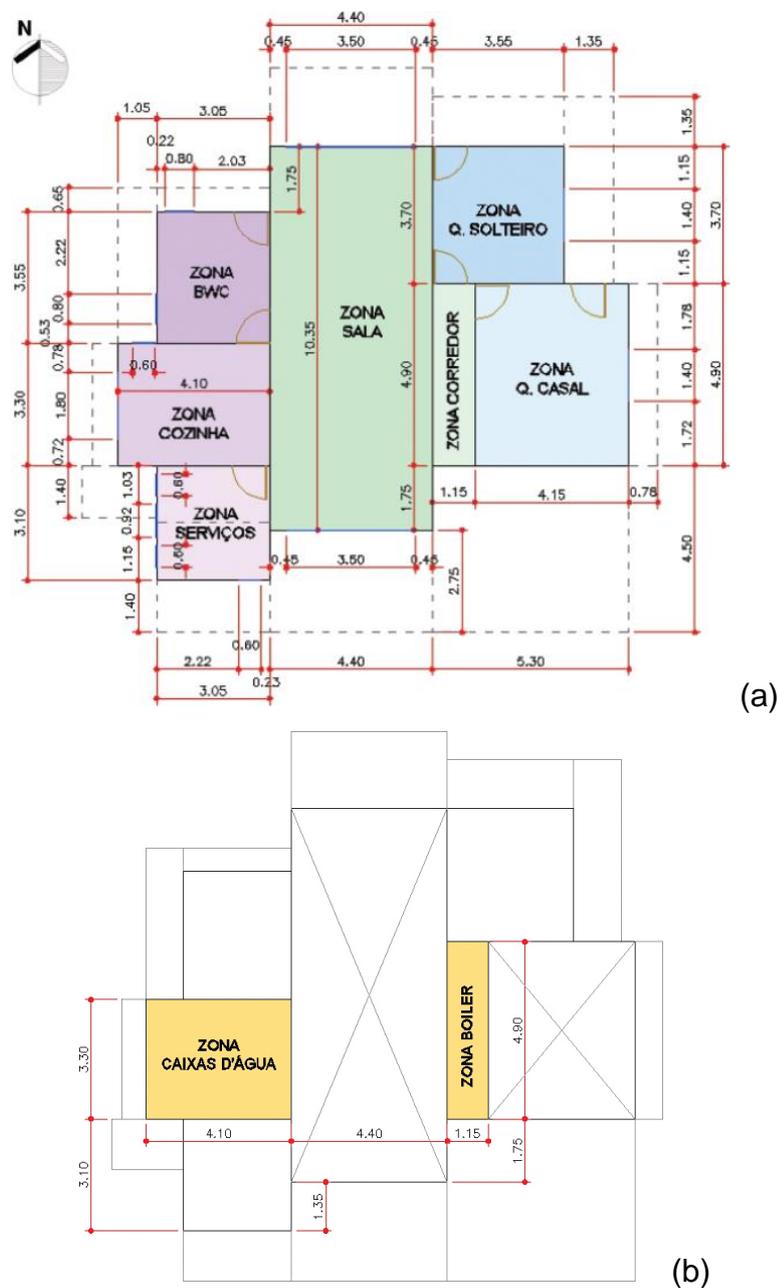
Ressalta-se o cuidado para a criação de uma representação bastante semelhante ao que foi analisado pelas pesquisas realizadas na dissertação de mestrado de Pereira (2009) e pelo Laboratório de Monitoramento Bioclimático e Eficiência Energética (LMBEE) instalado na habitação, juntamente com as informações contidas nas publicações técnicas citadas anteriormente na revisão de literatura (LAMBERTS et al., 2010a, 2010b), conforme as características físicas e construtivas existentes na edificação estudada.

A habitação foi considerada como um todo, principalmente a sua envoltória (paredes externas e coberturas), que possui grande influência nos resultados do comportamento térmico, e os componentes construtivos com seus respectivos

materiais, entre outros aspectos. Os dados necessários (LAMBERTS et al., 2010a; PEREIRA, 2009) apresentados a seguir foram alimentados nos programas para a criação do modelo computacional de referência.

O modelo do EnergyPlus seguiu as dimensões em planta e corte, a volumetria e orientação da edificação, com as zonas térmicas que representam cada um dos respectivos ambientes (Figura 12).

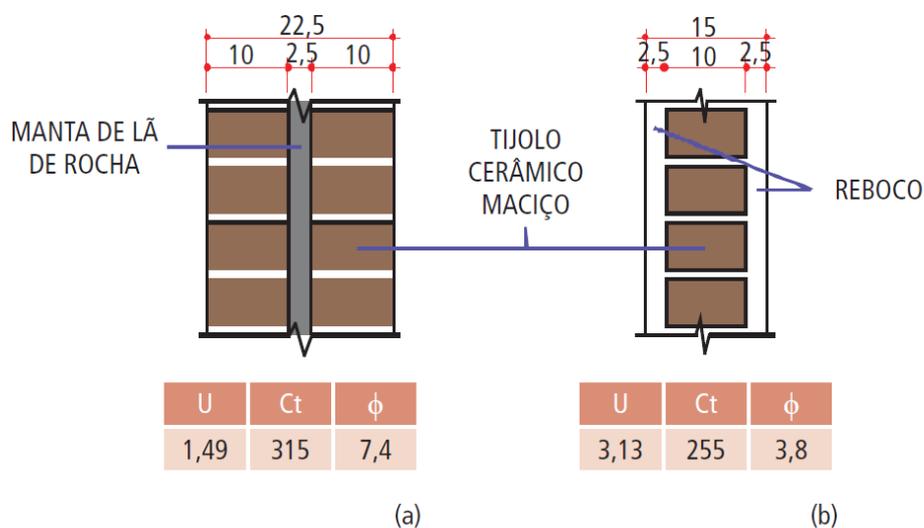
Figura 12 – Plantas baixas da Casa Eficiente: (a) térreo e (b) pavimento superior



O piso de toda a casa foi considerado como uma laje de concreto com 10 cm de espessura, não sendo considerados os revestimentos cerâmicos existentes, conforme adotado nas simulações realizadas por LMBEE (LAMBERTS et al., 2010a).

Foram empregados dois tipos de paredes de alvenaria nos fechamentos opacos (Figura 13): dupla em todas paredes externas, com preenchimento de manta de lã de rocha, e simples em algumas paredes internas, rebocada nas duas faces.

Figura 13 – Esquema das paredes: (a) dupla e (b) simples

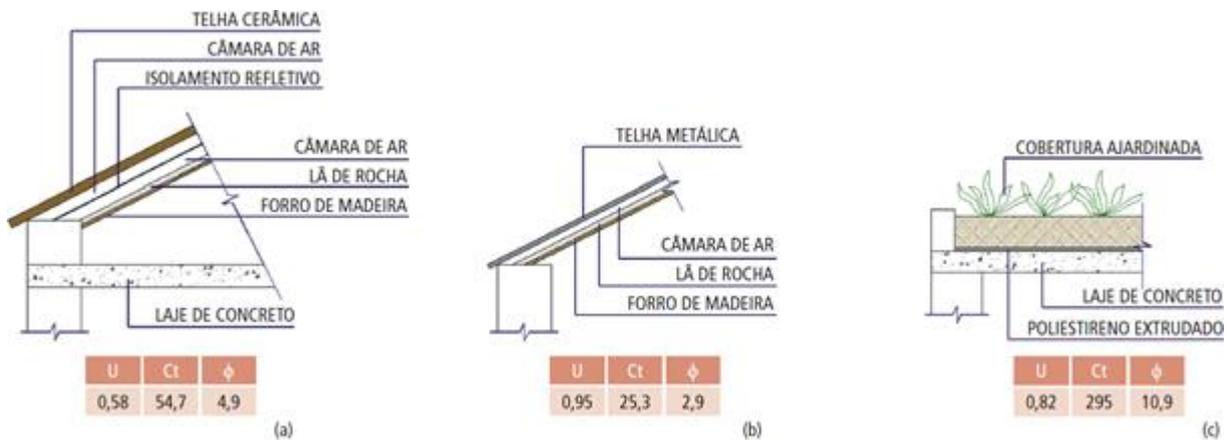


NOTA: U = Transmitância térmica ($W/m^2.K$); Ct = Capacidade térmica ($kJ/m^2.K$); ϕ = Atraso térmico (horas).

Fonte: (LAMBERTS et al., 2010a, p. 30).

Há três tipos principais de coberturas que compõem o projeto (Figura 14): (1) telha cerâmica – quarto de casal e áreas das caixas d'água e boiler –, (2) telha metálica – salas, sendo que a metade norte possui mais camadas que representam os painéis fotovoltaicos – e (3) telhado jardim – banheiro e quarto de solteiro; as duas primeiras coberturas possuem 27° de inclinação. A cobertura da cozinha e do corredor é uma laje de concreto com 10 cm de espessura por possuírem outras zonas acima delas. E a área de serviços possui uma cobertura mista, composta por uma laje horizontal parcialmente coberta por jardim.

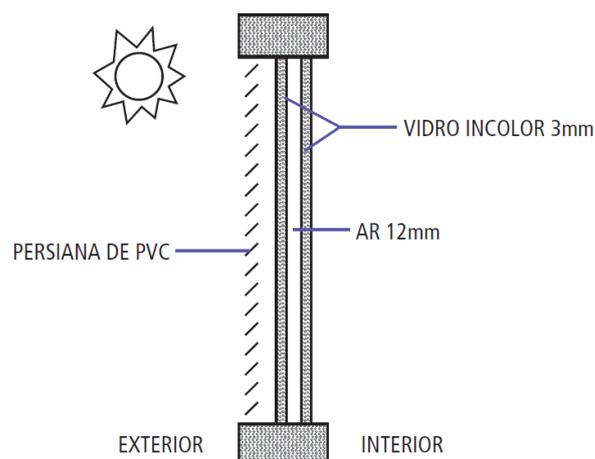
Figura 14 – Esquema das coberturas: (a) telha cerâmica, (b) telha metálica e (c) cobertura vegetada



Fonte: (LAMBERTS et al., 2010a, p. 31).

As portas e janelas externas foram adotadas com duas camadas de vidro (Figura 15), exceto a porta do banheiro que é de PVC com 1 cm de espessura e as demais portas internas que são de madeira com 3 cm de espessura. As persianas externas de PVC foram consideradas abertas, por isso não foram acrescentadas no modelo.

Figura 15 – Esquema das esquadrias



Fonte: (LAMBERTS et al., 2010a, p. 34).

Também foram consideradas as proteções solares externas existentes nas diversas fachadas da edificação, como os beirais das coberturas.

E cada material empregado com suas respectivas propriedades térmicas (Tabela 3) foram obtidos na norma NBR 15220 - Parte 2 (ABNT, 2005c).

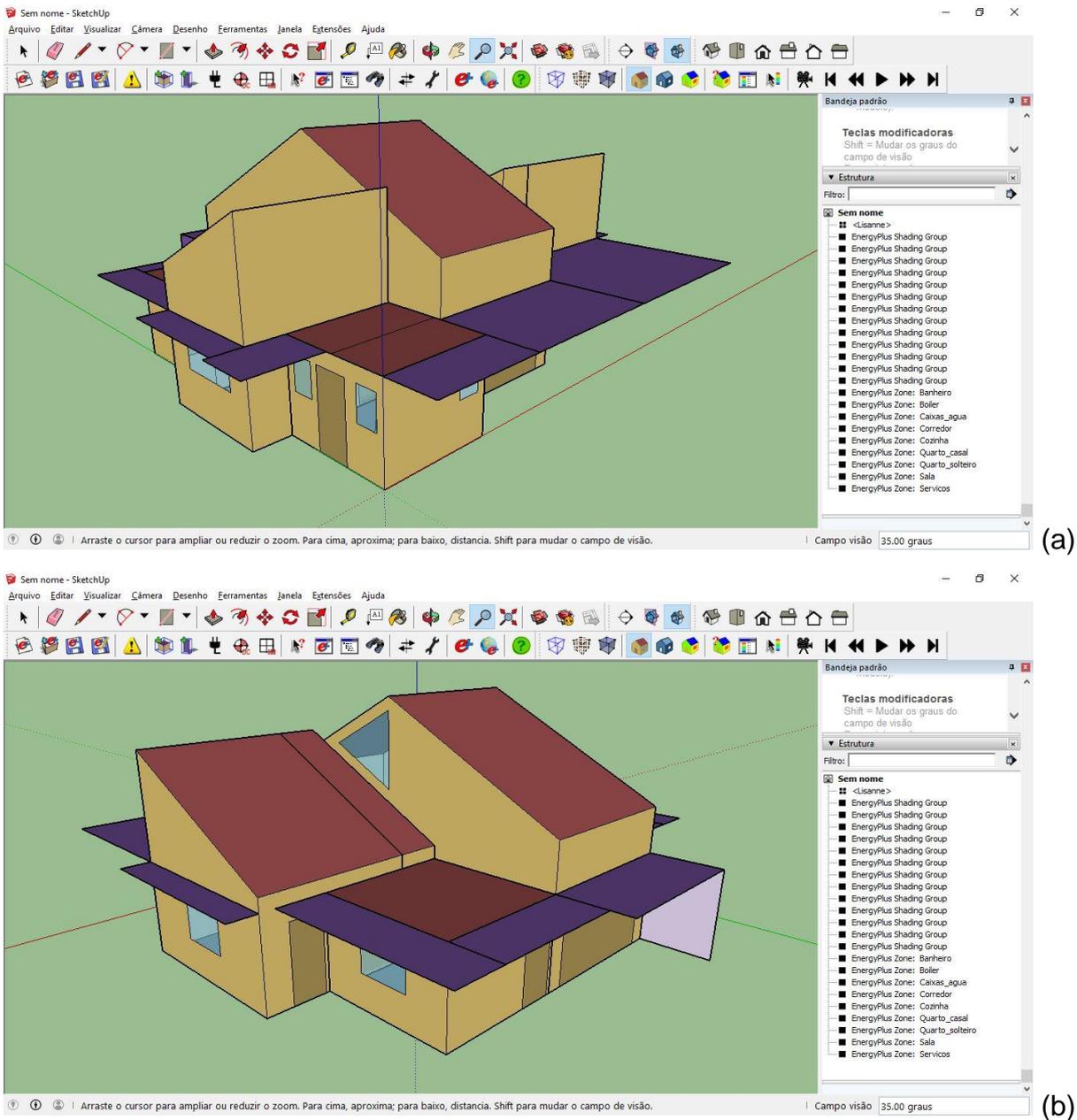
Tabela 3 – Características dos materiais empregados na Casa Eficiente

Material	Condutividade térmica [W/(m·K)]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/(kg·K)]	Absortância	Resistência térmica [(m ² ·K)/W]
Tijolo cerâmico maciço 10cm, com argamassa de assentamento	0,900	1764	920	0,3	0,107
Argamassa reboco 2,5cm	1,150	2000	1000	0,2	0,022
Concreto maciço 10cm	1,750	2200	1000	0,3	0,057
Telha cerâmica 1cm	1,050	2000	920	0,4	0,010
Telha metálica 0,1cm	112,00	7100	380	0,2	0,000
Madeira para forro 1,5cm	0,140	600	2300	0,7	0,107
Madeira para porta 3cm	0,150	600	1340	0,2	0,200
PVC para esquadria 1cm	0,200	1350	960	0,2	0,050
Polietileno aluminizado 0,5cm	0,400	1200	2299	0,3	0,013
Manta de lã de rocha 2,5cm	0,045	100	750	-	0,555
Poliestireno extrudado 2cm	0,035	30	1420	-	0,571
Câmara de ar de baixa emissividade, espessura >5cm – fluxo descendente	-	-	-	-	0,61
Câmara de ar de alta emissividade, espessura >5cm – fluxo descendente	-	-	-	-	0,21
Câmara de ar de alta emissividade, espessura 3cm – fluxo descendente	-	-	-	-	0,18

Fonte: Adaptação de LAMBERTS et al. (2010a, p. 32).

A Figura 16 demonstra a geometria do modelo digital da Casa Eficiente produzido para o EnergyPlus e visualizada pelo SketchUp a partir de seu arquivo IDF.

Figura 16 – Perspectivas da modelo da Casa Eficiente produzido no SketchUp: fachadas (a) leste e sul e (b) oeste e norte



Fonte: Autor com base no programa SketchUp 2016.

Na modelagem de edificações com mais de uma zona térmica, como acontece na Casa Eficiente, “as superfícies coplanares de duas zonas adjacentes precisam ser combinadas para que sejam feitos os cálculos de trocas de calor entre elas” (VERSAGE; LAMBERTS, 2010, p. 6). Então no modelo da Casa Eficiente produzido no SketchUp, as superfícies e subsuperfícies que pertencem a zonas adjacentes foram reconhecidas e recortadas, quando necessário, e o comando Match Surfaces

foi utilizado para combiná-las automaticamente, sendo que em superfícies não-retangulares esta combinação foi feita manualmente.

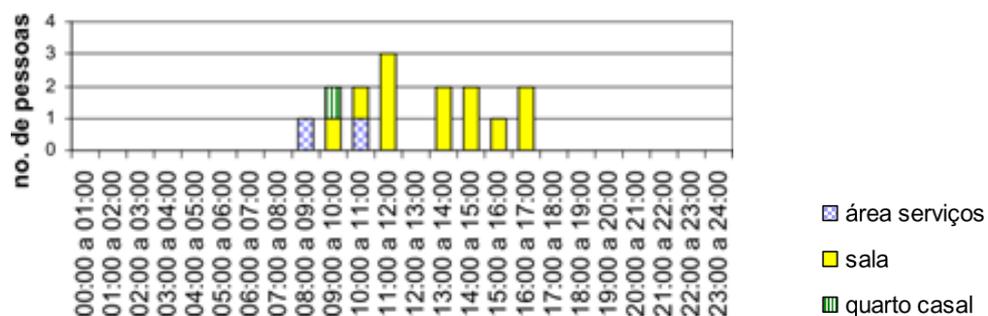
O arquivo climático em formato EPW utilizado no EnergyPlus é baseado no ano climático de referência (*Test Reference Year – TRY*) para a cidade de Florianópolis-SC e foi obtido no *site* do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da UFSC (LABEEE, 2016).

Assim como na modelagem do Case 600, as temperaturas mensais do solo também foram pré-processadas na ferramenta Slab para a obtenção de valores mais confiáveis, constituindo-se como parte do processo ideal de simulação no EnergyPlus.

Para determinar as fontes internas de calor, foram utilizados dados de monitoramento da edificação no período em que a casa permaneceu com portas e janelas externas fechadas durante as 24 horas de todos os dias e foi ocupada apenas durante o dia, com seus usuários aproveitando ao máximo a iluminação natural (LAMBERTS et al., 2010a; PEREIRA, 2009). Com isso, no modelo do EnergyPlus não foram incluídos ganhos de calor pela iluminação e, como não houve ventilação, não foi configurada taxa de renovação de ar.

Na ocupação dos usuários, considerou-se quatro pessoas e foram criados padrões (*schedules*) definindo a quantidade de ocupantes em cada zona do modelo equivalentes ao dia de monitoramento 7 de janeiro de 2008, quando a casa apresentou uma das maiores variações de ocupação ao longo do dia e entre alguns ambientes, conforme o Gráfico 1. Os ambientes não mostrados no gráfico não foram ocupados no dia de monitoramento e a casa permaneceu sem usuários em todos os finais de semana (LAMBERTS et al., 2010a; PEREIRA, 2009).

Gráfico 1 – Ocupação da Casa Eficiente no dia 7 de janeiro de 2008



Fonte: Adaptação de (PEREIRA, 2009, p. 47).

Os valores de taxa metabólica (TM) das atividades realizadas pelos usuários nas zonas ocupadas (Quadro 5), que resultam em diferentes produções de calor pela multiplicação com a quantidade de pessoas na zona, foram definidas por Pereira (2009) com base no Manual de Fundamentos para conforto térmico da ASHRAE e considerando uma área de pele média de 1,80 m².

Quadro 5 – Atividades realizadas e calor produzido nas zonas térmicas do modelo

Zona	Atividade realizada	Calor produzido [W/m ²]	Calor produzido para área de pele [W]
Área de serviços	Limpeza doméstica	115	207
Sala	Sentado, lendo e/ou escrevendo	60	108
Quarto casal	Em pé	70	126

Fonte: Adaptação de Pereira (2009, p. 46).

Quanto aos equipamentos elétricos, foram considerados uma geladeira na zona da cozinha, com potência média de 50 W, e um computador no quarto do casal, com 130 W de potência. Ambos os aparelhos permaneceram ligados 24 horas por dia e com valor adotado de 0,5 para a fração radiante de ganho de calor (LAMBERTS et al., 2010a; PEREIRA, 2009).

As simulações foram configuradas para serem executadas para o ano inteiro sem padrões para horários de verão e feriados. Outras configurações foram mantidas com os valores padrões do programa EnergyPlus.

Como no Case 600, para a Casa Eficiente também não foram configurados sistemas de condicionamento do ar para evitar que as temperaturas internas dos ambientes compreendessem entre os valores definidos no termostato de controle.

3.2 MODELAGEM DAS EDIFICAÇÕES NO AUTODESK REVIT

No programa computacional Autodesk Revit 2016 foi possível produzir os modelos de edificações por duas formas: utilizando massas conceituais e elementos de construção.

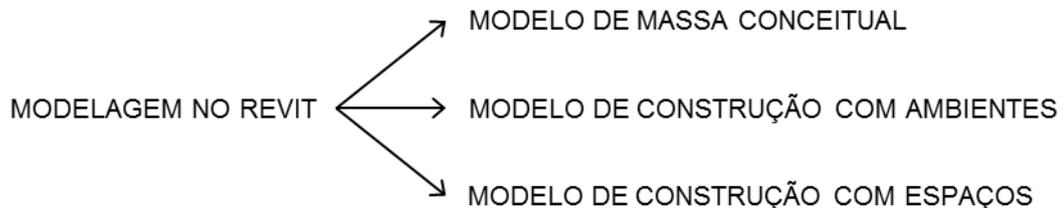
As massas conceituais são volumes genéricos para estudos preliminares que auxiliam na exploração das ideias de projeto e na representação abstrata da

edificação, enquanto que os elementos de construção representam as características reais com um maior controle de edição, como espessuras, materiais etc., de pisos, paredes, coberturas, aberturas, entre outros componentes da edificação (AUTODESK, 2016a).

A partir da modelagem com elementos de construção, há também outras duas variações de configuração que foram empregadas: inserindo ambientes e espaços. Estes dois termos possuem conceitos distintos no Revit que influenciam na execução da análise de energia, pois fornecem informações diferentes sobre as configurações de iluminação, equipamentos e ocupação: os ambientes utilizam configurações padrão de acordo com o tipo de construção oferecido pelo Green Building Studio, enquanto que os espaços utilizam dados personalizáveis definidos no modelo do Revit (AUTODESK, 2016a).

Portanto, além do modelo do EnergyPlus, cada edificação definida (Case 600 e Casa Eficiente) também foi modelada no programa Autodesk Revit por meio das três variações possíveis contextualizadas acima, esquematizadas na Figura 17.

Figura 17 – Tipos de modelos de edificações no Autodesk Revit 2016



Fonte: Autor.

Os modelos BIM das edificações criados no Revit, descritos detalhadamente nas subseções a seguir, foram produzidos de acordo com as mesmas orientações utilizadas nos modelos do EnergyPlus. As configurações do EnergyPlus que são inexistentes no Revit foram ignoradas; onde o programa não permite a entrada de dados específicos, foram escolhidos valores padrões existentes no Revit que fossem equivalentes à intenção de especificação da edificação; e foram mantidos parâmetros padrões do Revit para os dados de entrada do programa que não interfeririam na simulação ou não foram especificados nas edificações.

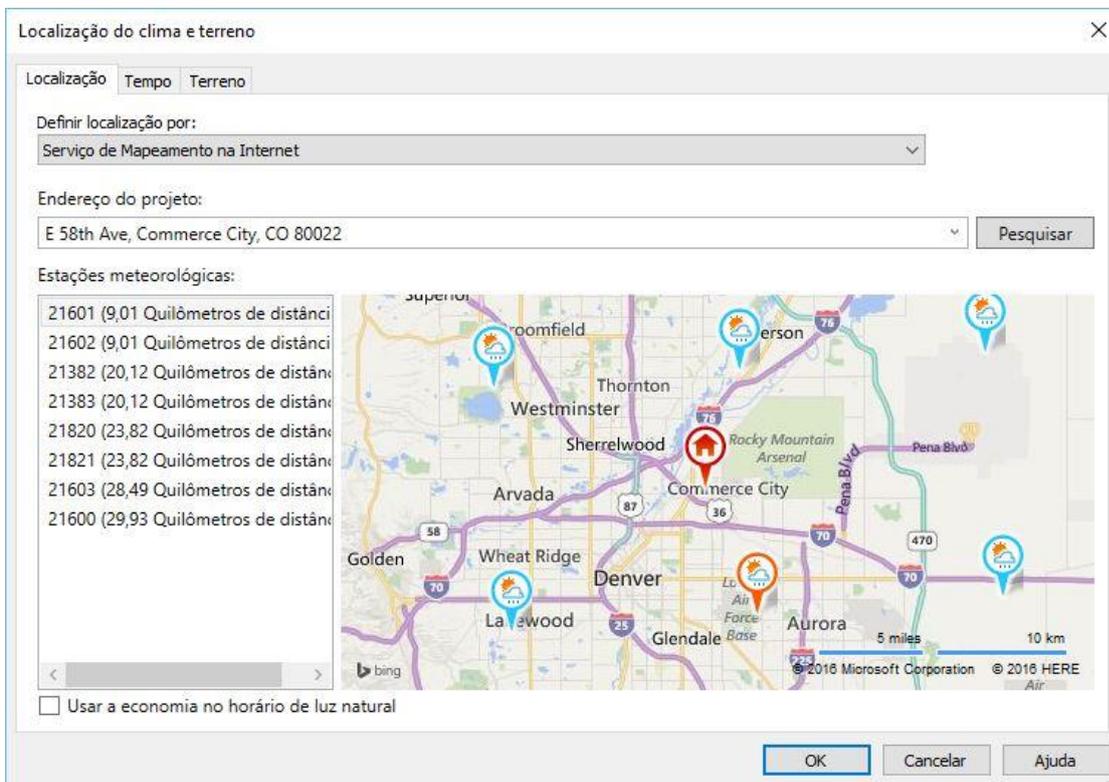
3.2.1 Case 600 – ASHRAE Standard 140

Nos três modelos produzidos para o Case 600, houve algumas configurações em comum, como a localização, o solo e os padrões de uso e ocupação da edificação.

Para a definição da localização geográfica da edificação, o Revit possui a opção de Serviço de Mapeamento na Internet, mais apropriada para análises energéticas, no qual são apresentadas estações climáticas virtuais do ano real e anuais típicas – arquivos climáticos *Typical Meteorological Year 2* (TMY2) e outros formatos – com base em médias de 30 anos de dados, disponíveis globalmente em intervalos de 12 km, normalmente obtidas de localizações de aeroportos (AUTODESK, 2016a).

Então foi inserida a localização da edificação definida pela norma ASHRAE Standard 140 – Colorado, EUA (ASHRAE, 2012) – e selecionada a estação climática mais próxima (Figura 18), que forneceu dados do ano de 2004 sobre o clima local – temperaturas, umidade, ventos, radiação solar e outros.

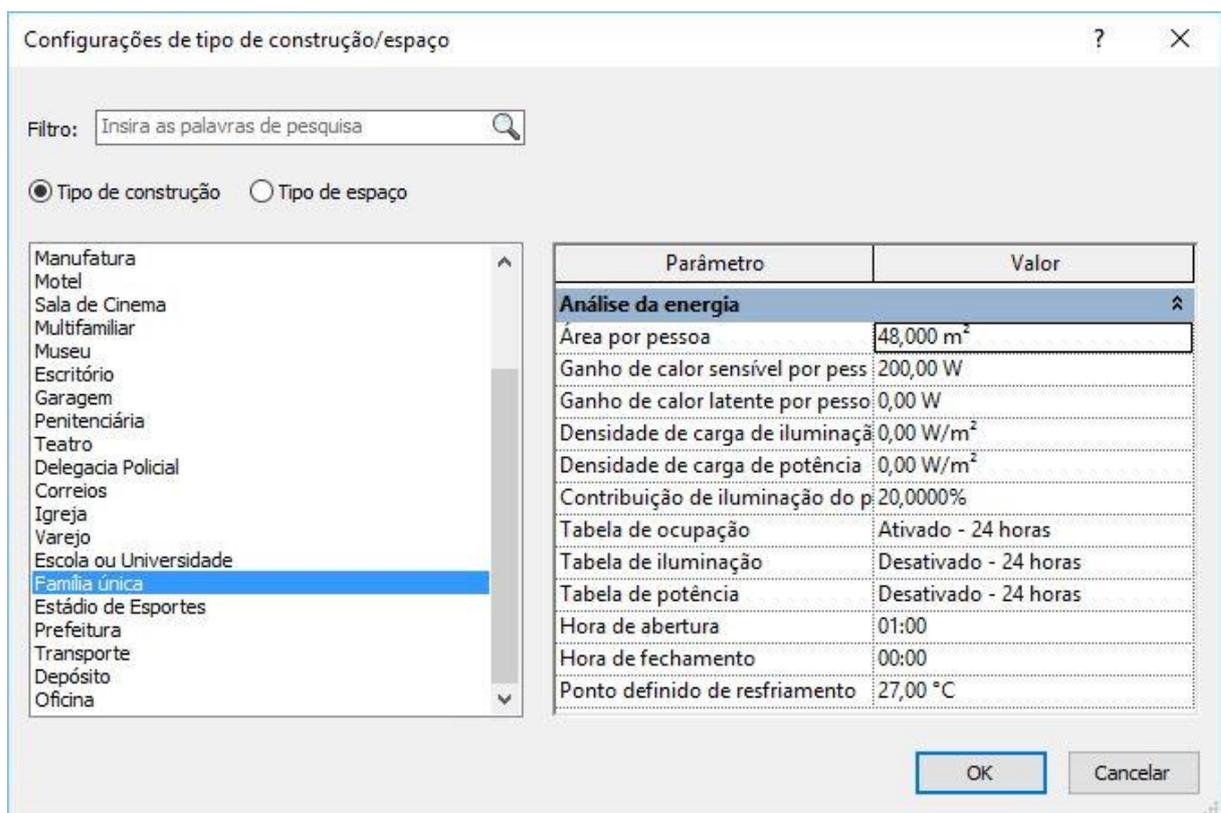
Figura 18 – Serviço de Mapeamento na Internet: pino vermelho representa a localização da edificação, em azul as estações climáticas disponíveis e em laranja a estação climática selecionada



Como a norma ASHRAE Standard 140 determina as características do solo do entorno da edificação, foi criada uma superfície topográfica com tais propriedades térmicas, juntamente com o modelo da edificação.

Quanto às configurações de ocupação e uso da edificação (Figura 19), no Revit foi estipulado o tipo de construção como habitação unifamiliar, uma vez que a norma não o especifica. A fim de obter uma definição para ganhos internos de calor semelhante à especificada pela norma, foram alterados a área por pessoa para 48 m², para representar um ocupante, o ganho de calor sensível para 200 W, a tabela de ocupação sem interrupções durante o ano inteiro (Ativado - 24 horas) e tornando nulas as cargas térmicas e regimes de iluminação e equipamentos – parâmetros Densidade de carga (0,00 W/m²) e Tabela (Desativado - 24 horas) para iluminação e potência.

Figura 19 – Padrões de uso e ocupação definidos no Revit para o Case 600



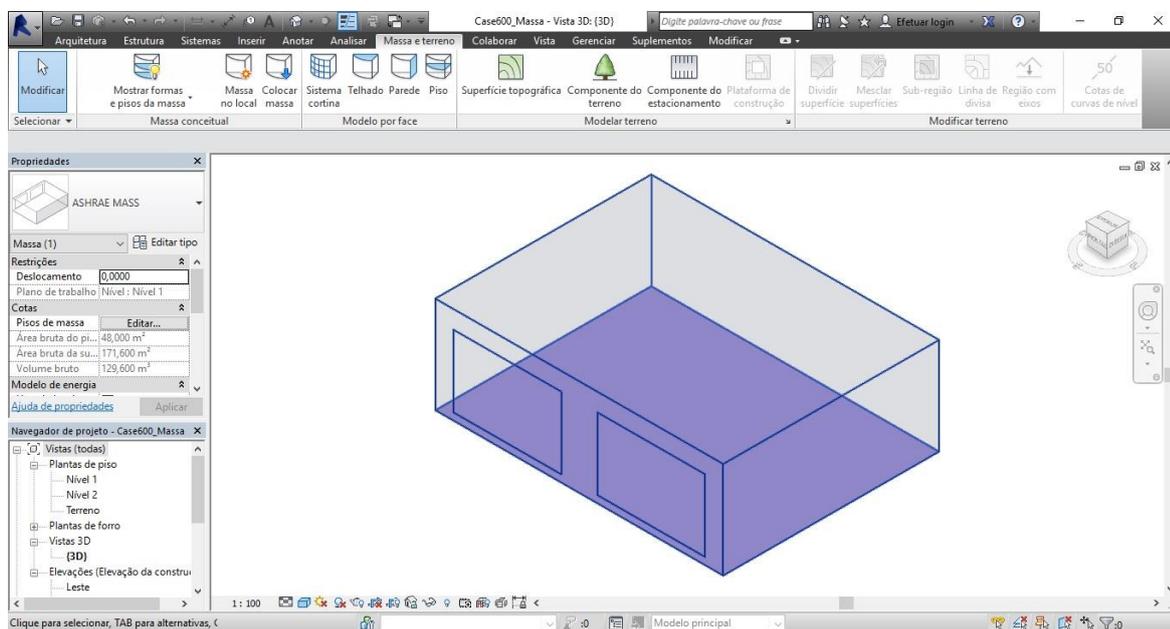
Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

As especificidades de cada tipo de modelo criado são apresentadas em seguida na sequência do trabalho, evidenciando as diferenças entre elas.

3.2.1.1 Modelo de massa conceitual do Case 600

Conforme já comentado anteriormente, o modelo de massa conceitual representa somente a volumetria da edificação. Dessa forma, a geometria modelada para o Case 600 é composta por formas simples cujas faces não possuem espessuras e materiais, como pode ser visualizada na Figura 20.

Figura 20 – Modelo de massa conceitual do Case 600

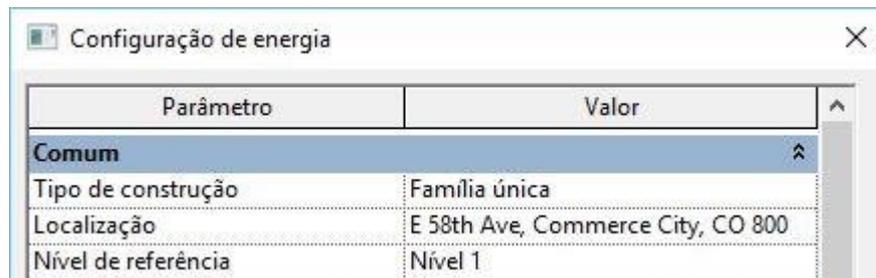


Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Destaca-se que para tornar possível exportar o modelo nos diferentes formatos de arquivos propostos na investigação, foi necessário executar a própria simulação energética do Revit para ser criado automaticamente um modelo analítico de energia. Para isso foram definidas as configurações de energia explicadas a seguir.

Na seção Comum da caixa de diálogo das configurações de energia (Figura 21) foram definidos os seguintes parâmetros: o tipo de construção para habitação unifamiliar, com os padrões de uso e ocupação já configurados (ver Figura 19, p. 85); a localização geográfica da edificação, com sua respectiva estação climática vinculada (ver Figura 18, p. 84); e o nível de referência como sendo o plano do terreno (Nível 1), que determina que as zonas abaixo deste nível sejam consideradas subterrâneas.

Figura 21 – Configurações comuns de energia para o Case 600



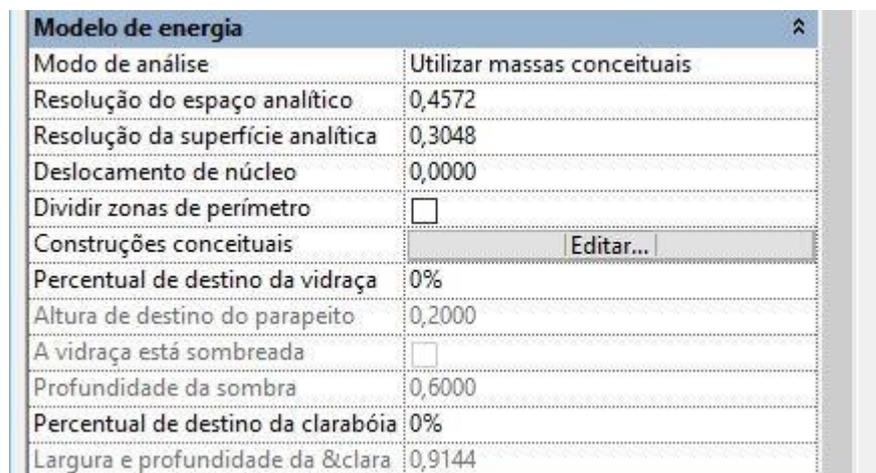
Parâmetro	Valor
Comum	
Tipo de construção	Família única
Localização	E 58th Ave, Commerce City, CO 800
Nível de referência	Nível 1

Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

As configurações da seção Modelo detalhado não afetam a análise energética do Revit para massas conceituais e, conseqüentemente, não interferem no modelo analítico de energia criado a partir dessas massas (AUTODESK, 2016a), portanto não serão apresentadas nesta seção.

O modelo de energia (Figura 22) foi configurado para que o modo de análise o criasse com base em massas conceituais. As resoluções de espaço e superfície analíticas foram mantidas com os valores padrões do Revit pois não interfeririam na criação do modelo analítico de energia. O percentual de vidraça foi alterado para 0% uma vez que a geometria foi modelada com a representação das janelas, não necessitando a criação automática dessas aberturas envidraçadas.

Figura 22 – Configurações do modelo de energia para a massa do Case 600



Parâmetro	Valor
Modo de análise	Utilizar massas conceituais
Resolução do espaço analítico	0,4572
Resolução da superfície analítica	0,3048
Deslocamento de núcleo	0,0000
Dividir zonas de perímetro	<input type="checkbox"/>
Construções conceituais	Editar...
Percentual de destino da vidraça	0%
Altura de destino do parapeito	0,2000
A vidraça está sombreada	<input type="checkbox"/>
Profundidade da sombra	0,6000
Percentual de destino da clarabóia	0%
Largura e profundidade da & clara	0,9144

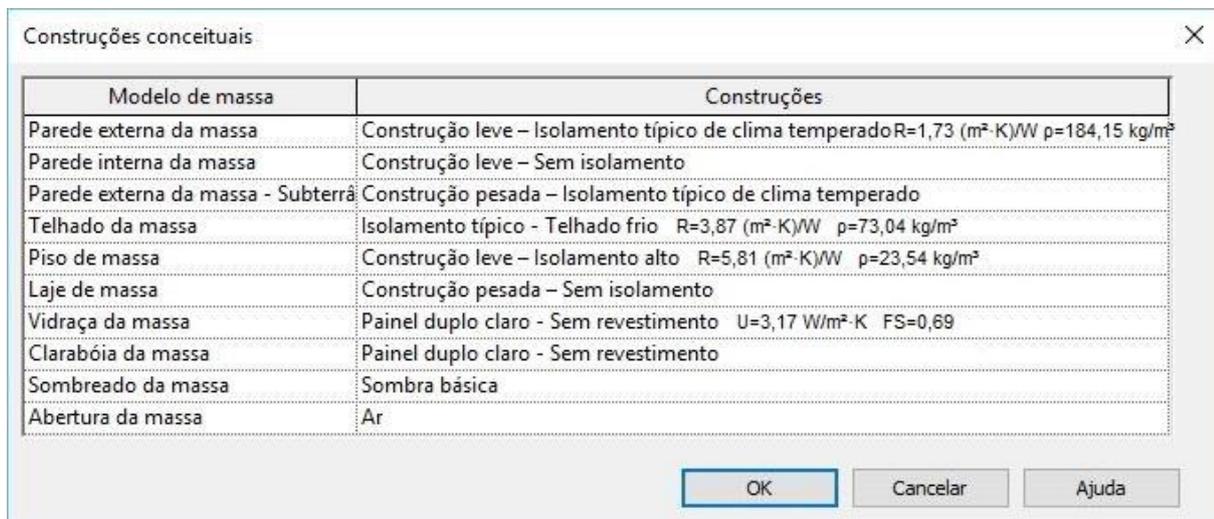
Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Ainda sobre as configurações do modelo de energia, os parâmetros Deslocamento de núcleo e Divisão de zonas de perímetro correspondem à função de zoneamento térmico, que aprimora a precisão das simulações. Essa função consiste em criar zonas térmicas centrais e zonas com exposição externa uma vez que as trocas de calor do núcleo de uma edificação diferem do perímetro, pois geralmente não é exposto diretamente às variações do clima externo (AUTODESK, 2016a).

O deslocamento de núcleo teve seu valor zerado e a divisão de zonas de perímetro foi desativada, conforme indicação do *site* de ajuda do Revit 2016 (AUTODESK, 2016a), para criar zonas térmicas personalizadas que refletem com mais precisão a intenção da edificação e para que o modelo seja corretamente exportado para o formato de arquivo gbXML.

No parâmetro Construções conceituais da Figura 22 foram associadas as opções de componentes de massa aos tipos de superfícies existentes no Case 600, como parede externa, telhado, piso e vidraça (Figura 23), de acordo com os valores equivalentes de resistência térmica de cada componente apresentados também no *site* do Revit (AUTODESK, 2016a). Os elementos inexistentes na geometria da edificação – por exemplo, paredes internas – não são associados a nenhuma construção conceitual do modelo de massa, apesar de serem mantidas as definições padrão do Revit por não ser possível eliminá-las na caixa de diálogo de configurações.

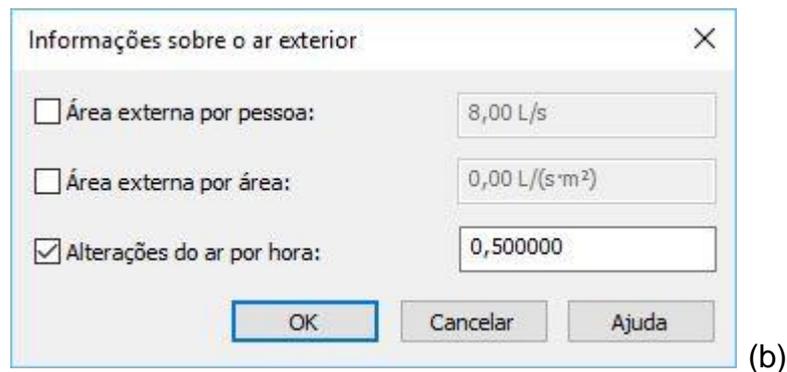
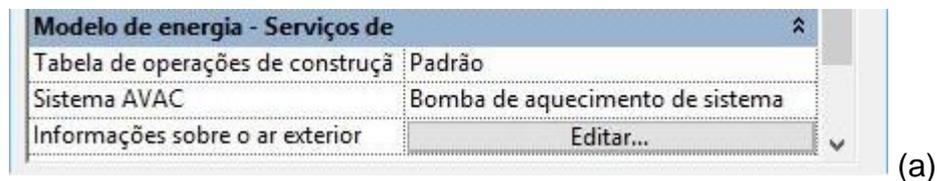
Figura 23 – Construções conceituais do modelo de massa do Case 600



Modelo de massa	Construções
Parede externa da massa	Construção leve – Isolamento típico de clima temperado $R=1,73 \text{ (m}^2\text{-K)/W}$ $\rho=184,15 \text{ kg/m}^3$
Parede interna da massa	Construção leve – Sem isolamento
Parede externa da massa - Subterrâ	Construção pesada – Isolamento típico de clima temperado
Telhado da massa	Isolamento típico - Telhado frio $R=3,87 \text{ (m}^2\text{-K)/W}$ $\rho=73,04 \text{ kg/m}^3$
Piso de massa	Construção leve – Isolamento alto $R=5,81 \text{ (m}^2\text{-K)/W}$ $\rho=23,54 \text{ kg/m}^3$
Laje de massa	Construção pesada – Sem isolamento
Vidraça da massa	Painel duplo claro - Sem revestimento $U=3,17 \text{ W/m}^2\text{-K}$ $FS=0,69$
Clarabóia da massa	Painel duplo claro - Sem revestimento
Sombreado da massa	Sombra básica
Abertura da massa	Ar

Por fim, quanto aos serviços de construção do modelo de energia (Figura 24), não foram configurados sistemas AVAC para as simulações no EnergyPlus, mas como não é possível eliminar este parâmetro no Revit, foi definido um sistema *Packaged Terminal Heat Pump* (PTHP) que simula aparelhos encontrados em habitações residenciais, como aparelhos de janela ou *splits* (CUNHA, 2015). E para o ar externo foi configurado 0,5 trocas de ar por hora, como determinado pela ASHRAE Standard 140.

Figura 24 – Configurações dos serviços de construção do modelo de energia (a) e das trocas de ar por hora (b) do Case 600

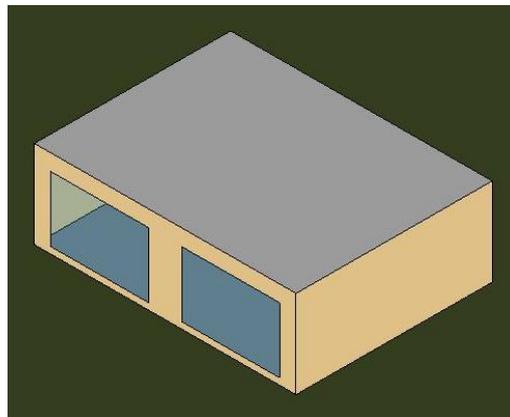


Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Para a execução da análise de energia no Revit, o programa detecta os componentes de massa no modelo e os utiliza para criar zonas e atribuir subcategorias de massa (pisos, paredes, coberturas, aberturas e elementos de sombreamento), compondo o modelo analítico de energia que reflete a intenção da edificação com suas respectivas configurações de energia (AUTODESK, 2016a).

A Figura 25 demonstra o resultado do modelo de energia gerado a partir de massas conceituais para o Case 600, que foi utilizado para a posterior exportação nos formatos de arquivos estabelecidos na pesquisa.

Figura 25 – Modelo analítico de energia do Case 600 a partir de massas conceituais

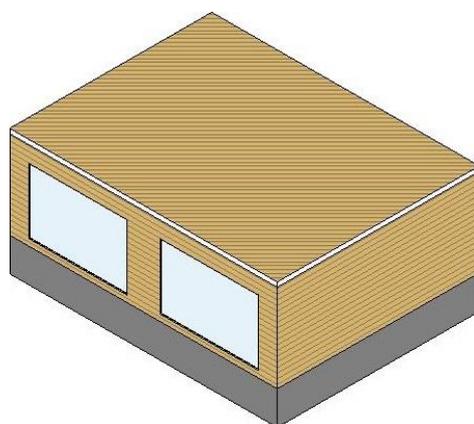


Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

3.2.1.2 Modelo de construção com ambientes do Case 600

Ao contrário das massas conceituais, a modelagem do Case 600 com elementos de construção foi produzida com componentes que representam a real situação da edificação, ou seja, com a aplicação de materiais e suas respectivas espessuras, como pode ser vista na Figura 26. A produção do modelo seguiu as orientações da norma ASHRAE Standard 140 (ASHRAE, 2012) de maneira que as espessuras da envoltória foram definidas para que o volume interno de ar permanecesse como o especificado em 129,6 m³.

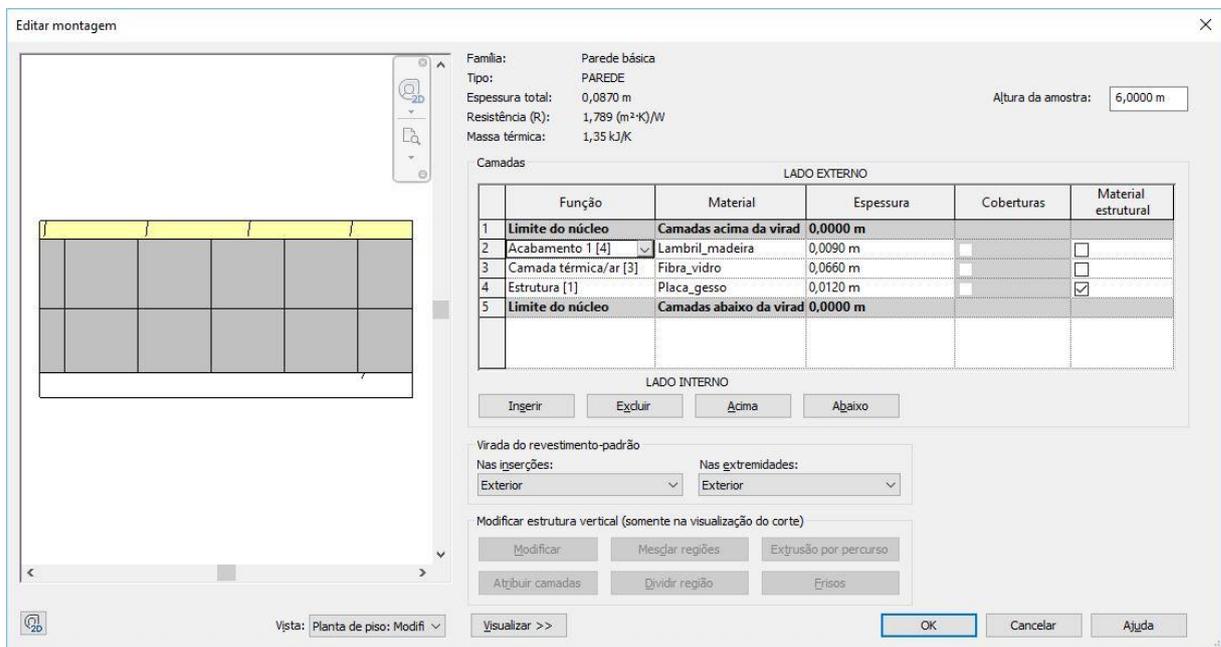
Figura 26 – Modelo de construção do Case 600



Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Os elementos de construção – piso, cobertura, paredes e janelas – foram compostos pelas camadas de materiais atribuídas pela norma da ASHRAE (ver Tabela 1, p. 72, e Tabela 2, p. 73). A Figura 27 mostra como exemplo a edição da parede do modelo com a ordem de camadas de materiais (do exterior ao interior) e suas espessuras.

Figura 27 – Exemplo de edição da parede do Case 600

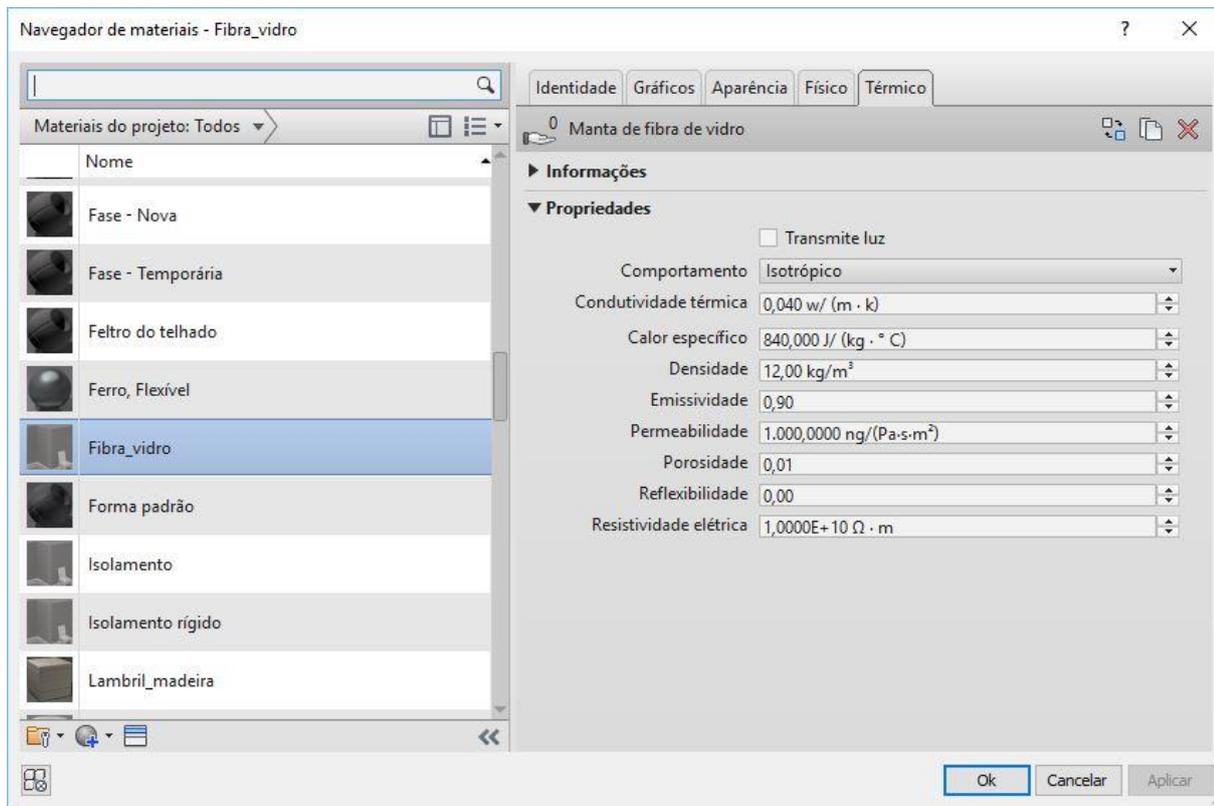


Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Cada material empregado também foi configurado quanto às suas propriedades térmicas, de acordo como foram definidas pela norma (ASHRAE, 2012). Por exemplo, a Figura 28 exhibe as características térmicas da manta de fibra de vidro empregada no interior das paredes do modelo, nas quais foram alterados os valores de condutividade térmica, calor específico e densidade.

A inserção de ambientes no modelo de construção do Revit, delimitados por elementos construtivos (paredes, pisos, forros, entre outros), implica em algumas diferenças nas configurações de energia que refletem no modelo analítico de energia criado quando comparado com o modelo de massas conceituais.

Figura 28 – Exemplo de edição das propriedades térmicas da manta de fibra de vidro



Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

As seções Comum e Serviços de construção da caixa de diálogo das configurações de energia mantiveram-se idênticas às definições empregadas para as massas conceituais (ver Figura 21, p. 87, e Figura 24, p. 89).

As configurações do modelo detalhado (Figura 29) efetuam o ajuste fino para a simulação energética executada pelo Revit utilizando elementos de construção (AUTODESK, 2016a). No parâmetro Exportar categoria foi selecionada a alternativa Ambientes para determinar como as propriedades térmicas dos materiais seriam definidas para o modelo analítico de energia; dessa forma, o parâmetro Incluir propriedades térmicas foi ativado para serem utilizados os valores especificados nas configurações de materiais (ver Figura 28).

Além disso, o *site* de ajuda do programa computacional Revit (AUTODESK, 2016a) indica que a exportação de categoria com ambientes determina que as cargas térmicas de uso e ocupação da edificação são definidas por configurações padrão do

tipo de construção oferecidas pela ferramenta complementar Green Building Studio. No caso para habitação unifamiliar, os valores padrão são: 4,63 W/m² para a densidade da carga de equipamentos, 4,84 W/m² para densidade de carga de iluminação e 0,5 trocas de ar por hora.

Figura 29 – Configurações do modelo detalhado com ambientes para o Case 600

Modelo detalhado	
Exportar categoria	Ambientes
Exportar complexidade	Simple
Incluir propriedades térmicas	<input checked="" type="checkbox"/>
Fase do projeto	Construção nova
Tolerância de espaço estreito	0,0000 m
Ambiente de construção	Identificar elementos externos
Tamanho da célula da grade analít	0,9144 m

Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

O parâmetro de complexidade da exportação especifica o nível de detalhe fornecido para as aberturas do modelo (AUTODESK, 2016a); neste caso foi selecionada a complexidade simples, na qual as esquadrias são exportadas como um único elemento – sem caixilhos –, para se assemelhar ao processo de modelagem no EnergyPlus.

Para o parâmetro Ambiente de construção foi escolhida a opção Identificar elementos externos para garantir a correta determinação das zonas térmicas do modelo virtual, pois este método combina a projeção de raios e algoritmos de preenchimento para identificar os ambientes e os elementos de construção expostos ao ambiente externo. Com isso as superfícies analíticas originadas para o modelo de energia são classificadas como externas ou de sombreamento (AUTODESK, 2016a). Os outros parâmetros desta seção de configurações foram mantidos com os valores padrão do Revit.

Nas configurações do modelo de energia (Figura 30), como foi selecionado para utilizar elementos de construção no modo de análise, não houve a necessidade de definir outros parâmetros. Da mesma maneira como foi ativada a inclusão de

propriedades térmicas nas configurações do modelo detalhado, não foram utilizados os valores padronizados de construções conceituais (ver Figura 23, p. 88).

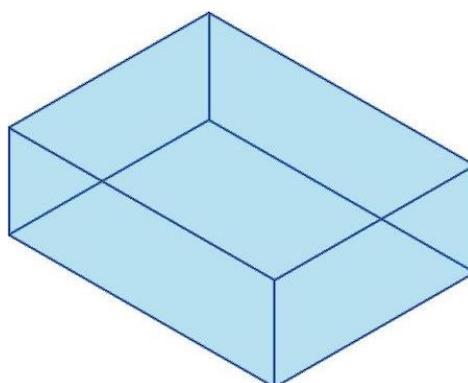
Figura 30 – Configurações do modelo de energia com ambientes do Case 600

Modelo de energia	
Modo de análise	Utilizar elementos de construção
Resolução do espaço analítico	0,4572 m
Resolução da superfície analítica	0,3048 m
Deslocamento de núcleo	3,6000 m
Dividir zonas de perímetro	<input checked="" type="checkbox"/>
Construções conceituais	Editar...
Percentual de destino da vidraça	40%
Altura de destino do parapeito	0,7500 m
A vidraça está sombreada	<input type="checkbox"/>
Profundidade da sombra	0,6000 m
Percentual de destino da clarabóia	0%
Largura e profundidade da & clara	0,9144 m

Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

A criação do modelo analítico de energia a partir de elementos de construção gera espaços e superfícies analíticas que refletem a edificação. Os espaços analíticos representam as zonas térmicas da geometria do Case 600 (Figura 31).

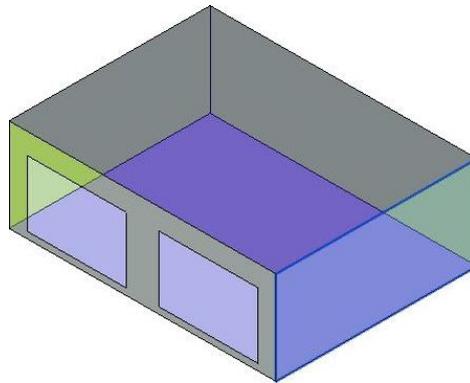
Figura 31 – Espaço analítico do modelo de energia do Case 600



Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Por sua vez, a Figura 32 apresenta as superfícies analíticas geradas automaticamente que simulam os elementos construtivos da edificação.

Figura 32 – Superfícies analíticas do modelo de energia do Case 600



Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

3.2.1.3 Modelo de construção com espaços do Case 600

Nesta parte do estudo foi utilizado o mesmo modelo de construção criado na seção anterior (ver Figura 26, p. 90); a diferença foi a inserção de espaços, em vez de ambientes, demonstrado na planta baixa da edificação de teste Case 600 (Figura 33). Entretanto esta alteração reflete em mudanças nas configurações do modelo analítico de energia que é gerado automaticamente.

Figura 33 – Espaço inserido no modelo do Case 600



Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Os espaços possuem maior controle sobre os padrões de seu uso e ocupação do que os ambientes, como as opções mostradas na Figura 34, podendo ser inseridos

e configurados individualmente para os diferentes recintos da edificação de acordo com sua realidade, levando em consideração todo o volume dentro do modelo. Os parâmetros de interesse para a pesquisa serão comentados a seguir no texto.

Figura 34 – Configurações de espaço no Revit para o Case 600

Análise da energia	
Zona	Padrão
Plenum	<input type="checkbox"/>
Ocupação	<input checked="" type="checkbox"/>
Tipo de condição	Aquecido e resfriado
Tipo de espaço	<Construção>
Tipo de construção	Construção 1
Pessoas	Editar...
Cargas elétricas	Editar...
Carga calculada de a...	Não calculado
Carga de aquecimen...	0,00 W
Carga calculada de r...	Não calculado
Carga de resfriament...	0,00 W

Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Para o parâmetro Tipo de espaço, como a edificação do Case 600 possui somente uma zona térmica e consequentemente um elemento de espaço, foram definidas as mesmas configurações utilizadas para o tipo de construção e estipuladas pela ASHRAE Standard 140 (Figura 35 e ver Figura 19, p. 85).

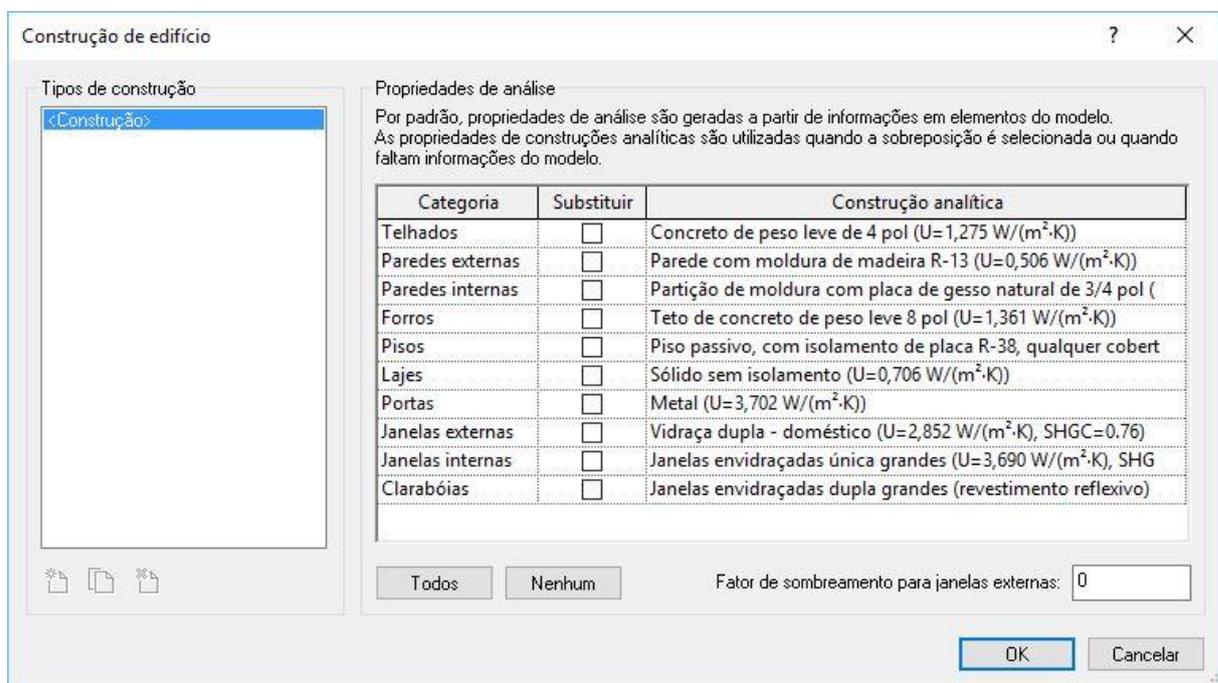
Figura 35 – Configurações de tipo de espaço para o Case 600

Parâmetro	Valor
Análise da energia	
Área por pessoa	48,000 m ²
Ganho de calor sensível por pess	200,00 W
Ganho de calor latente por pesso	0,00 W
Densidade de carga de iluminação	0,00 W/m ²
Densidade de carga de potência	0,00 W/m ²
Contribuição de iluminação do p	20,0000%
Tabela de ocupação	Ativado - 24 horas
Tabela de iluminação	Desativado - 24 horas
Tabela de potência	Desativado - 24 horas

Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Por padrão, os espaços utilizam as propriedades térmicas dos materiais atribuídos às camadas dos elementos de construção do Revit (AUTODESK, 2016a), como o exemplo da Figura 28, p. 92. Portanto, nas configurações das propriedades de tipo de construção dos espaços (Figura 36) foram desmarcadas as caixas de seleção Substituir para continuar sendo utilizadas as características dos materiais inseridos nos elementos do modelo.

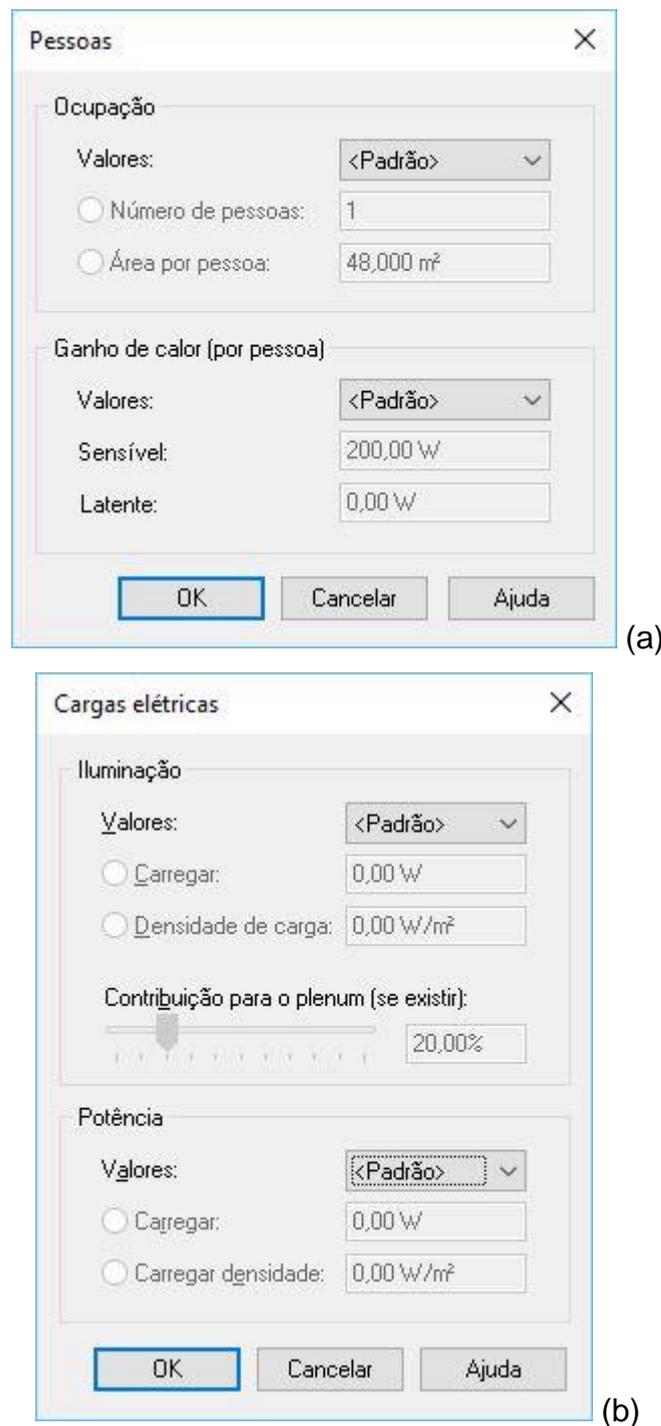
Figura 36 – Propriedades de tipo de construção para espaços



Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Quando há mais de um espaço inserido no modelo de construção, é possível determinar diferentes opções de ocupação e uso para cada um. No caso aqui descrito, como há um único espaço, foram utilizados os valores padrões definidos nas configurações do tipo de espaço da Figura 35; ou seja, ocupação de uma pessoa com ganho de calor sensível de 200 W (Figura 37-a) e cargas elétricas de iluminação e equipamentos (Figura 37-b) com valores nulos para corresponder ao que foi definido na edificação pela norma da ASHRAE.

Figura 37 – Definições de (a) ocupação e (b) uso para o espaço do Case 600



Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Quanto às configurações de energia para o modelo analítico, a única mudança com relação ao modelo de construção que contém ambientes, descrito anteriormente, encontra-se em alguns parâmetros da seção Modelo detalhado (Figura 38). A seleção

da exportação de categoria com espaços habilita novos parâmetros, sendo relevante o de Construção de edifício que, de maneira semelhante às construções conceituais do modelo de massa (ver Figura 23, p. 88), foi determinado conforme as definições das propriedades de tipo de construção para o espaço existente (ver Figura 36, p. 97). O parâmetro Serviço de construção não é utilizado para a análise de energia, segundo o *site* de ajuda do Revit (AUTODESK, 2016a).

Figura 38 – Configurações do modelo detalhado com espaços para o Case 600

Modelo detalhado	
Exportar categoria	Espaços
Exportar complexidade	Simple
Fase do projeto	Construção nova
Tolerância de espaço estreito	0,0000 m
Ambiente de construção	Identificar elementos externos
Tamanho da célula da grade analít	0,9144 m
Serviço de construção	VAV - Duto único
Construção de edifício	<Construção>
Classe de infiltração de construção	Nenhum
Exportar valores padrão	<input checked="" type="checkbox"/>
Tipo de relatório	Detalhado

Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Ao final do processo, a geometria do modelo analítico de energia criado foi idêntica ao que foi gerado a partir do modelo de construção com ambientes, com os mesmos espaços e superfícies analíticos (ver Figura 31, p. 94, e Figura 32, p. 95).

3.2.2 Projeto Casa Eficiente

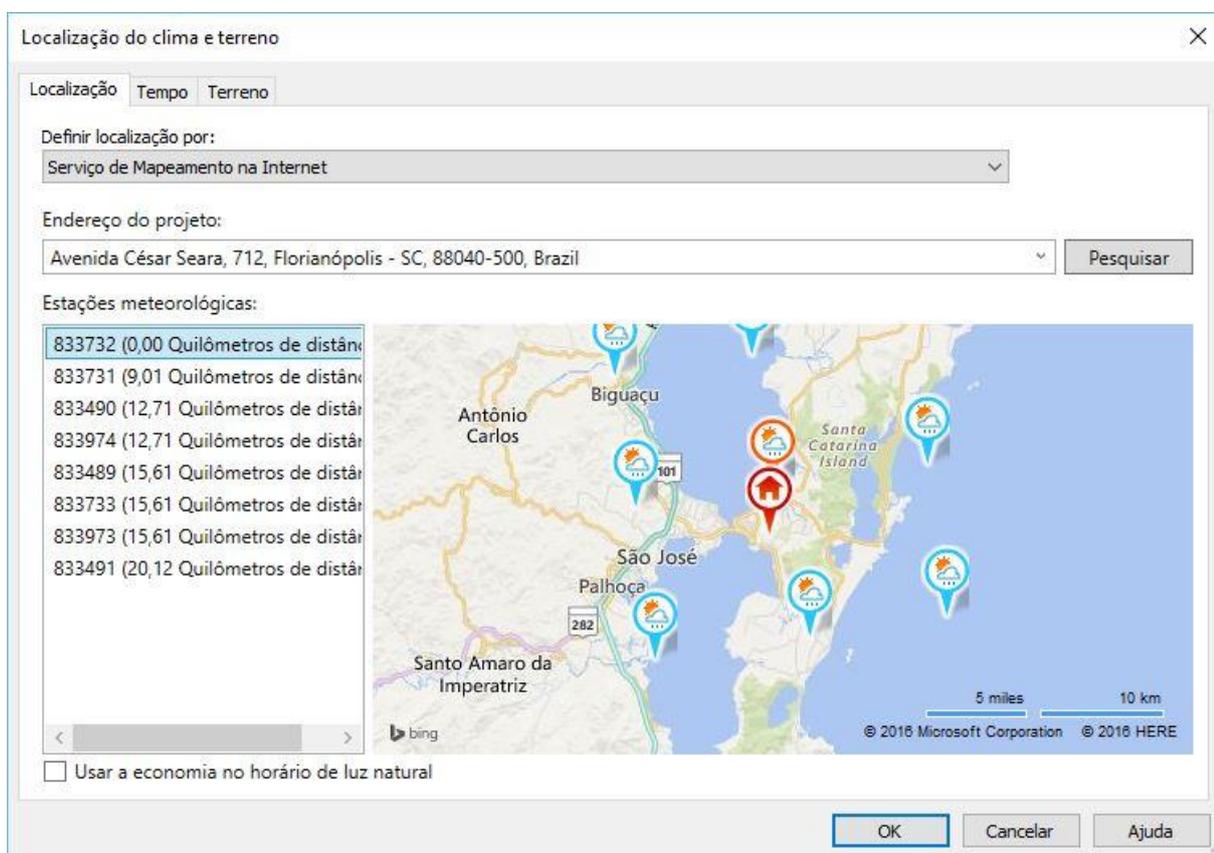
Para evitar de tornar um texto repetitivo e cansativo na dissertação, como as opções de modelagem do Projeto Casa Eficiente no programa Autodesk Revit 2016 foram similares ao Case 600 da ASHRAE Standard 140-2011, ressaltando as especificidades de cada edificação, serão apontados somente os parâmetros que tiveram diferença à edificação anterior.

Os três modelos produzidos para a Casa Eficiente (massa conceitual e elementos de construção com ambientes e com espaços) apresentaram algumas

configurações em comum: localização, solo e características de ocupação e uso da edificação.

Através do Serviço de Mapeamento na Internet do Revit, foi definida a localização geográfica da edificação na cidade de Florianópolis-SC e selecionada a estação climática mais próxima (Figura 39), a qual supõe ser a mesma que foi instalada na Casa Eficiente e forneceu dados sobre o clima local do ano de 2006.

Figura 39 – Definição da localização e da estação climática da Casa Eficiente por meio do Serviço de Mapeamento na Internet

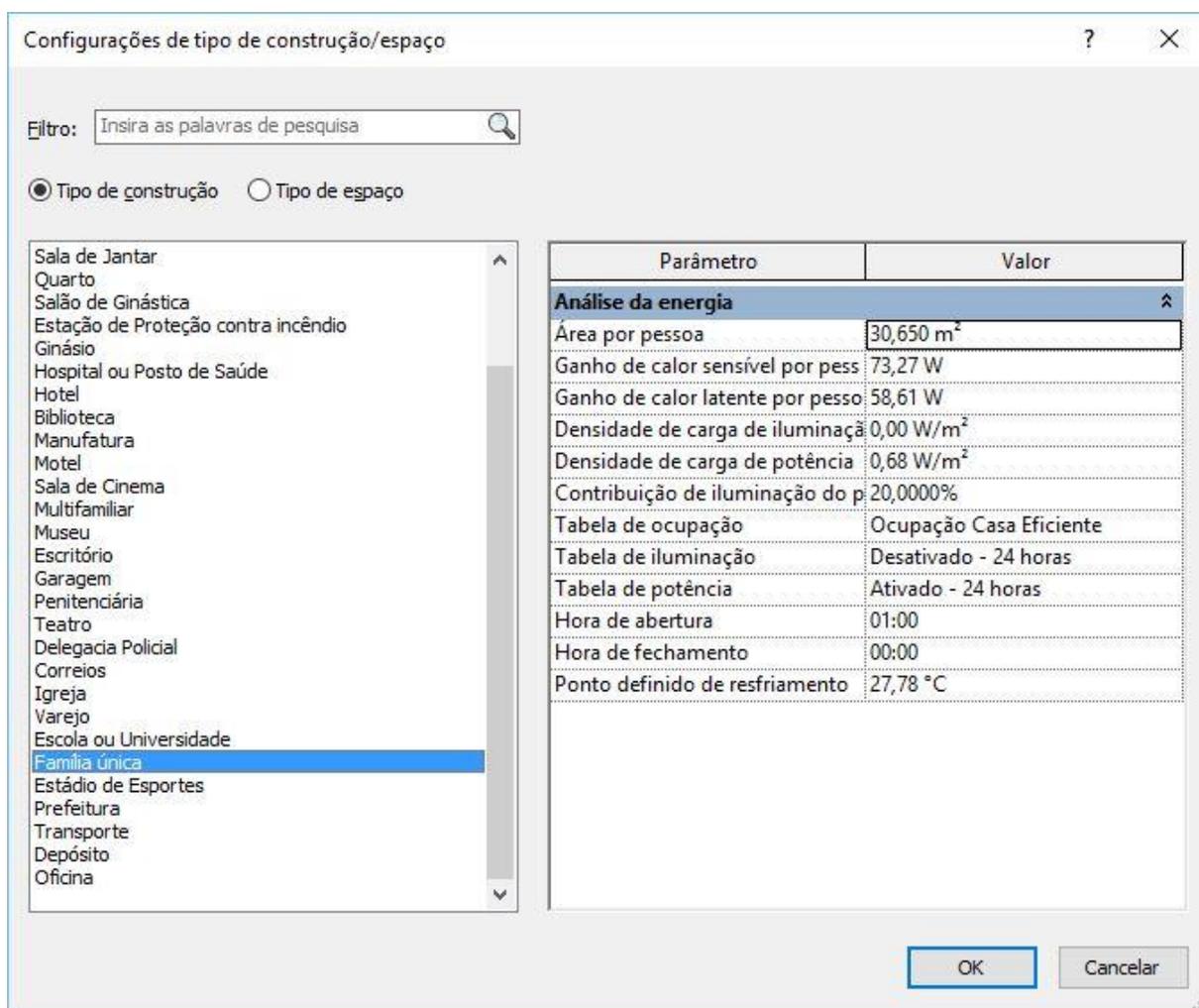


Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Em todos os modelos da Casa Eficiente foram criadas superfícies topográficas planas com os valores padrões fornecidos pelo programa Revit para as propriedades térmicas do solo, no intuito de averiguar a presença deste elemento no formato de arquivo do EnergyPlus após o processo de exportação das geometrias.

Quanto às configurações de uso e ocupação (Figura 40), no Revit foi especificado o tipo de construção como habitação unifamiliar – opção Família única.

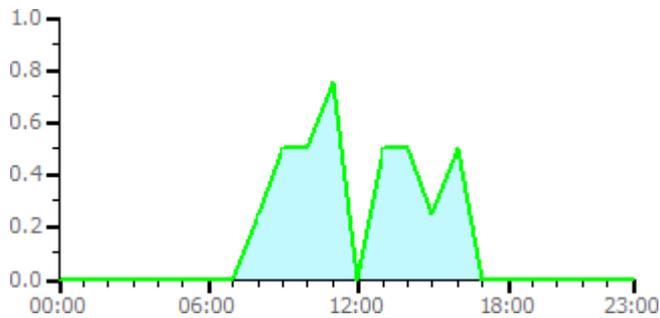
Figura 40 – Padrões de uso e ocupação definidos no Revit para a Casa Eficiente



Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Nestas configurações de tipo de construção, os parâmetros foram adequados para se equivaler com o modelo de referência da Casa Eficiente produzido para o EnergyPlus. A área por pessoa foi alterada para 30,65 m² para representar os quatro ocupantes da casa e foi criada uma Tabela de ocupação análoga ao regime definido para o dia 7 de janeiro de 2008 (Gráfico 2 e ver Gráfico 1, p. 81), sendo mantidos os valores padrões do Revit para os ganhos de calor por pessoa. Foram anuladas a densidade de carga e tabela de iluminação, pois no modelo do EnergyPlus não foram incluídos ganhos de calor pela iluminação. A densidade de carga e tabela de potência foram modificadas para simular os equipamentos elétricos definidos no modelo de referência (geladeira e computador ligados 24 horas por dia).

Gráfico 2 – Tabela de ocupação da Casa Eficiente configurada no Revit

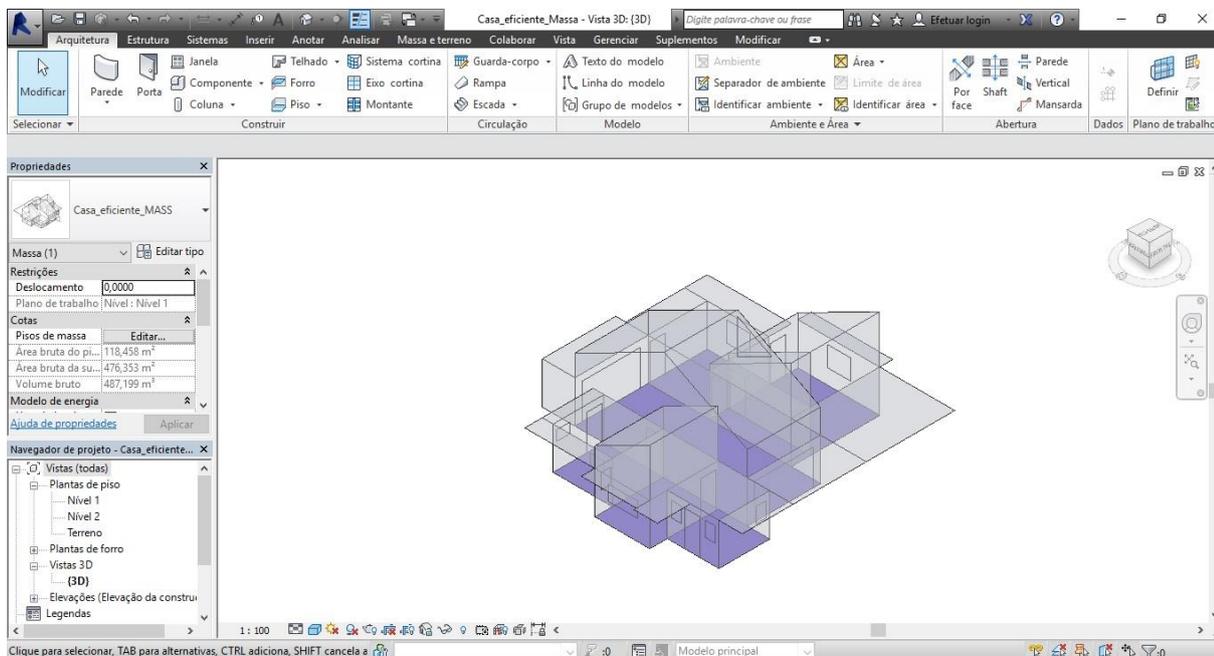


Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

3.2.2.1 Modelo de massas conceituais da Casa Eficiente

O modelo de massa conceitual da Casa Eficiente é representado pela geometria simplificada da edificação com suas respectivas zonas térmicas, portas, janelas e elementos de sombreamento, como pode ser visualizado na Figura 41.

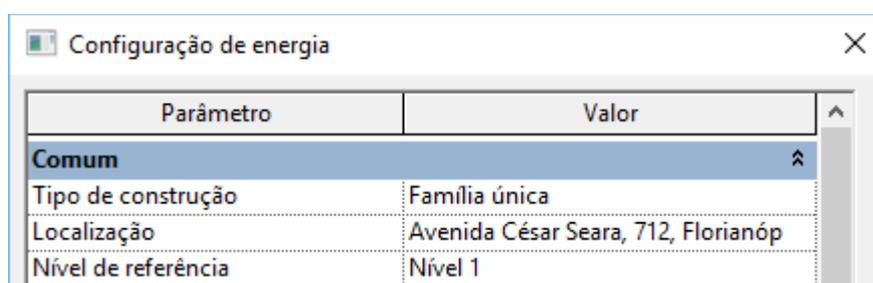
Figura 41 – Modelo de massa conceitual da Casa Eficiente



Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Com relação às configurações de energia definidas na simulação energética do Revit para criar automaticamente o modelo analítico de energia da Casa Eficiente, que foi exportado nos diferentes formatos de arquivos definidos, na seção Comum da caixa de diálogo (Figura 42) o único parâmetro que difere ao Case 600 foi a localização geográfica com o endereço da edificação (ver Figura 39, p. 100); o tipo de construção para família única (ver Figura 40, p. 101) e o nível de referência para o plano do solo mantiveram-se similares.

Figura 42 – Configurações comuns de energia para a Casa Eficiente



Parâmetro	Valor
Comum	
Tipo de construção	Família única
Localização	Avenida César Seara, 712, Florianóp
Nível de referência	Nível 1

Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

As configurações da seção do Modelo detalhado também não foram utilizadas para massas conceituais da Casa Eficiente, assim como no Case 600, pois não interferem na análise energética do Revit e no modelo analítico de energia criado.

Do mesmo modo, as configurações do Modelo de energia foram exatamente iguais às definidas para o Case 600 (ver Figura 22, p. 87); a única disparidade refere-se ao parâmetro de construções conceituais (Figura 43), no qual foram associadas as opções oferecidas de elementos de massa, com suas respectivas resistências térmicas totais, aos componentes construtivos existentes na Casa Eficiente.

Quanto à seção Serviços de construção do modelo de energia também foram utilizadas as mesmas configurações do Case 600 (ver Figura 24-a, p. 89), com a diferença que não foram configuradas trocas de ar por hora uma vez que a simulação para a casa foi definida sem ventilação natural (portas e janelas externas fechadas).

Figura 43 – Construções conceituais do modelo de massa da Casa Eficiente

Modelo de massa	Construções
Parede externa da massa	Construção leve – Isolamento baixo $R=1,38 (m^2 \cdot K)/W$ $\rho=301,46 \text{ kg}/m^3$
Parede interna da massa	Construção leve – Sem isolamento $R=0,49 (m^2 \cdot K)/W$ $\rho=455,55 \text{ kg}/m^3$
Parede externa da massa - Subterrânea	Construção pesada – Isolamento típico de clima temperado
Telhado da massa	Isolamento baixo - Telhado frio $R=2,11 (m^2 \cdot K)/W$ $\rho=101,56 \text{ kg}/m^3$
Piso de massa	Construção leve – Sem isolamento $R=0,74 (m^2 \cdot K)/W$ $\rho=156,51 \text{ kg}/m^3$
Laje de massa	Construção pesada – Sem isolamento $R=1,08 (m^2 \cdot K)/W$ $\rho=602,93 \text{ kg}/m^3$
Vidraça da massa	Painel duplo claro - Sem revestimento $U=0,56 \text{ W}/m^2 \cdot K$ $FS=0,69$
Clarabóia da massa	Painel duplo claro - Sem revestimento
Sombreado da massa	Sombra básica
Abertura da massa	Ar

Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

A Figura 44 apresenta o resultado do modelo analítico de energia gerado automaticamente a partir das massas conceituais para a Casa Eficiente.

Figura 44 – Modelo analítico de energia da Casa Eficiente a partir de massas conceituais

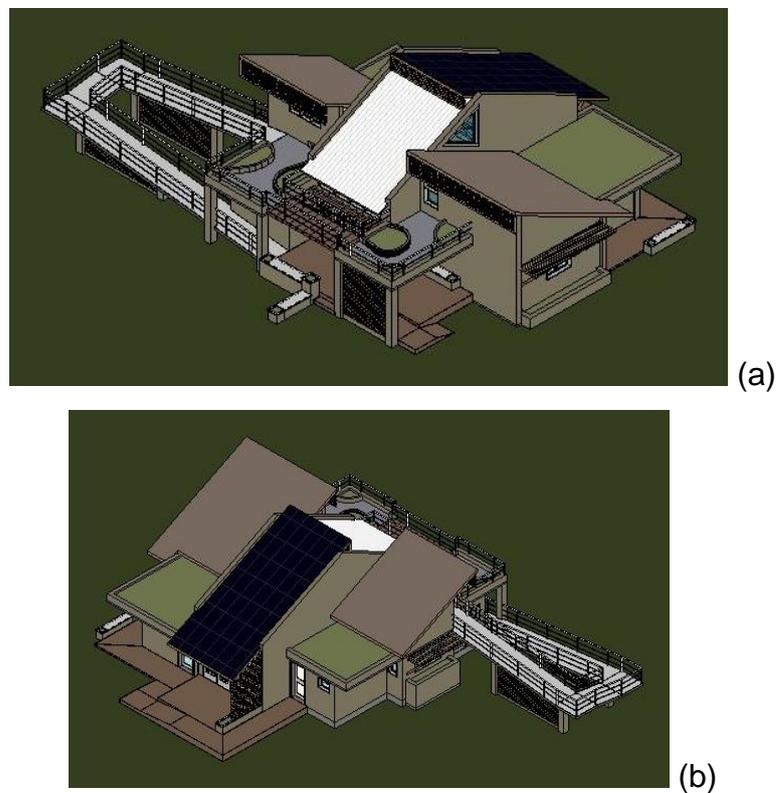


Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

3.2.2.2 Modelo de construção com ambientes da Casa Eficiente

O processo de modelagem da Casa Eficiente com elementos de construção seguiu o projeto arquitetônico da edificação, produzido com os diferentes componentes construtivos presentes, a aplicação de materiais e respectivas espessuras que aproximam o modelo digital com a realidade da casa (Figura 45).

Figura 45 – Modelo de construção da Casa Eficiente: fachadas (a) leste e sul e (b) oeste e norte

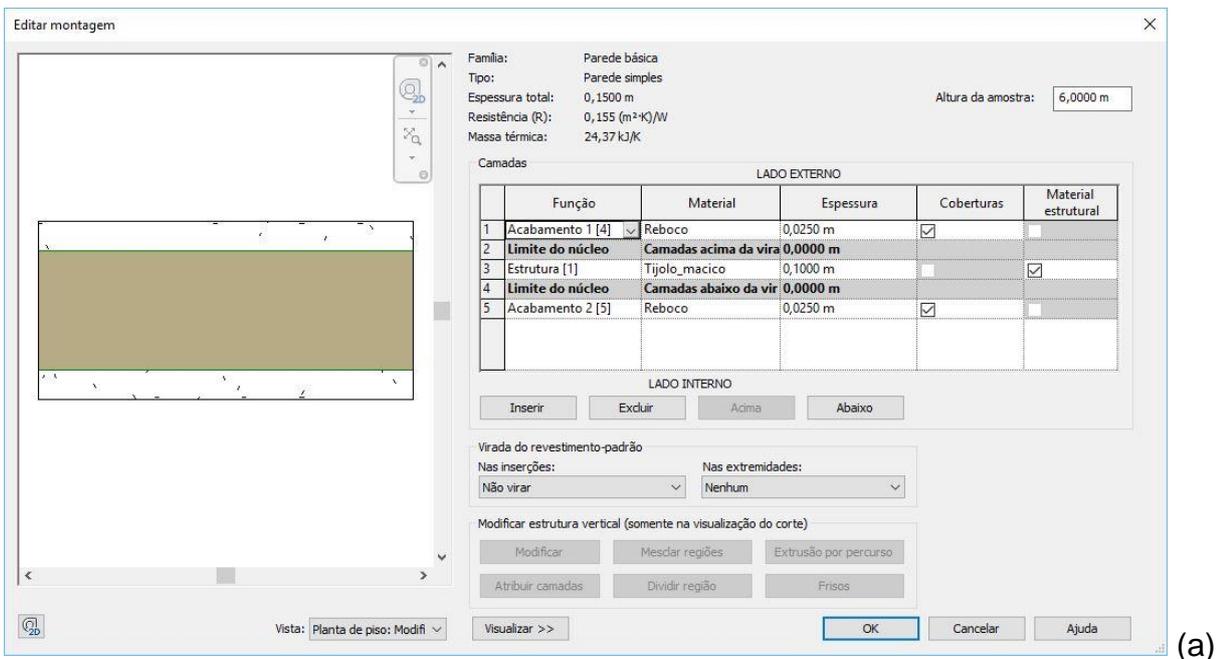


Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

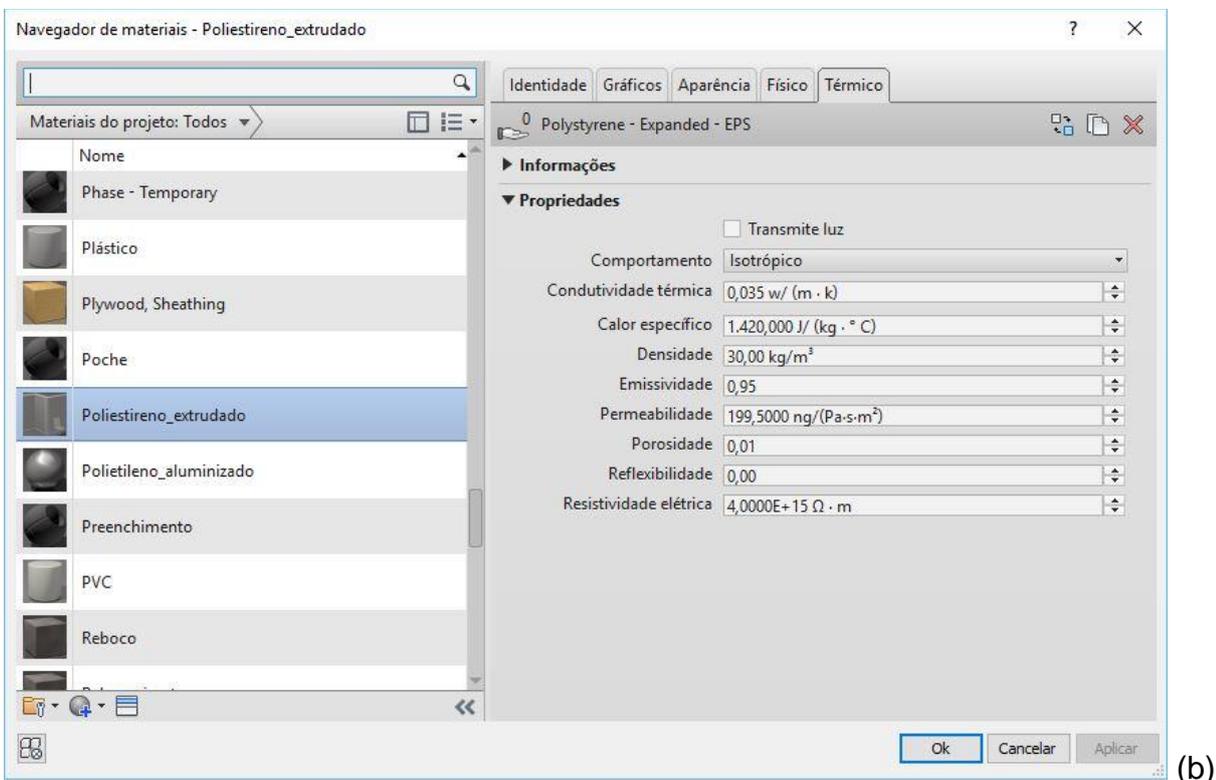
Cada elemento de construção foi composto pelas camadas de materiais utilizadas na edificação, com suas referentes espessuras e propriedades térmicas (ver Figura 13, p. 77, Figura 14, p. 78, Figura 15, p. 78, e Tabela 3, p. 79). Os componentes construtivos que não foram utilizados no modelo de referência do EnergyPlus, como os pisos cerâmicos internos, os guarda-corpos, as rampas e decks externos etc., foram excluídos a fim de assemelhar o modelo de construção do Revit com o do

EnergyPlus. A Figura 46 exibe como exemplo a edição da parede simples e do poliestireno extrudado empregado no telhado jardim do modelo.

Figura 46 – Exemplo de edição da (a) parede simples da Casa Eficiente e das (b) propriedades térmicas do poliestireno extrudado



(a)



(b)

Pela inserção de ambientes no modelo de construção da Casa Eficiente no Revit, as configurações de energia para a criação automática do modelo analítico de energia da casa foram praticamente as mesmas empregadas no Case 600, portanto recomenda-se ver a subseção 3.2.1.2, p. 90.

A única alteração ocorreu no parâmetro de complexidade da exportação nas configurações de energia do modelo detalhado (Figura 47), no qual foi selecionada a opção de complexidade simples com superfícies sombreadas, uma vez que o modelo digital da edificação possui superfícies de sombreamento que devem ser exportadas.

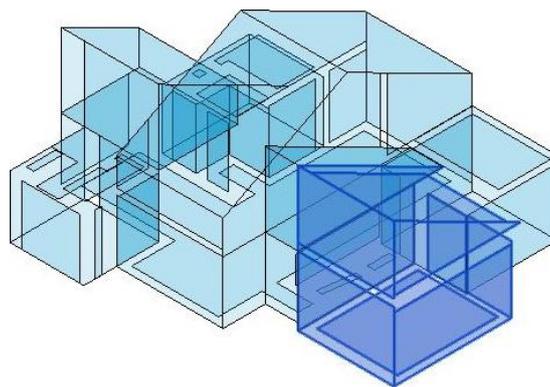
Figura 47 – Configurações do modelo detalhado com ambientes para a Casa Eficiente

Modelo detalhado	
Exportar categoria	Ambientes
Exportar complexidade	Simple com superficies sombread
Incluir propriedades térmicas	<input checked="" type="checkbox"/>
Fase do projeto	New Construction
Tolerância de espaço estreito	0,0000 m
Ambiente de construção	Identificar elementos externos
Tamanho da célula da grade analít	0,9144 m

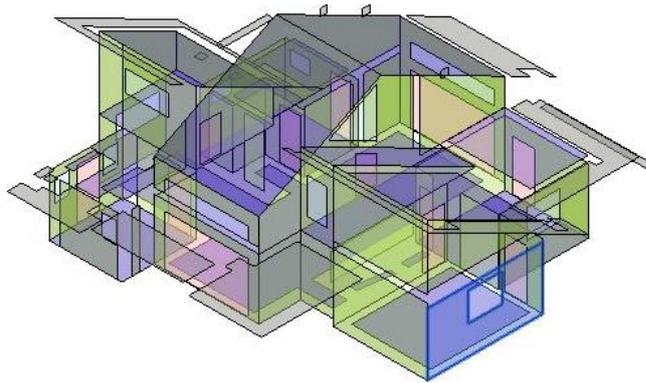
Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

A Figura 48 apresenta os espaços e superfícies analíticas gerados pela criação automática do modelo de energia a partir de elementos de construção da Casa Eficiente.

Figura 48 – (a) Espaços e (b) superfícies analíticas do modelo de energia da Casa Eficiente a partir de elementos de construção, em destaque o quarto de casal



(a)



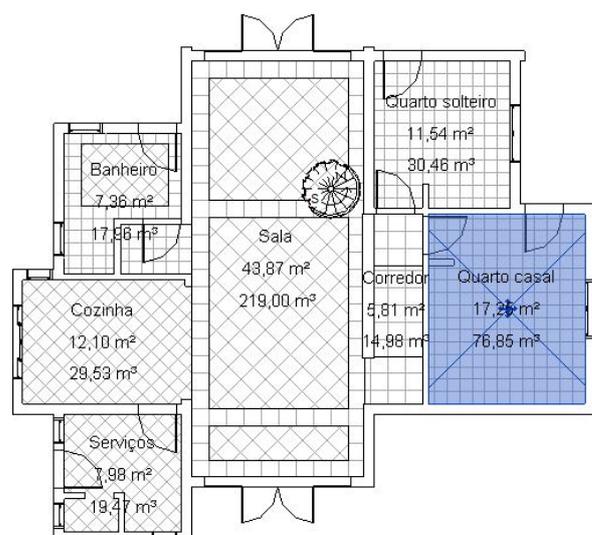
(b)

Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

3.2.2.3 Modelo de construção com espaços da Casa Eficiente

Para cada cômodo da Casa Eficiente foi inserido um elemento de espaço que utilizou como base o mesmo modelo de construção criado na seção anterior (ver Figura 45, p.105), demonstrado na Figura 49 como o exemplo do quarto de casal em destaque na planta baixa da edificação. Tal processo de inserção de espaços possibilitou a configuração exclusiva de uso e ocupação para cada cômodo de acordo com os dias de monitoramento utilizados no modelo de referência do EnergyPlus.

Figura 49 – Exemplo de espaço inserido para o quarto de casal no modelo da Casa Eficiente



Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Como a casa possui diferentes zonas térmicas, em cada espaço inserido foi definido o seu tipo dentre as alternativas oferecidas no Revit, como o caso do quarto de casal no qual foi selecionada a opção Quarto de dormir (Figura 50). É através das opções contidas neste parâmetro Tipo de espaço que é possível configurar as cargas e regimes de ocupação e uso para cada cômodo. Enquanto que o parâmetro Tipo de construção dos espaços inseridos na Casa Eficiente seguiu o mesmo processo utilizado no Case 600 (ver Figura 36, p. 97).

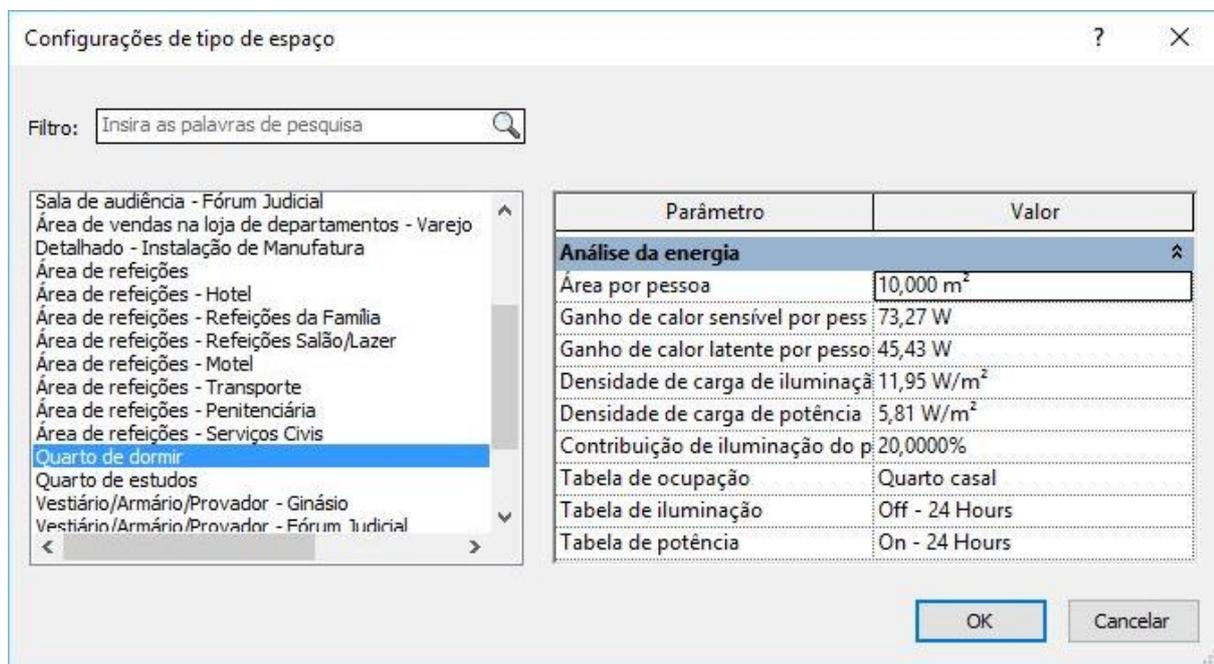
Figura 50 – Exemplo de configurações de espaço no Revit para o quarto de casal da Casa Eficiente

Análise da energia	
Zona	Padrão
Plenum	<input type="checkbox"/>
Ocupação	<input checked="" type="checkbox"/>
Tipo de condição	Aquecido e resfriado
Tipo de espaço	Quarto de dormir
Tipo de construção	<Construção>
Pessoas	Editar...
Cargas elétricas	Editar...
Carga calculada de a...	Não calculado
Carga de aquecimen...	0,00 W
Carga calculada de r...	Não calculado
Carga de resfriament...	0,00 W

Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Nas configurações de cada tipo de espaço há valores padrões pré-existent que calculam a quantidade de ocupantes e as cargas térmicas de pessoas, iluminação e equipamentos, além dos regimes (*schedules*) de uso e ocupação do espaço (Figura 51). No entanto, tais valores podem ser alterados nesta própria caixa de diálogo das configurações de tipo de espaço, estabelecendo um padrão em comum para vários espaços de um mesmo tipo em uma edificação – por exemplo quando há vários quartos em uma habitação com os mesmos padrões de uso e ocupação –, ou especificados nos parâmetros Pessoas e Cargas elétricas da Figura 50 acima, para configurar individualmente um espaço diferente do padrão de seu tipo – por exemplo quando um único quarto possui uso e ocupação diferentes dos demais em uma habitação.

Figura 51 – Exemplo de configurações de tipo de espaço para o quarto de casal da Casa Eficiente

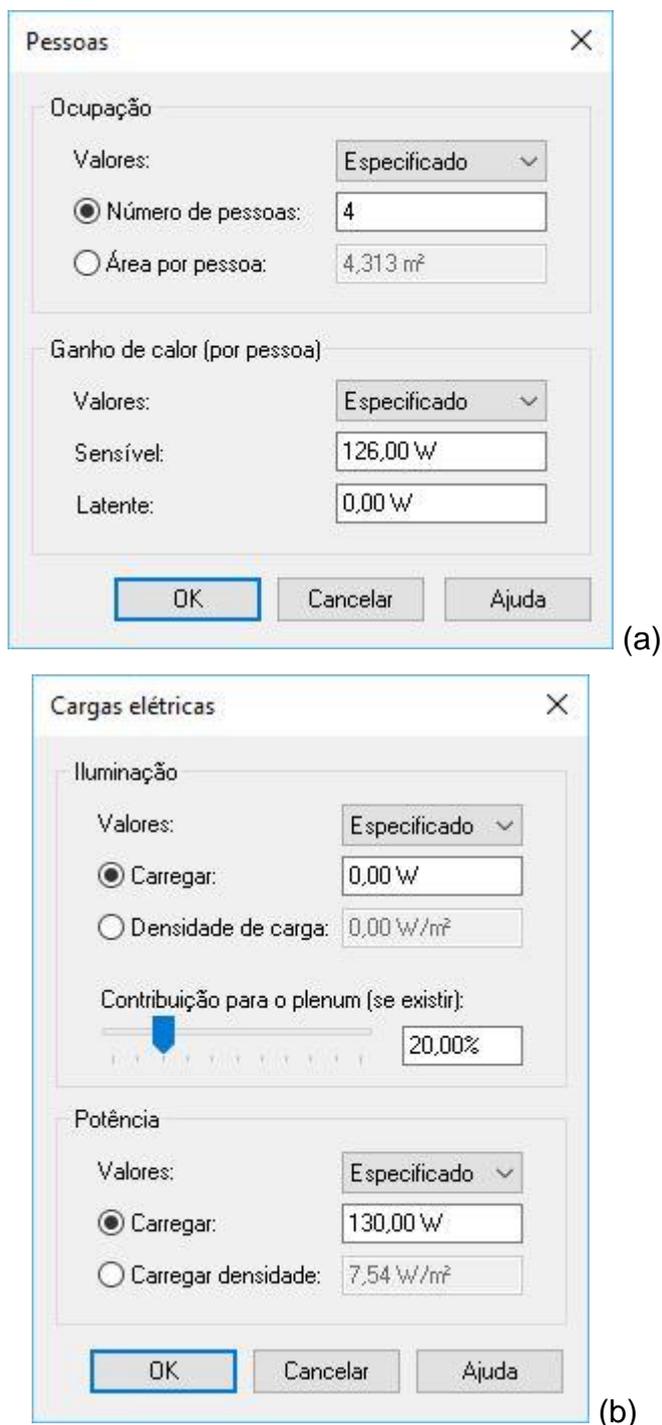


Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Optou-se por manter os valores pré-existent para especificar todos os espaços da Casa Eficiente nos parâmetros Pessoas e Cargas elétricas, como será apresentado a seguir. Porém foram alteradas somente as tabelas de ocupação, iluminação e potência de equipamentos, de acordo com o empregado no modelo de referência do EnergyPlus; como no caso do quarto de casal em que foi criado um regime de ocupação exclusivo (ver Gráfico 1, p. 81) e selecionados regimes de não utilização para a iluminação e de uso ininterrupto para os equipamentos (computador ligado durante as 24h do dia).

Aproveitando o quarto de casal como exemplo (Figura 52), nele foram especificados os quatro ocupantes da casa – determinados pelo regime de ocupação – com ganho de calor sensível de 126 W para a atividade em pé (ver Quadro 5, p. 82), a iluminação artificial que não foi utilizada com cargas nulas e o computador existente com carga de 130 W. Assim como no quarto de casal, todos os espaços do modelo da Casa Eficiente foram configurados quanto ao uso e ocupação de acordo com o modelo de referência, ressaltando as especificidades de cada cômodo.

Figura 52 – Exemplo de definições de (a) ocupação e (b) uso para o espaço do quarto de casal da Casa Eficiente



Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

As configurações de energia para o modelo analítico foram as mesmas utilizadas para o Case 600 (ver seção 3.2.1.3). Por fim, o modelo analítico de energia

gerado automaticamente foi idêntico ao do modelo de construção com ambientes (ver Figura 48, p. 107).

3.3 EXPORTAÇÃO E CONVERSÃO DOS MODELOS PRODUZIDOS

Após a produção no Autodesk Revit 2016 de todos os modelos propostos para as duas edificações estudadas, os mesmos foram exportados em extensões de arquivos disponíveis e convertidos em formato IDF para serem comparados com os modelos de referência produzidos para o programa computacional EnergyPlus 8.4.0 e apresentados na seção 3.1.

Para isso foram definidos três tipos de arquivos que tivessem a possibilidade de convertê-los para serem abertos no EnergyPlus e assim foram exportados a partir dos modelos virtuais. Os formatos são: IFC, gbXML e IDF (Figura 53), cujos processos de exportação e conversão serão explicados nas subseções seguintes.

Figura 53 – Formatos de arquivos utilizados na pesquisa

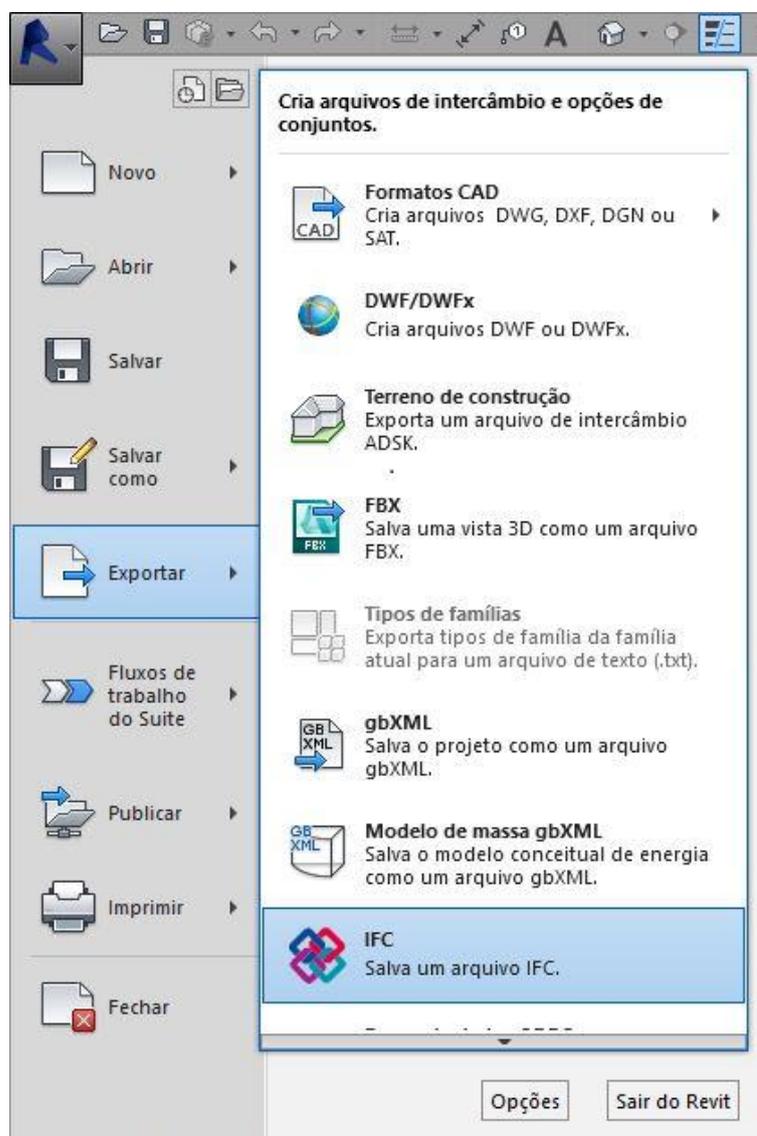


Fonte: Autor.

3.3.1 Arquivos IFC

O programa computacional Autodesk Revit permite exportar as informações dos modelos da edificação para o formato de arquivo *Industry Foundation Classes* (IFC) a partir de seu *menu* principal, como pode ser visto na Figura 54. Esta exportação é certificada com base na norma de intercâmbio de dados buildingSMART IFC2x3 (AUTODESK, 2016a).

Figura 54 – Exportação para arquivo IFC no Autodesk Revit 2016



Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Sendo assim, todos os modelos foram salvos como arquivo do tipo IFC 2x3 (*.ifc), um padrão de intercâmbio de dados da Aliança Internacional para Interoperabilidade (IAI). Esta variação do arquivo IFC é a versão padrão certificada de exportação e a mais recente geralmente suportada por outros sistemas (AUTODESK, 2016a).

Para fazer a conversão dos arquivos IFC para formatos IDF foi utilizado o programa computacional Space Boundary Tool (SBT), versão 1.7.3, conforme o esquema apresentado na Figura 55.

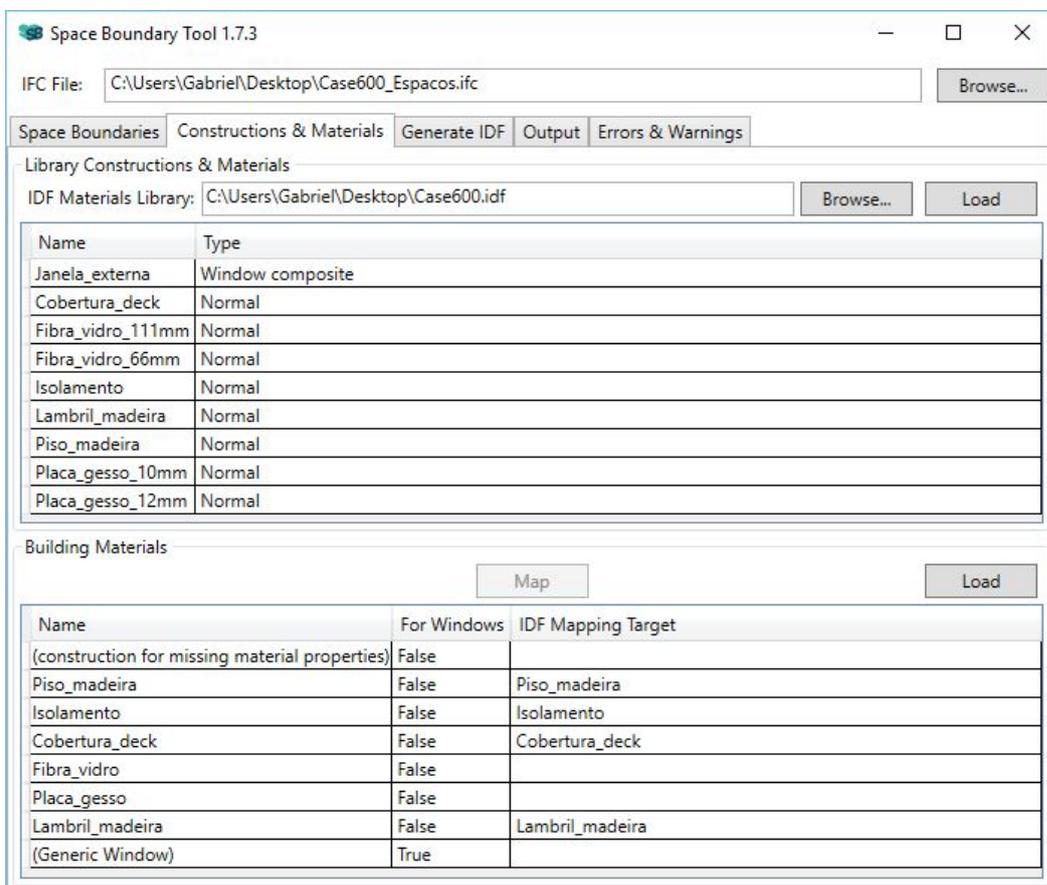
Figura 55 – Processo de conversão dos arquivos IFC para formatos IDF

ARQUIVO IFC → FERRAMENTA SBT → ARQUIVO IDF

Fonte: Autor.

No programa SBT, cada arquivo IFC foi carregado e selecionada a opção para calcular os limites de espaços, na qual são identificados os elementos que compõem as zonas dos modelos das edificações. Após isso também foram associados os elementos de construção identificados com os materiais da biblioteca dos modelos de referência produzidos no EnergyPlus, como o exemplo da Figura 56 para o Case 600. Ao final foi gerado o arquivo no formato IDF para cada modelo, disponível somente até a versão 8.0.0, com os parâmetros adequados de controle de simulação.

Figura 56 – Exemplo da associação de materiais aos elementos de construção para o modelo de construção com espaços do Case 600



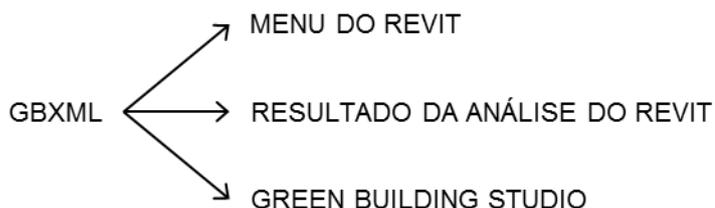
Fonte: Autor com base no programa Space Boundary Tool 1.7.3.

3.3.2 Arquivos gbXML

Quando é utilizado um modelo do Revit para a análise de energia, o modelo analítico de energia criado é compactado em um arquivo de formato *Green Building Extensible Markup Language* (gbXML) para ser enviado para o serviço na nuvem do Green Building Studio (AUTODESK, 2016a).

Foram realizadas três maneiras para exportar os modelos como arquivo gbXML e para averiguar se há diferença entre estes processos, diagramadas na Figura 57: a partir do *menu* principal do Revit, da barra de ferramentas da caixa de diálogo onde são apresentados os resultados das análises de energia feitas no Revit e do próprio Green Building Studio.

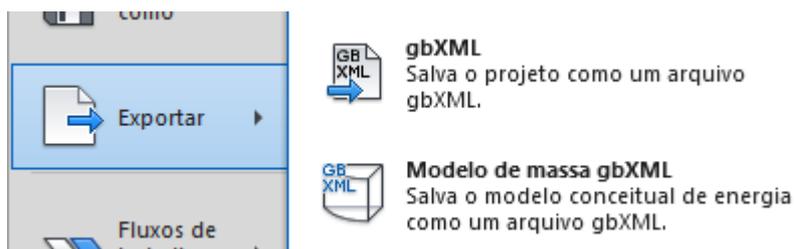
Figura 57 – Opções de exportação para arquivos gbXML



Fonte: Autor.

Especificamente, a exportação feita a partir do *menu* principal do programa Revit possui duas opções, destacadas na Figura 58, dependendo se for para modelos de construção ou de massas conceituais.

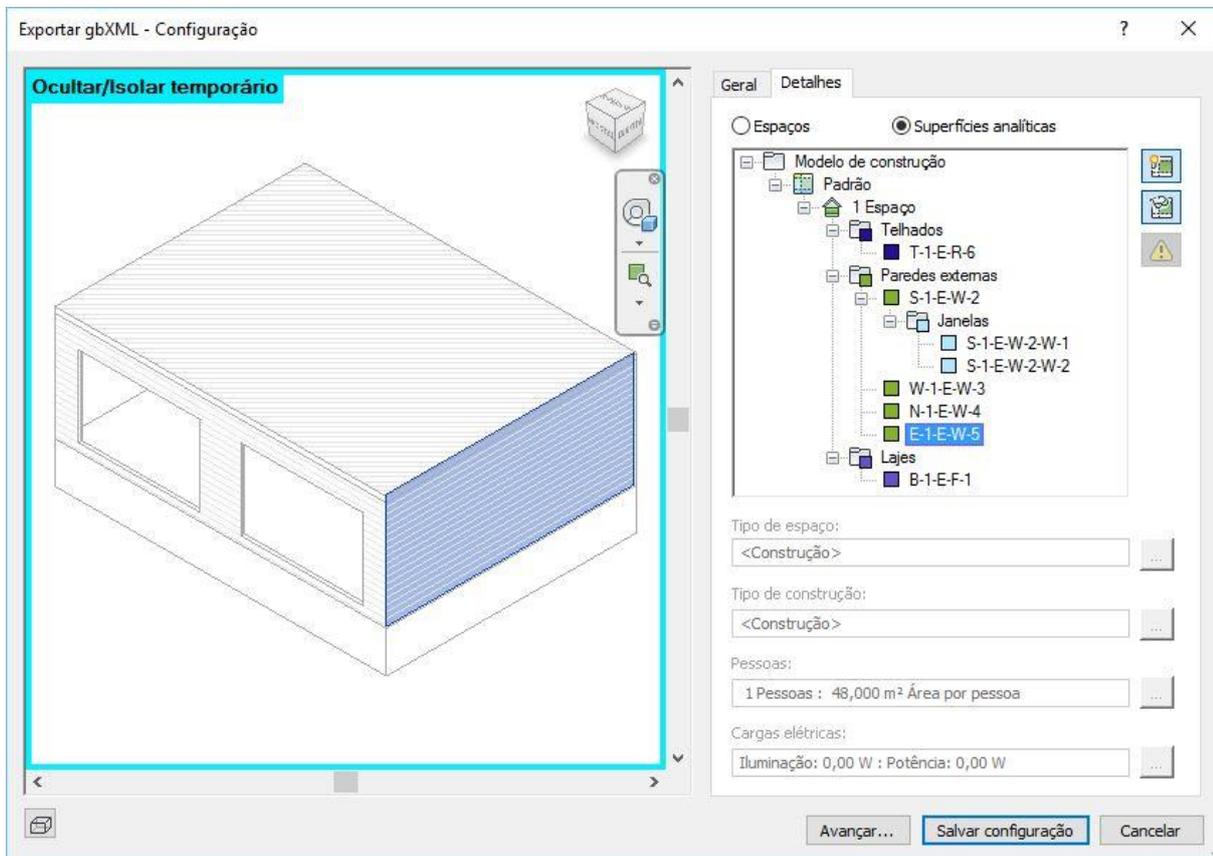
Figura 58 – Opções de exportação como arquivo gbXML a partir do *menu* do Revit



Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

No caso de exportação com modelos de construção, surge uma nova janela do programa na qual podem ser alteradas as configurações para exportar o arquivo gbXML; como são as mesmas configurações definidas para a análise de energia já apresentadas neste trabalho, foram mantidas como foi ajustado. Na aba Detalhes dessa janela, vista na Figura 59 como exemplo do modelo de construção com espaços para o Case 600, também foram examinados os espaços ou ambientes inseridos e suas superfícies analíticas para a verificação e correção de erros, quando necessário.

Figura 59 – Exemplo de visualização de elementos do modelo nas configurações de exportação para arquivos gbXML

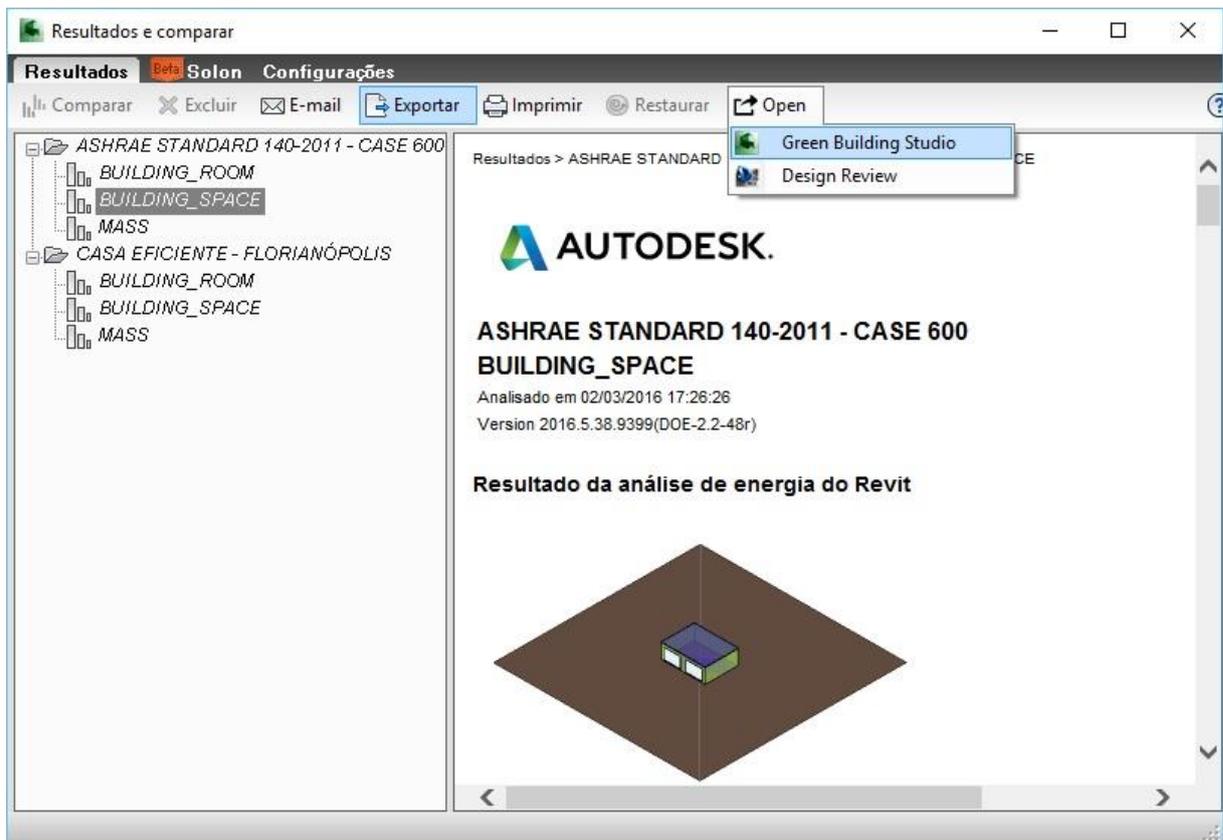


Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

As exportações do arquivo gbXML feitas a partir do Green Building Studio e dos resultados das análises de energia do Revit são diretas, então não houve necessidade de descrevê-las aqui. Somente cabe destacar que na caixa de diálogos que apresenta os resultados do Revit (Figura 60) há as opções de exportação, na qual foi possível

gerar diretamente o arquivo, e de abertura dos resultados no Green Building Studio, onde também foi obtido o gbXML.

Figura 60 – Opções de exportação como arquivo gbXML a partir dos resultados da análise de energia do Revit



Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Em seguida, o processo de conversão dos arquivos gbXML de todos os modelos de edificações para o formato de arquivo IDF foi simples, esboçado na Figura 61: iniciou-se pela importação do arquivo gbXML para o programa computacional OpenStudio 1.10.0 e a posterior exportação como formato IDF no mesmo programa.

Figura 61 – Processo de conversão dos arquivos gbXML para formatos IDF

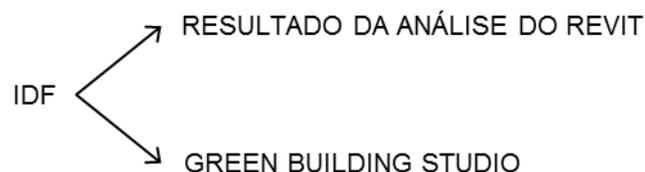
ARQUIVO GBXML → PROGRAMA OPENSTUDIO → ARQUIVO IDF

Fonte: Autor.

3.3.3 Arquivos IDF

Outra maneira utilizada na pesquisa para gerar os arquivos de dados de entrada (*Input Data File* – IDF) destinados para o EnergyPlus, a partir dos modelos BIM produzidos no Revit, foi pela exportação direta nesse formato de arquivo, sem a necessidade de conversões como nos casos anteriores. O procedimento foi o mesmo que o demonstrado na Figura 60, sem especificidades, e resumido na Figura 62.

Figura 62 – Processo de exportação dos modelos como arquivos em formato IDF



Fonte: Autor.

3.4 PARÂMETROS DE COMPARAÇÃO

Para analisar a interoperabilidade entre os programas computacionais Revit e EnergyPlus, foram comparados todos os modelos produzidos no Revit – de massa, de construção com ambientes e com espaços – das edificações estudadas – Case 600 e Casa Eficiente –, exportados para os arquivos definidos – IFC, gbXML e IDF – e convertidos em formato de arquivo IDF, com os modelos de referência produzidos com o auxílio do SketchUp e configurados diretamente no EnergyPlus.

Essa comparação foi feita para avaliar a semelhança e distorção das informações obtidas pelo processo de produção, exportação e conversão de modelos a partir do Revit com o recomendado e já consolidado EnergyPlus, utilizando parâmetros definidos sobre a geometria, as configurações e resultados de simulações.

3.4.1 Geometrias

A comparação das geometrias foi realizada pela visualização dos modelos digitais no programa SketchUp, a partir da abertura dos arquivos convertidos em

formato IDF com o *plug-in* Legacy OpenStudio. Foram comparados aspectos quanto à fidelidade dos modelos exportados do Revit com o padrão de referência produzido no EnergyPlus, tais como:

- a) dimensões e localização das zonas térmicas;
- b) existência e identificação correta dos componentes de construção (paredes, pisos, coberturas, portas, janelas, elementos de sombreamento, entre outros existentes);
- c) simplicidade da geometria, conforme é recomendada para modelos energéticos utilizados em simulações computacionais.

3.4.2 Configurações de simulação

Para a comparação das configurações de simulação, os arquivos IDF convertidos dos modelos exportados do Revit foram abertos no próprio EnergyPlus para serem visualizados se tais parâmetros estavam corretos conforme os modelos de referência.

Quanto aos materiais foram verificadas suas propriedades físicas (camadas dos componentes e respectivas espessuras) e térmicas (condutividade térmica, densidade, calor específico e outras variações) nos respectivos componentes de construção dos modelos.

Além disso, também foram examinadas as configurações das cargas térmicas internas geradas por ocupantes, iluminação e equipamentos, com seus referentes regimes de uso e ocupação (*schedules*), assim como a questão da localização da edificação e seu arquivo climático.

3.4.3 Resultados das simulações

Como último parâmetro de comparação para obter uma análise consistente, foram executadas no EnergyPlus as simulações de cada modelo produzido, sendo solicitadas as temperaturas internas médias mensais das zonas térmicas como valores de saída, as quais não incluem a temperatura média radiante das superfícies. Tais resultados foram escolhidos por serem indicados na norma NBR 15575-1 (ABNT, 2013) para a avaliação do desempenho térmico de edificações.

Diferentemente do Case 600 que possui uma única zona térmica, dos resultados das simulações para a Casa Eficiente foram selecionadas as temperaturas internas das zonas térmicas do quarto de casal e banheiro, pois se mantiveram nas conformações originais após as exportações.

Os arquivos foram mantidos com suas configurações originais transferidas das exportações, sendo somente solicitado para que as simulações fossem executadas para o ano inteiro (8760 horas), utilizando o arquivo climático selecionado referente ao local da edificação, e que o relatório de saída do EnergyPlus publicasse dados de saída (*outputs*) mensais sobre as temperaturas internas das zonas térmicas (variável *zone mean air temperature*).

Com posse de todas as temperaturas internas médias de cada mês das zonas térmicas, os valores de cada edificação foram comparados visualmente entre si por meio de gráficos para analisar a diferença entre os resultados dos modelos exportados do Revit com os modelos de referência do EnergyPlus.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados foi dividida nos parâmetros de comparação para os tipos de arquivos exportados e convertidos de cada um dos modelos digitais produzidos para as duas edificações. A seção foi organizada deste modo com a finalidade de facilitar o entendimento das variações de dados nas comparações dos processos de modelagem para simulação térmica entre os programas computacionais Autodesk Revit e EnergyPlus.

Os diferentes graus de complexidade e modelagem das edificações avaliadas colaboraram para identificar variações específicas em cada caso que contribuíram para alcançar o objetivo da pesquisa.

4.1 CASE 600

Por possuir uma geometria simplificada, a edificação base de testes da norma ASHRAE Standard 140, o Case 600, possibilitou um maior controle na verificação de distorções nas informações dos modelos transferidas entre os programas.

4.1.1 Arquivos IFC

Os modelos exportados a partir de arquivos IFC mostraram-se inadequados para o procedimento de simulação térmica de edificações, pois não foi possível serem convertidos para o formato IDF do EnergyPlus; isso ocorre justamente por não ser um formato de arquivo destinado a esse tipo de finalidade. Além disso, a necessidade de um programa adicional para a tentativa dessa conversão, o Space Boundary Tool, mesmo sendo de fácil aprendizagem, torna o processo mais trabalhoso e constitui outro ponto negativo. A necessidade de correções de erros para viabilizar a conversão também se apresenta como fator contrário ao uso desse tipo de arquivo.

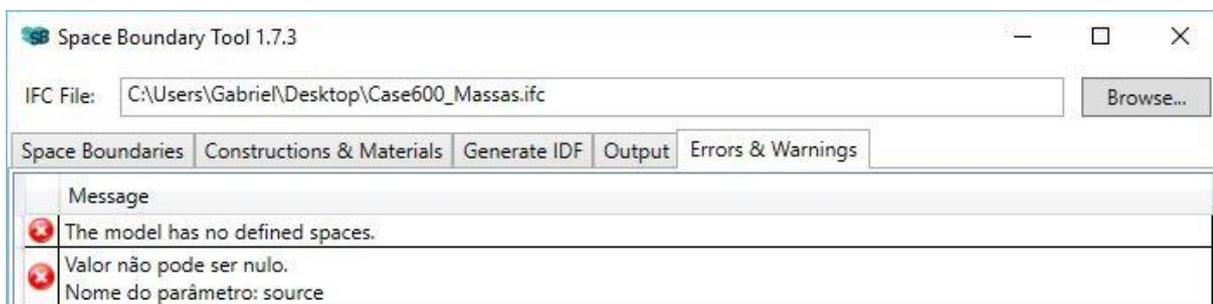
4.1.1.1 Análise das geometrias

Os três arquivos IFC exportados (provenientes de massas conceituais e elementos de construção com ambientes ou espaços) não puderam ser abertos pelo

plug-in Legacy OpenStudio para a visualização no SketchUp, pois não foram reconhecidas suas respectivas geometrias no programa Space Boundary Tool.

Particularmente para o modelo de massas conceituais, o programa SBT apontou o erro de não reconhecimento dos espaços (zonas térmicas), como pode ser visualizado na Figura 63, o que interrompeu a conversão do arquivo IFC para o formato IDF.

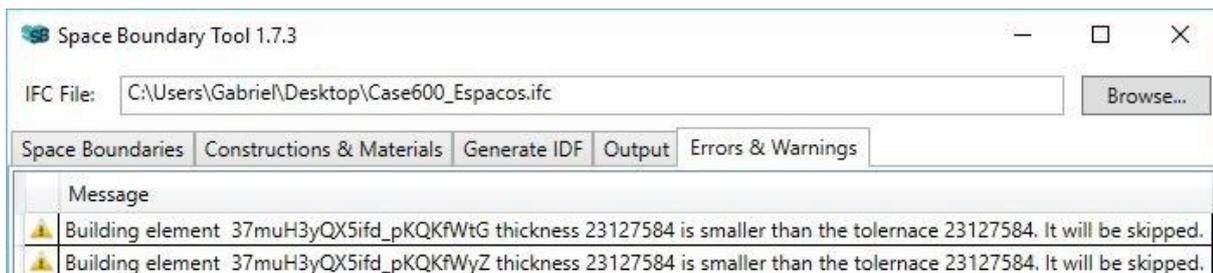
Figura 63 – Erro na conversão do arquivo IFC com o modelo de massas conceituais do Case 600



Fonte: Autor com base no programa Space Boundary Tool 1.7.3.

Para os modelos de construção, tanto com ambientes como com espaços inseridos, durante a conversão no SBT surgiram avisos de que foi ignorada a ocorrência de alguns elementos da geometria possuírem espessura menor que o tolerado pelo programa (Figura 64). Neste caso foram identificados que tais elementos correspondem às duas janelas da edificação, cuja espessura é de 3 mm, e isso poderia criar distorções na geometria convertida.

Figura 64 – Notificações sobre a tolerância de espessuras no SBT para o Case 600



Fonte: Autor com base no programa Space Boundary Tool 1.7.3.

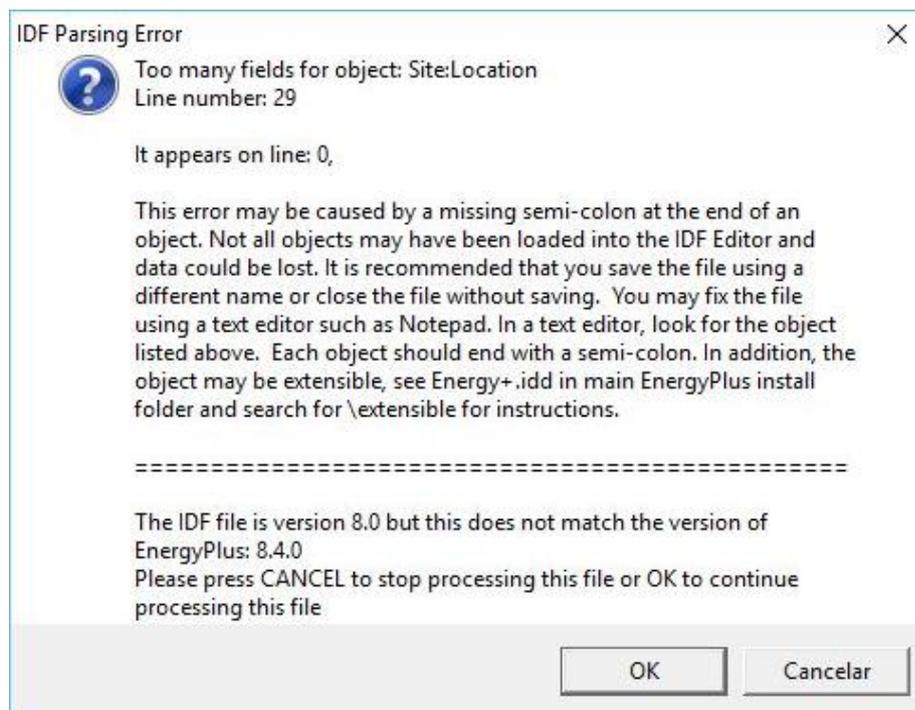
4.1.1.2 Verificação das configurações de simulação

Somente os modelos com elementos de construção puderam ser convertidos para o formato IDF e abertos no EnergyPlus para a verificação das configurações.

Durante a configuração para a conversão dos arquivos no programa SBT, verificou-se uma complicação na associação de materiais (ver Figura 56, p. 114). No Revit, os elementos de construção são configurados com diferentes camadas de espessuras para depois serem aplicados os referentes materiais; enquanto que no EnergyPlus, em cada material criado deve ser atribuída sua espessura específica para depois compor as camadas dos elementos de construção. Com isso, como há diferentes objetos do EnergyPlus para diferenciar as espessuras de um mesmo material, houve a dificuldade de associá-los com os materiais criados no Revit.

O programa Space Boundary Tool 1.7.3 converte os formatos IFC até a versão 8.0.0 do EnergyPlus. Sendo assim, quando tentou-se abrir os referentes arquivos IDF no editor do EnergyPlus, houve um excesso de erros na linguagem dos arquivos que impossibilitaram de abri-los no programa, exemplificado na Figura 65.

Figura 65 – Exemplo de aviso de erro de linguagem no EnergyPlus para arquivos IFC convertidos dos modelos de construção do Case 600



Esses erros referiram-se a perdas na transferência de informações para o arquivo IDF, como a ausência de ponto-e-vírgula no final de objetos nas linhas de programação utilizadas pelo programa para realizar a correta leitura dos dados. Conforme recomendado pelo EnergyPlus, o arquivo de texto (arquivo EXPIDF) pode ser corrigido por meio de um editor de texto, como o Notepad, que facilita a localização dos erros.

Posteriormente, os mesmos arquivos IDF foram atualizados para a versão mais recente do EnergyPlus e utilizada nesta pesquisa (versão 8.4.0) com a ferramenta IDF Version Updater (instalada junto com o *software*), que permitiu visualizá-los no editor do programa. Entretanto foi verificada a falta de informações necessárias, como por exemplo os materiais que não foram exportados, o que impossibilitou o reconhecimento da geometria dos modelos.

Com isso, como na investigação foi definido manter os arquivos intactos após as conversões e não os corrigir, não foi possível executar as simulações propostas dos modelos de construção do Revit oriundos de arquivos IFC para serem comparadas com os resultados do modelo de referência criado diretamente para o EnergyPlus.

4.1.2 Arquivos gbXML

Nas análises energéticas executadas no próprio Revit, o modelo analítico de energia gerado automaticamente derivado da geometria da edificação é compactado em um arquivo gbXML para ser enviado para o serviço na nuvem da ferramenta Autodesk Green Building Studio, evidenciando a relação e facilidade de troca de informações do programa Revit com esse tipo de arquivo.

Desse modo, os arquivos gbXML convertidos para o formato IDF apresentaram opções viáveis para a realização de simulações térmicas no EnergyPlus a partir de modelos produzidos no Revit, como serão expostas nas subseções a seguir.

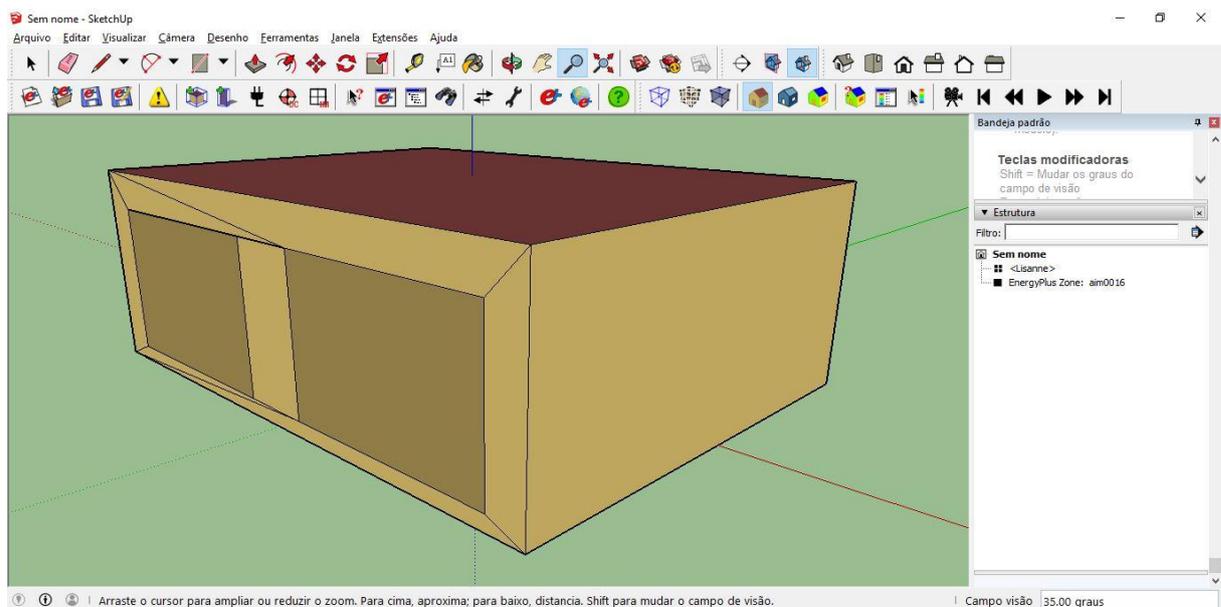
4.1.2.1 Análise das geometrias

Com os arquivos gbXML, notou-se que as variações das geometrias convertidas em formato IDF dependem do tipo de modelagem no Revit, como modelos de massas conceituais ou de construção (com espaços ou ambientes), e da forma de

exportação a partir do Revit, como pelo *menu* principal do programa, ou pelos resultados das análises de energia ou pelo Green Building Studio.

Os três arquivos exportados com massas conceituais originaram uma mesma geometria. Na Figura 66 percebe-se que a geometria ficou distorcida, com superfícies facetadas na parede sul, e as janelas foram interpretadas como portas (esquema de cor para porta na cor marrom, enquanto que janelas são de um azul translúcido), o que pode causar aumento no tempo de processamento na execução das simulações e má interpretação das informações. Entretanto, estes erros podem ser facilmente corrigidos por edição direta no SketchUp.

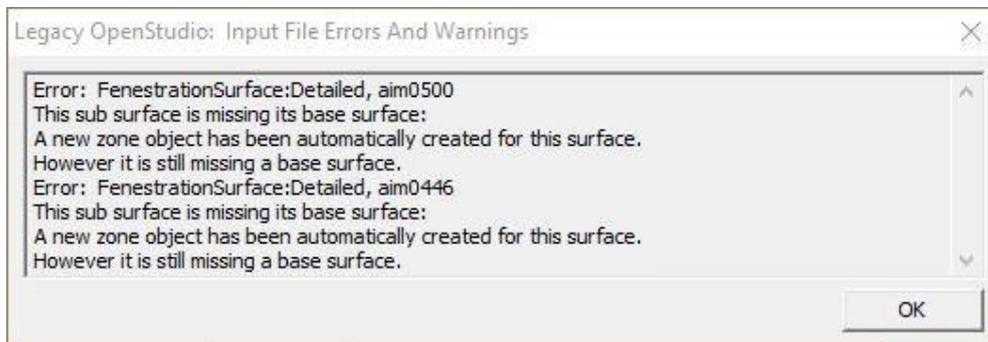
Figura 66 – Geometria do modelo de massas conceituais do Case 600 exportado em arquivos gbXML



Fonte: Autor com base no programa SketchUp 2016.

Para os modelos de construção com ambientes e com espaços, ambas as geometrias exportadas diretamente do Green Building Studio e a partir dos resultados das análises de energia do Revit foram iguais à da Figura 66 acima. Especificamente nestes casos houve um erro na identificação das janelas (Figura 67), sendo criadas automaticamente novas zonas para essas superfícies, que ainda foram interpretadas erroneamente como portas.

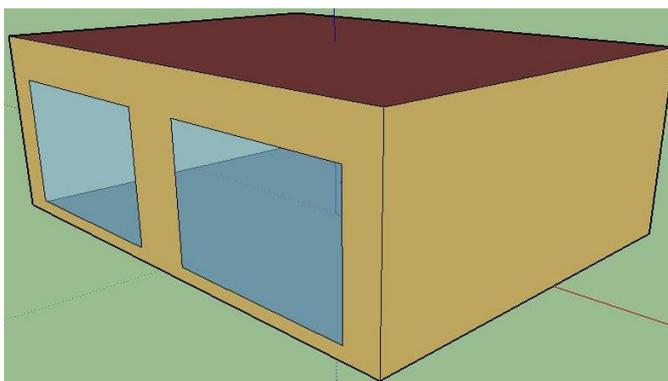
Figura 67 – Aviso de erro na identificação das janelas nos modelos de construção do Case 600



Fonte: Autor com base no programa SketchUp 2016.

Enquanto que, quando os modelos de construção são exportados a partir do *menu* principal do Revit, foi gerada uma geometria (Figura 68) idêntica ao modelo padrão de referência criado diretamente no SketchUp para o EnergyPlus (ver Figura 11, p. 75). Como a exportação no *menu* principal do Revit é feita diretamente, sem a necessidade de execução da simulação no programa, acredita-se que a geometria não foi modificada por não ter havido interferência do Green Building Studio.

Figura 68 – Geometria do modelo de construção com ambientes do Case 600 exportado em arquivos gbXML do *menu* principal do Revit



Fonte: Autor com base no programa SketchUp 2016.

Dentre os arquivos gbXML do Case 600, a melhor definição de geometria foi do modelo de construção exportado do *menu* principal do Revit, tanto com ambientes ou espaços, uma vez que foi a mais simplificada e fiel ao modelo de referência, com

os elementos da edificação corretamente transferidos e interpretados pela conversão em formato IDF.

O modelo analítico de energia criado automaticamente no programa Revit, quando é proveniente de geometrias com elementos de construção (como paredes, pisos e coberturas modelados com suas espessuras) e o qual foi exportado nos diferentes formatos de arquivos definidos nesta pesquisa, adota como base para a sua definição o eixo central dos elementos construtivos, após a verificação de suas dimensões; conseqüentemente o volume de ar interno sofre um aumento e a área das faces externas da edificação é reduzida, como ocorreu no modelo da Figura 68. O recomendável seria trabalhar com a face externa das paredes para manter a área de suas superfícies com as dimensões reais, apesar de alterar de fato a massa de ar interna, devido à influência da radiação solar no desempenho da edificação.

Desse modo, os modelos de massas conceituais, produzidos sem espessuras no Revit e com os tamanhos ideais para o processo de modelagem energética de edificações (BEM), apresentam vantagem no quesito sobre as dimensões da geometria que é exportada, apesar de seus erros identificados anteriormente.

4.1.2.2 Verificação das configurações de simulação

Como todos os modelos exportados em gbXML foram convertidos por meio do programa OpenStudio em sua última versão (1.10.0), os arquivos IDF foram transformados na versão do programa EnergyPlus utilizado neste trabalho (8.4.0), não havendo a necessidade de atualização como ocorreu com os arquivos originados do formato IFC.

Outra questão notada sobre o formato gbXML foi que os arquivos convertidos dos resultados das análises de energia do Revit e do Green Building Studio são iguais para cada tipo de modelo, pois transferem as mesmas configurações de simulação para o EnergyPlus, diferenciando-se da exportação a partir do *menu* do Revit.

A seguir serão destacados somente os pontos relevantes dos arquivos oriundos da extensão gbXML que os diferem do modelo de base produzido para o EnergyPlus; os aspectos não apontados ficaram em conformidade com o padrão de referência.

Como o EnergyPlus utiliza um arquivo climático desejado no formato EPW inserido no próprio programa para realizar as simulações, as características de clima e localização geográfica da edificação definidas pela estação climática escolhida no

serviço de mapeamento na internet do Revit (ver Figura 18, p. 84) não foram transferidas para os arquivos IDF.

Quando os arquivos gbXML foram convertidos para o formato IDF, os objetos sofreram alterações em sua nomenclatura, como as denominações de materiais e de elementos construtivos que foram definidas no Revit. Esta mudança, que se configura em números para a diferenciação dos objetos, dificulta a identificação dos mesmos quando se opta pela correção do arquivo, tornando o processo mais trabalhoso.

Para o modelo de massas conceituais, como não existe a possibilidade de configurá-los no Revit conforme o desejado, a diferença entre as configurações de simulação em seus arquivos IDF foi determinada pelo modo como foram produzidos, como explicado abaixo.

Nos modelos originados dos resultados das análises de energia do Revit e do GBS, as propriedades térmicas dos materiais (já interpretados como resistência térmica) foram introduzidas no arquivo IDF pelas construções conceituais definidas nas configurações do modelo de energia durante sua produção (ver Figura 23, p. 88); quanto ao uso e ocupação da edificação, seus regimes (*schedules*) foram inseridos no EnergyPlus pelas configurações padrão do tipo de construção oferecido pelo Green Building Studio, entretanto não foram transferidas as cargas para cada ganho interno de calor. Também foram exportados regimes de funcionamento padrão do GBS para o sistema AVAC obrigatoriamente definido nas configurações de energia do Revit (ver Figura 24-a, p. 89).

Como o modelo de massa conceitual exportado a partir do *menu* do Revit não sofre influência do Green Building Studio, por não ter havido a necessidade de execução da análise de energia no programa, as configurações de materiais, uso e ocupação da edificação não foram transferidas para o arquivo IDF.

Para os modelos de construção com ambientes, as configurações de simulação foram muito semelhantes entre si e com o modelo de massas conceituais, ressaltando algumas diferenças por serem produzidos no Revit com um maior controle de suas definições.

No modelo com ambientes exportado a partir do *menu* do Revit, a única diferença notada ao que já foi exposto no arquivo IDF foi quanto às propriedades térmicas dos materiais, as quais foram identificadas dos próprios materiais configurados e aplicados durante a modelagem no programa (ver Figura 27, p. 91, e Figura 28, p. 92).

Nos modelos com ambientes originados a partir dos resultados das análises energéticas do Revit e do GBS, acrescenta-se que foram criados materiais inexistentes para as superfícies resultantes do erro de identificação das janelas da geometria (ver Figura 67, p. 126); e, além dos regimes padrão de funcionamento para sistema AVAC, foram transferidas as *schedules* específicas definidas no Revit para o uso e ocupação do Case 600 (ver Figura 19, p. 85), porém as cargas térmicas continuaram não sendo transportadas.

Para os modelos de construção com espaços inseridos, as informações exportadas utilizando os resultados das análises do Revit ou o Green Building Studio foram exatamente as mesmas dos modelos com ambientes, apresentadas no parágrafo acima. A variação de configurações de simulação foi encontrada somente nos modelos originados no *menu* principal do Revit, nos quais foram transferidos apenas os regimes de uso e ocupação que foram configurados durante processo de modelagem no programa.

Portanto, quanto às configurações de simulação analisadas, o modelo de construção com espaços exportado do *menu* principal do Revit foi o que representou o melhor tipo de arquivo para ser convertido em formato IDF. O motivo é a transferência somente das informações definidas especificamente na modelagem, sem dados padrões dos programas envolvidos, resultante do maior controle de configurações dos espaços inseridos que o torna semelhante ao modelo de referência.

Ainda assim, como todos os arquivos IDF provenientes do formato gbXML foram mantidos originais – ou seja, sem as correções necessárias –, não foi possível executar as simulações propostas. As interrupções nas simulações foram decorrentes de uma sequência de erros graves, visualizados no arquivo de erros (arquivo ERR), como a falta de algumas informações essenciais – por exemplo, as propriedades térmicas das janelas – que resultaram em um erro fatal.

4.1.3 Arquivos IDF

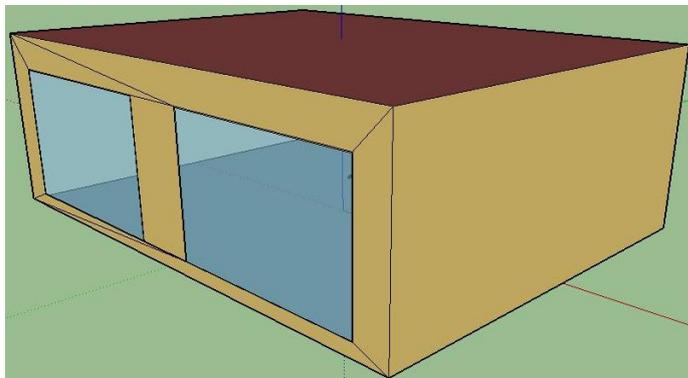
Os modelos digitais produzidos no Autodesk Revit possuem a vantagem de também serem exportados diretamente no formato IDF para o EnergyPlus. Trata-se de um processo recomendável, simplificado para ser executado e que possibilitou a transferência da maioria das informações necessárias para as simulações propostas.

No Revit 2016 e no Green Building Studio, os arquivos IDF são exportados na versão 8.3.0 do EnergyPlus. Mesmo assim não sofreram nenhuma alteração quando foram atualizados, com a ferramenta IDF Version Updater, para a versão 8.4.0 utilizada neste trabalho.

4.1.3.1 Análise das geometrias

As geometrias exportadas do modelo de massas conceituais, tanto dos resultados das análises de energia do Revit como do Green Building Studio, sofreram somente distorções em sua fachada sul, com a superfície dividida em algumas faces (Figura 69), semelhante ao ocorrido com o formato gbXML (ver Figura 66, p. 125). Por outro lado, as janelas foram reconhecidas corretamente, o que proporciona uma vantagem para este tipo de exportação.

Figura 69 – Geometria do modelo de massas conceituais do Case 600 exportado em arquivos IDF



Fonte: Autor com base no programa SketchUp 2016.

Ambos os modelos de construção, com ambientes ou espaços e independentemente do modo de exportação, tiveram a mesma configuração de geometria exportada da Figura 69. Porém, por se tratarem de modelagem no Revit com as espessuras de seus elementos de construção, as geometrias perderam as dimensões definidas para o Case 600, pois ficaram de acordo com o modelo analítico de energia gerado automaticamente no programa que assume os eixos centrais dos componentes da envoltória da edificação. Isto significa que tais modelos tiveram um aumento no volume de ar interno e uma redução da área das superfícies externas.

Sendo assim, neste caso para exportação direta de arquivos IDF do Case 600, como todas as geometrias sofreram distorções na parede que recebe as janelas, o modelo de massas conceituais apresentou vantagens por apresentar suas dimensões em conformidade com o modelo de referência do EnergyPlus. E comparando-o com as geometrias obtidas com o formato de arquivo gbXML, este apresentou opção melhor que o IDF (ver Figura 68, p. 126).

4.1.3.2 Verificação das configurações de simulação

Pelo formato IDF ser direcionado ao EnergyPlus, a possibilidade de exportar os modelos do Revit diretamente neste tipo de arquivo faz com que as informações inseridas na edificação sejam melhor transferidas, como será demonstrado em seguida, com configurações de simulação mais completas quando comparadas com os outros tipos de arquivos utilizados nesta pesquisa.

Em ambos os modelos de massas conceituais exportados foram transportados dados a mais se comparados com o formato de arquivo gbXML, sobre: a edificação, como a sua orientação; os padrões de uso e ocupação da edificação, bem como de operação do sistema AVAC selecionado obrigatoriamente no Revit (ver Figura 24-a, p. 89), sendo que as trocas de ar por hora e os regimes (*schedules*) e cargas térmicas de ocupantes, iluminação e equipamentos seguiram as configurações padrão para habitação unifamiliar oferecidas pelo Green Building Studio; e os materiais dos elementos, cujas propriedades térmicas foram definidas pelas construções conceituais escolhidas nas configurações de energia do Revit (ver Figura 23, p. 88).

Entre esses dois modelos de massas conceituais houve uma diferença quanto às informações sobre a localização geográfica da edificação. No arquivo IDF originado no Green Building Studio foram transferidos os dados da estação climática definida no Serviço de mapeamento na internet do Revit, tais como longitude, latitude, altitude e dias típicos de verão e inverno; enquanto que tais informações estão ausentes no arquivo IDF proveniente dos resultados das análises de energia do Revit.

Para os modelos de construção com ambientes (exportados dos resultados de análise de energia do Revit e do Green Building Studio), em ambos os arquivos foram transferidos os mesmos tipos de informações dos referentes arquivos IDF dos modelos de massas conceituais acima.

Apesar disso, houve mudança em alguns dados devido à variação do processo de modelagem no Revit com elementos de construção e pela inserção de ambientes, como: os regimes de uso e ocupação, obtidos das *schedules* especificadas no Revit para o Case 600, porém as cargas térmicas permaneceram como as definidas pelas configurações padrão de acordo com o tipo de construção do GBS; e as propriedades térmicas dos materiais que, em vez de serem padronizadas de construções conceituais, foram transportadas dos materiais definidos no Revit (ver Figura 28, p. 92). Por motivos desconhecidos, foram criados materiais inexistentes na edificação para as superfícies que foram facetadas como uma moldura ao redor de cada janela.

Para a família de janelas do Revit, não são exportadas as propriedades térmicas dos componentes de uma janela, como exemplo o vidro; nesse caso, foram transferidas para o arquivo IDF as propriedades analíticas do tipo de janela (Figura 70), que constituem dados pré-definidos no Revit e equivalentes aos tipos de elementos de construção para espaços (ver Figura 36, p. 97).

Figura 70 – Propriedades analíticas de janelas no Autodesk Revit

Propriedades analíticas	
Construção analítica	Vidraça dupla - doméstico
Transmissão de luz visual	0,810000
Coefficiente de ganho de calor solar	0,760000
Resistência térmica (R)	0,3196 (m ² ·K)/W
Coefficiente de transferência de calor (U)	3,1292 W/(m ² ·K)

Fonte: Autor com base no programa Autodesk Revit 2016.

Para os dois arquivos IDF provenientes do modelo de construção com espaços, foram exportadas as mesmas configurações de simulação quando comparados com o modelo de construção com ambientes inseridos. A única diferença encontrada foi quanto aos padrões de uso e ocupação da edificação, que foram mais específicos para o Case 600 e referentes às configurações do tipo de construção/espaço definidas no Revit (ver Figura 19, p. 85), principalmente no quesito de cargas térmicas.

Com isso, o modelo de construção com espaços exportado em arquivo IDF no Autodesk Green Building Studio ou diretamente do Revit torna-se a melhor opção de transferência das configurações de simulação analisadas, por conter muitas

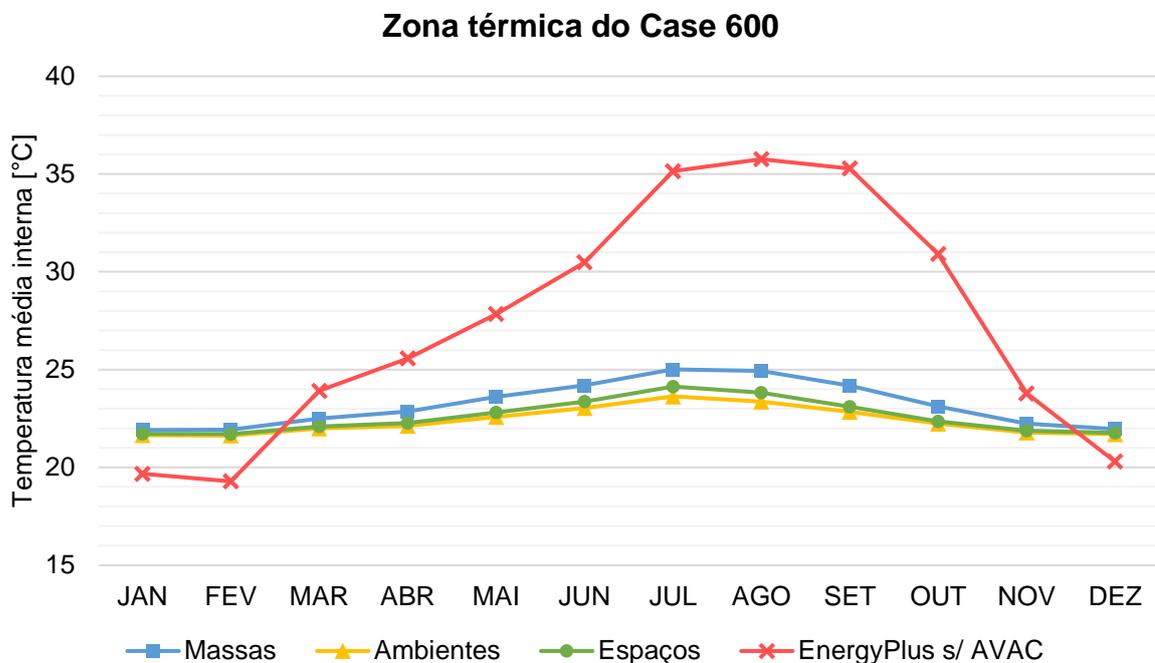
informações que o torna mais similar ao modelo de referência produzido diretamente no EnergyPlus, obtendo vantagem sobre o formato gbXML.

4.1.3.3 Comparação entre os resultados das simulações

De todos os modelos analisados para o Case 600, os arquivos IDF exportados foram os únicos formatos que permitiram realizar as simulações térmicas propostas nesta pesquisa sem a necessidade de correções, sendo que as diferenças nas configurações de cada modelo refletiram nas variações dos resultados.

Após uma simulação inicial, quando os resultados dos modelos exportados do Revit foram comparados com o modelo de referência produzido diretamente no EnergyPlus, por meio do Gráfico 3, foi verificada uma diferença acentuada de até 11°C nas temperaturas internas da zona térmica do Case 600 entre os meses de abril a outubro.

Gráfico 3 – Comparação entre os resultados das simulações iniciais para o Case 600



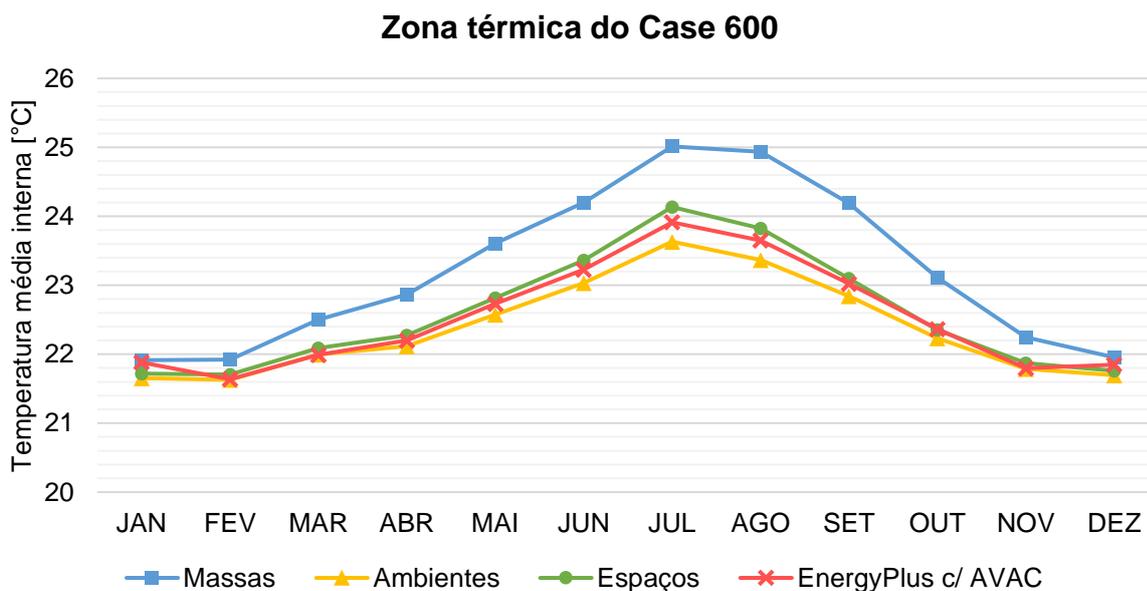
Fonte: Autor.

A causa desta discordância exacerbada entre os resultados das exportações e do modelo de referência é justificada principalmente pela presença do indesejado sistema AVAC do Revit transferido para os modelos exportados, que teve que ser definido obrigatoriamente no programa e não pôde ser eliminado antes da exportação.

Diante disto, para obter uma comparação coerente entre os resultados, foi também inserido um sistema de climatização artificial no modelo do EnergyPlus equivalente ao transferido a partir do Revit: do tipo PTHP, com *setpoint* do termostato definido em 20°C para aquecimento e 25°C para resfriamento, e *schedule* para funcionamento sem interrupções durante o ano inteiro.

Ao final das simulações com todos os arquivos IDF, os *status* dos processos acusaram somente erros do tipo *warning*, que representam erros leves que não comprometem o andamento da simulação e podem ser corrigidos quando necessário. Visualiza-se no Gráfico 4 que a inserção do sistema AVAC no modelo do EnergyPlus fez com que a linha de seus resultados apresentasse perfil de concavidade similar às exportações do Revit, compreendida entre os modelos de construção e mais relacionada ao modelo com espaços, uma vez que este possui maior controle de configurações que o torna mais análogo ao modelo de referência da edificação.

Gráfico 4 – Comparação entre os resultados das simulações finais para o Case 600



A realização de um teste isolando a variável das temperaturas mensais do solo, pela utilização dos mesmos valores em todos os arquivos, mostrou que o solo não influencia os resultados das temperaturas internas mensais do Case 600 devido à grande espessura do material de isolamento utilizado no piso, que o dissocia do terreno.

Comparando entre si as formas de exportação dos modelos digitais (a partir do Revit e do Green Building Studio), notou-se de maneira geral uma diferença muito pequena entre as temperaturas internas mensais da zona térmica do Case 600, percebida somente por meio das casas decimais dos valores, como serão demonstradas para cada tipo de modelo ao longo desta seção do trabalho. Todavia, esta variação, mesmo que mínima, pode ser o diferencial em uma avaliação do desempenho térmico de edificações.

Entre os modelos de massas conceituais, como ambos exportaram geometrias e configurações de simulação praticamente idênticas, houve uma mínima variação dos resultados (Tabela 4).

Tabela 4 – Resultados das simulações com modelos de massas conceituais para o Case 600

	Revit [°C]	Green Building Studio [°C]	EnergyPlus c/ AVAC [°C]
Janeiro	21,9133315642728	21,9133315642728	21,8817872712116
Fevereiro	21,9205267245913	21,9205267245913	21,6368324099440
Março	22,4976833965751	22,4997708183165	21,9893233814215
Abril	22,8777132952227	22,8544990691132	22,1998080709254
Maiο	23,6317139919035	23,5871396197844	22,7315895101519
Junho	24,2094051429264	24,1874319916182	23,2253592143243
Julho	25,0128779200937	25,0134389285783	23,9128479212888
Agosto	24,9343259000945	24,9352170754144	23,6510385179045
Setembro	24,1986367233475	24,1790308133939	23,0230871552822
Outubro	23,1318925319364	23,0932479311358	22,3664062394328
Novembro	22,2427465791848	22,2477184679239	21,7963773429535
Dezembro	21,9551381287577	21,9551383679019	21,8492059230979
Média	23,2104993249089	23,1988742810037	22,5219719131615

Fonte: Autor.

A partir da Tabela 4 acima, observou-se que o arquivo exportado a partir do Green Building Studio possuiu a menor diferença de média das temperaturas quando

comparado com os resultados do modelo de referência do EnergyPlus; ainda assim, os valores se distanciam deste modelo-base devido à transferência de materiais, usos e ocupações padronizados do Revit.

Comparando-se os modelos de construção com ambientes, ambos os arquivos geraram resultados praticamente idênticos entre si e com valores próximos do modelo de referência do EnergyPlus, refletidos na comparação das médias das temperaturas internas dos modelos na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados das simulações com modelos de construção com ambientes para o Case 600

	Revit [°C]	Green Building Studio [°C]	EnergyPlus c/ AVAC [°C]
Janeiro	21,6558494748802	21,6558494772976	21,8817872712116
Fevereiro	21,6288450363330	21,6288450382440	21,6368324099440
Março	21,9975313627047	21,9975313627358	21,9893233814215
Abril	22,1186886807602	22,1186886789566	22,1998080709254
Mai	22,5733551421496	22,5733551388062	22,7315895101519
Junho	23,0352825931798	23,0352825887647	23,2253592143243
Julho	23,6323251274035	23,6323251217752	23,9128479212888
Agosto	23,3683361250483	23,3683361190801	23,6510385179045
Setembro	22,8431192965374	22,8431192946124	23,0230871552822
Outubro	22,2343054326623	22,2343054329392	22,3664062394328
Novembro	21,7896491284152	21,7896491294394	21,7963773429535
Dezembro	21,6941475870493	21,6941475889370	21,8492059230979
Média	22,3809529155936	22,3809529142990	22,5219719131615

Fonte: Autor.

Apesar da exportação dos materiais e regimes de uso e ocupação específicos para o Case 600, algumas configurações padrão transferidas dos modelos com ambientes fizeram com que seus resultados também fossem desviados do modelo de referência do EnergyPlus. São elas: as cargas térmicas padronizadas de ocupantes, iluminação e equipamentos, as propriedades térmicas também padronizadas das janelas e o surgimento de materiais inexistentes.

Quanto aos modelos de construção com espaços, verificou-se que os dois arquivos exportados foram extremamente semelhantes entre si e apresentaram os resultados mais próximos aos valores do modelo de referência do EnergyPlus (Tabela 6), devido ao maior controle de suas configurações como explicado anteriormente.

Tabela 6 – Resultados das simulações com modelos de construção com espaços para o Case 600

	Revit [°C]	Green Building Studio [°C]	EnergyPlus c/ AVAC [°C]
Janeiro	21,7181330452187	21,7183477416250	21,8817872712116
Fevereiro	21,7054954849565	21,7056718850646	21,6368324099440
Março	22,0891616889568	22,0894208682756	21,9893233814215
Abril	22,2721083028853	22,2723974648215	22,1998080709254
Mai	22,8160583706492	22,8163780414172	22,7315895101519
Junho	23,3633391545519	23,3635760406942	23,2253592143243
Julho	24,1348510863588	24,1349781652562	23,9128479212888
Agosto	23,8241708122639	23,8243323864162	23,6510385179045
Setembro	23,0961277877169	23,0962977552566	23,0230871552822
Outubro	22,3548053720834	22,3550214155280	22,3664062394328
Novembro	21,8726398824960	21,8729470999704	21,7963773429535
Dezembro	21,7595817031741	21,7598044809492	21,8492059230979
Média	22,5838727242760	22,5840977787729	22,5219719131615

Fonte: Autor.

Conferindo as médias anuais de temperaturas internas para cada arquivo IDF exportado e comparando-as com o modelo padrão do EnergyPlus, constatou-se na Tabela 7 que a inserção do sistema AVAC ocasionou impacto positivo relevante para a pesquisa e que os modelos de construção com espaços inseridos possuíram as menores diferenças entre os resultados, mais especificamente para o modelo originado no Revit.

Tabela 7 – Diferença das médias dos resultados das simulações para o Case 600

	Média	Diferença
EnergyPlus c/ AVAC	22,5219719131615	-
EnergyPlus s/ AVAC	27,3287189323118	4,80674701915029
Massa_RVT	23,2104993249089	0,68852741174734
Massa_GBS	23,1988742810037	0,67690236784218
Ambientes_RVT	22,3809529155936	0,14101899756791
Ambientes_GBS	22,3809529142990	0,14101899886251
Espaços_RVT	22,5838727242760	0,06190081111443
Espaços_GBS	22,5840977787729	0,06212586561135

Fonte: Autor.

Nota: AVAC = Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado; RVT = Revit; GBS = Green Building Studio.

Apesar da alteração nas dimensões das geometrias exportadas dos modelos de construção com espaços, como foi verificado na seção 4.1.3.1, nas quais aumentaram o volume de ar interno e reduziram a área das superfícies externas para o Case 600, pressupõe-se que estes arquivos possuíram maior similaridade com o modelo de referência devido à possibilidade de domínio no Revit sobre esse tipo de modelagem para se aproximar ainda mais à realidade da edificação estudada, reafirmando que as configurações de energia possuem grande influência nos resultados das simulações.

A partir das análises realizadas, percebeu-se que o processo de exportação dos arquivos no formato IDF (provenientes do Revit ou do EnergyPlus) não produziu diferenças significativas nos resultados das simulações térmicas, com valores similares de temperaturas internas mensais. Entretanto o processo de criação dos modelos no Revit (massas conceituais e elementos de construção com ambientes ou espaços) implicaram em variações de tais resultados, o que influencia na escolha da melhor opção para as exportações.

4.2 PROJETO CASA EFICIENTE

A Casa Eficiente apresentou, em algumas exportações, resultados similares aos verificados no Case 600. No entanto, por ser uma edificação com geometria mais complexa e possuir mais de uma zona térmica, notou-se algumas variações.

4.2.1 Arquivos IFC

O arquivo IFC se reafirmou como extensão inadequada para o processo de simulação térmica de edificações, devido à impossibilidade de conversão de todos os modelos exportados da Casa Eficiente para o formato IDF do EnergyPlus. A necessidade de utilização e correção de erros no programa computacional Space Boundary Tool para essa conversão também desestimula o emprego da extensão IFC.

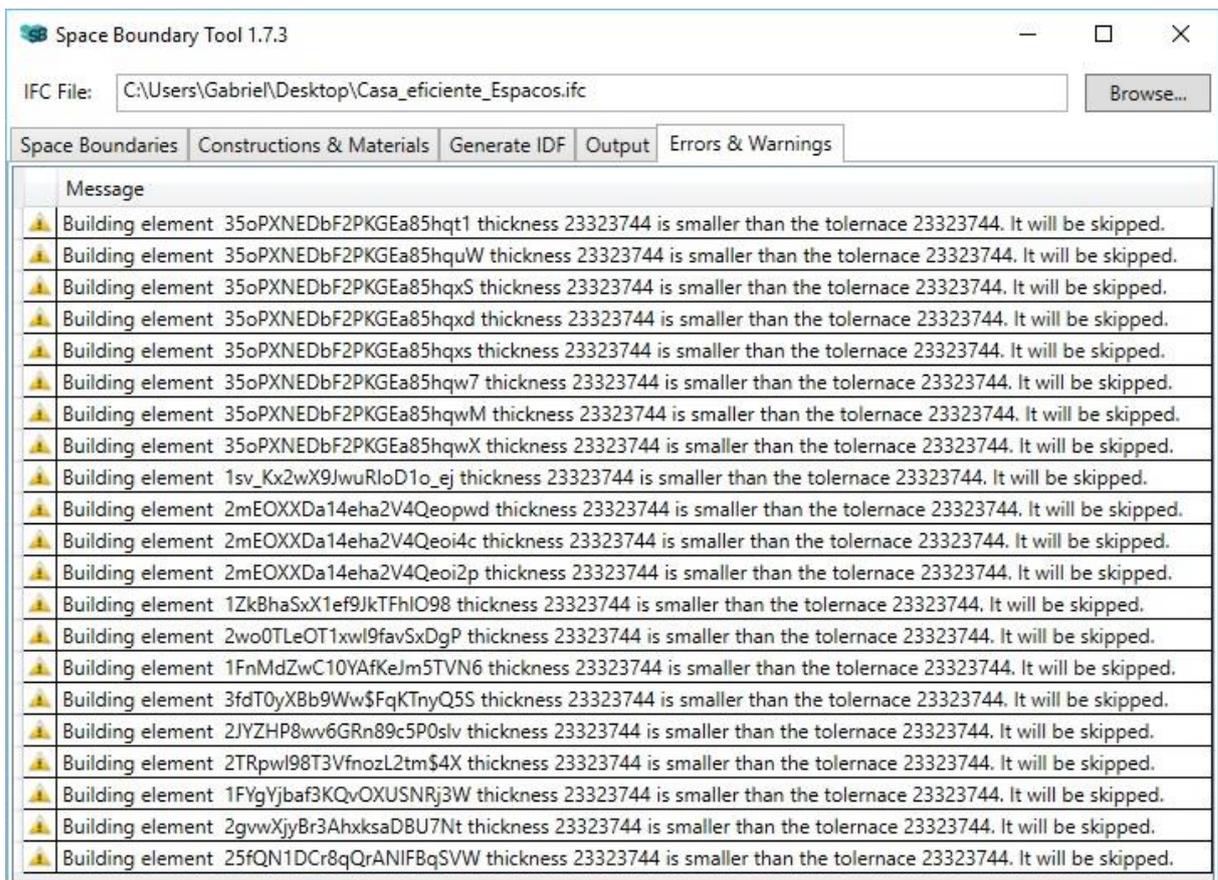
4.2.1.1 *Análise das geometrias*

As geometrias dos três arquivos IFC exportados dos modelos da Casa Eficiente (massas conceituais e elementos de construção com ambientes ou espaços) não

foram reconhecidas no programa Space Boundary Tool, assim como no Case 600 (ver seção 4.1.1.1, p. 121), e com isso não puderam ser visualizadas pelo *plug-in* Legacy OpenStudio no SketchUp.

No modelo de massas conceituais, o programa SBT não reconheceu suas zonas térmicas (ver exemplo da Figura 63, p. 122). Enquanto que nos modelos de construção – com ambientes ou espaços –, o SBT ignorou os elementos geométricos do vidro das janelas por possuírem espessura menor que o valor tolerado (Figura 71). Os erros apontados em ambos os modelos interromperam a conversão dos respectivos arquivos IFC para o formato IDF.

Figura 71 – Avisos sobre a tolerância de espessuras no SBT para a Casa Eficiente



Fonte: Autor com base no programa Space Boundary Tool 1.7.3.

Como nenhum arquivo IFC proveniente dos modelos digitais da Casa Eficiente produzidos no Autodesk Revit pôde ser convertido para o formato IDF, houve a impossibilidade de serem abertos no EnergyPlus. Assim, não foi possível comparar

as configurações e os resultados das simulações propostas com o modelo de referência produzido diretamente no EnergyPlus para analisar a transferência de informações nestes parâmetros.

4.2.2 Arquivos gbXML

Os modelos digitais da Casa Eficiente produzidos no Revit, exportados para arquivos gbXML e convertidos para o formato IDF também apresentaram alternativas viáveis para a realização de simulações térmicas no EnergyPlus. Isto se justifica pela capacidade da extensão gbXML em carregar informações voltadas para a análise energética de edificações.

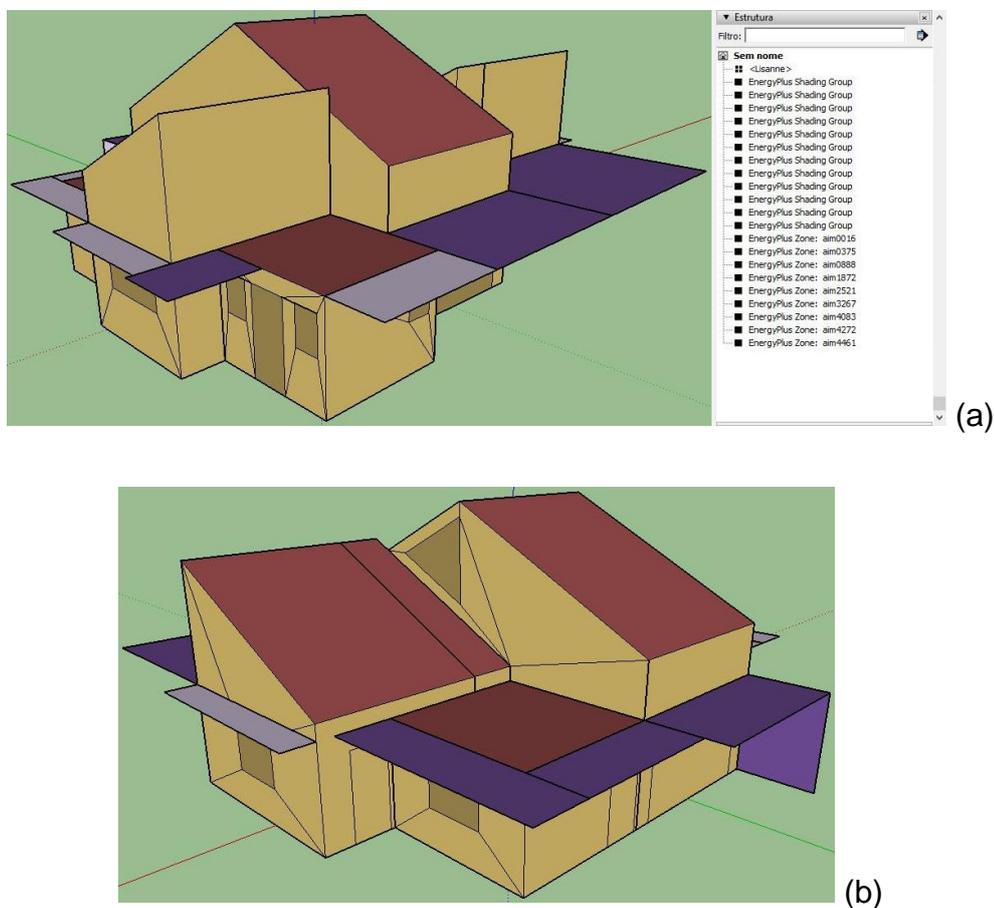
4.2.2.1 Análise das geometrias

Na Casa Eficiente, as variações das geometrias de arquivos gbXML convertidos em formato IDF dependeram dos tipos de modelos digitais produzidos para a edificação e da forma de exportação no Revit, assim como ocorreu no Case 600.

Todos os modelos de massas conceituais exportados – pelo *menu* principal do Revit, ou pelos resultados da análise energética do programa ou pelo Green Building Studio – originaram uma mesma geometria (Figura 72). As distorções na geometria foram similares ao Case 600 (ver Figura 66, p. 125), como as superfícies facetadas de paredes que recebem janelas e estas serem interpretadas como portas. Além disso, algumas portas externas e internas não foram reconhecidas com esta função de porta, sendo somente delimitados seus perímetros nas superfícies das paredes; e alguns elementos de sombreamento tiveram suas superfícies com orientação invertida – com o *plug-in* Legacy OpenStudio no SketchUp, o correto é a representação da cor roxa mais escura estar na superfície que recebe incidência solar.

Apesar dos defeitos apresentados nas exportações com os modelos de massas conceituais, é importante destacar que sua geometria exportada identificou corretamente as superfícies e subsuperfícies quanto a sua condição de contorno, ou seja, como sendo externas ou internas; assim como combinou as superfícies coplanares das zonas térmicas adjacentes, inclusive realizando os recortes necessários de porções de paredes que se relacionam com zonas adjacentes.

Figura 72 – Geometria do modelo de massas conceituais da Casa Eficiente exportado em arquivos gbXML: fachadas (a) leste e sul e (b) oeste e norte



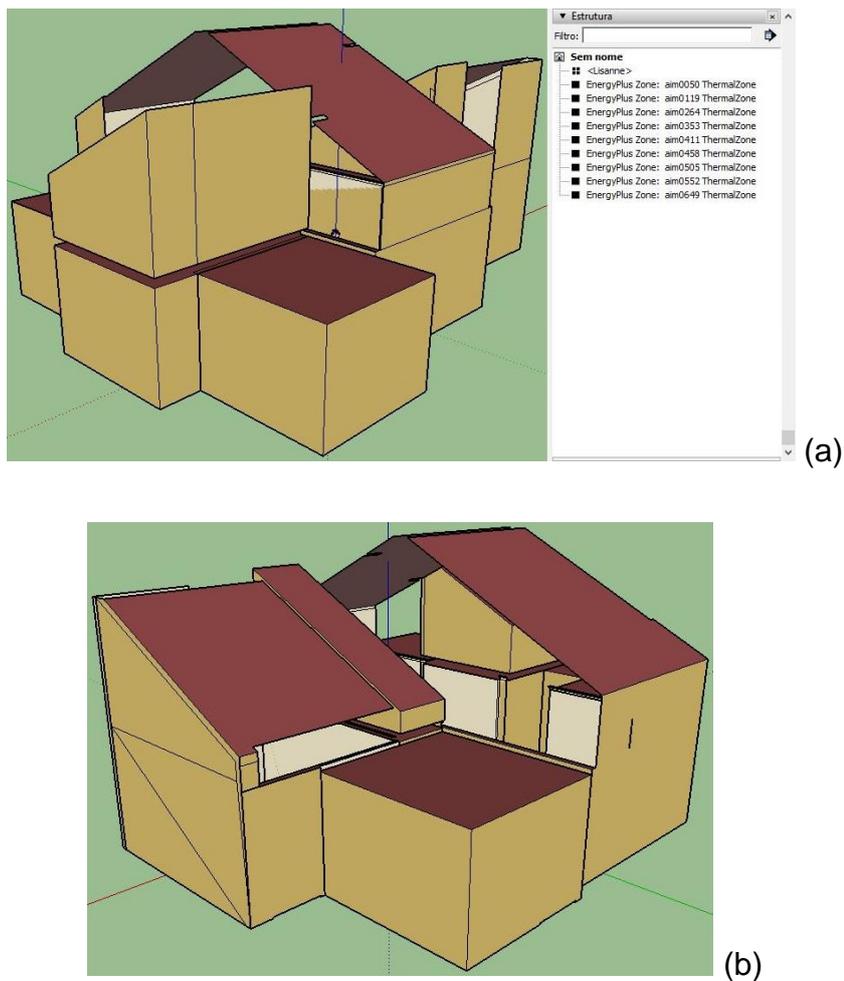
Fonte: Autor com base no programa SketchUp 2016.

As exportações dos modelos de construção da Casa Eficiente para o gbXML reafirmaram que o procedimento empregado para exportar cada modelo interfere nas variações da composição da geometria convertida em IDF. As exportações realizadas a partir do Green Building Studio e dos resultados das análises do Revit geraram uma mesma geometria, que difere da originada a partir do *menu* principal do Revit.

Os modelos de construção exportados a partir do *menu* principal do Revit obtiveram geometrias diferenciadas pela inserção de ambientes ou espaços. Com ambientes (Figura 73), a geometria perdeu informações de algumas superfícies de paredes, que ficaram ausentes no modelo, e outras foram facetadas, além de não ter reconhecido nenhum elemento de porta, janela e sombreamento. Os elementos

construtivos com espessura do Revit também influenciaram na perda de contato entre algumas zonas adjacentes do modelo exportado.

Figura 73 – Geometria do modelo de construção com ambientes da Casa Eficiente exportado em arquivos gbXML do *menu* principal do Revit: fachadas (a) leste e sul e (b) oeste e norte

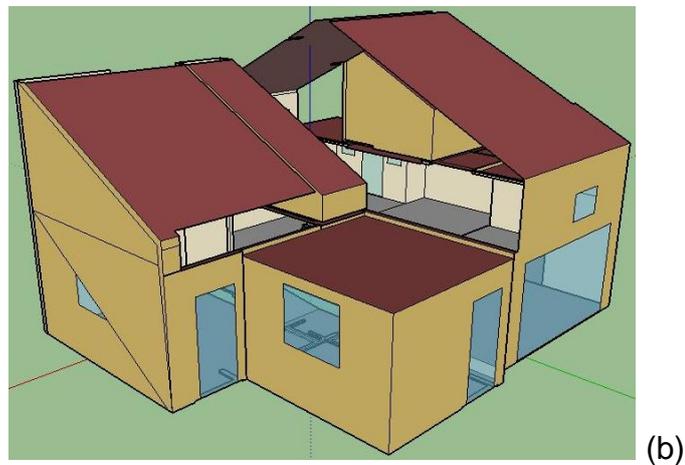
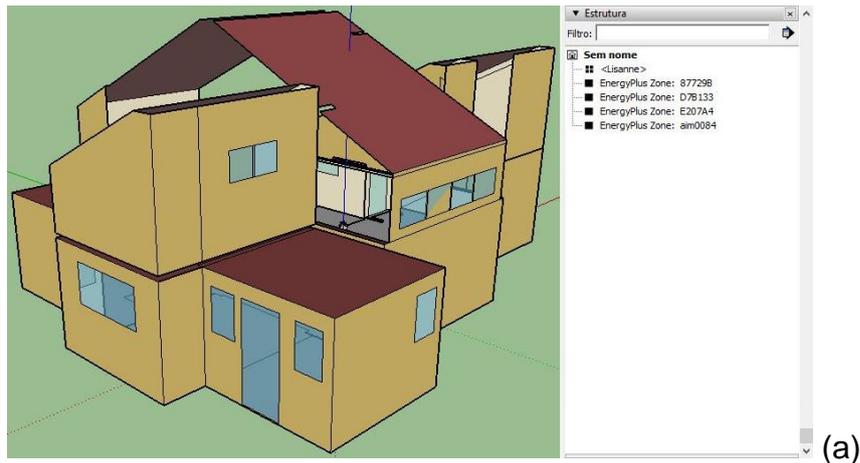


Fonte: Autor com base no programa SketchUp 2016.

No modelo de construção com espaços exportado a partir do *menu* principal do Revit, a diferença com relação à geometria anterior foi a identificação de toda a geometria como uma única zona térmica e o reconhecimento dos elementos de portas e janelas no modelo, como pode ser visualizado na Figura 74. Entretanto as portas foram identificadas como janelas (cor azul translúcida) e algumas janelas presentes no modelo produzido no Revit de acordo com o projeto arquitetônico da casa, que não foram inseridas no modelo de referência do EnergyPlus, foram transportadas para o

modelo exportado, tais como as janelas da zona das caixas d'água no segundo pavimento.

Figura 74 – Geometria do modelo de construção com espaços da Casa Eficiente exportado em arquivos gbXML do *menu* principal do Revit: fachadas (a) leste e sul e (b) oeste e norte

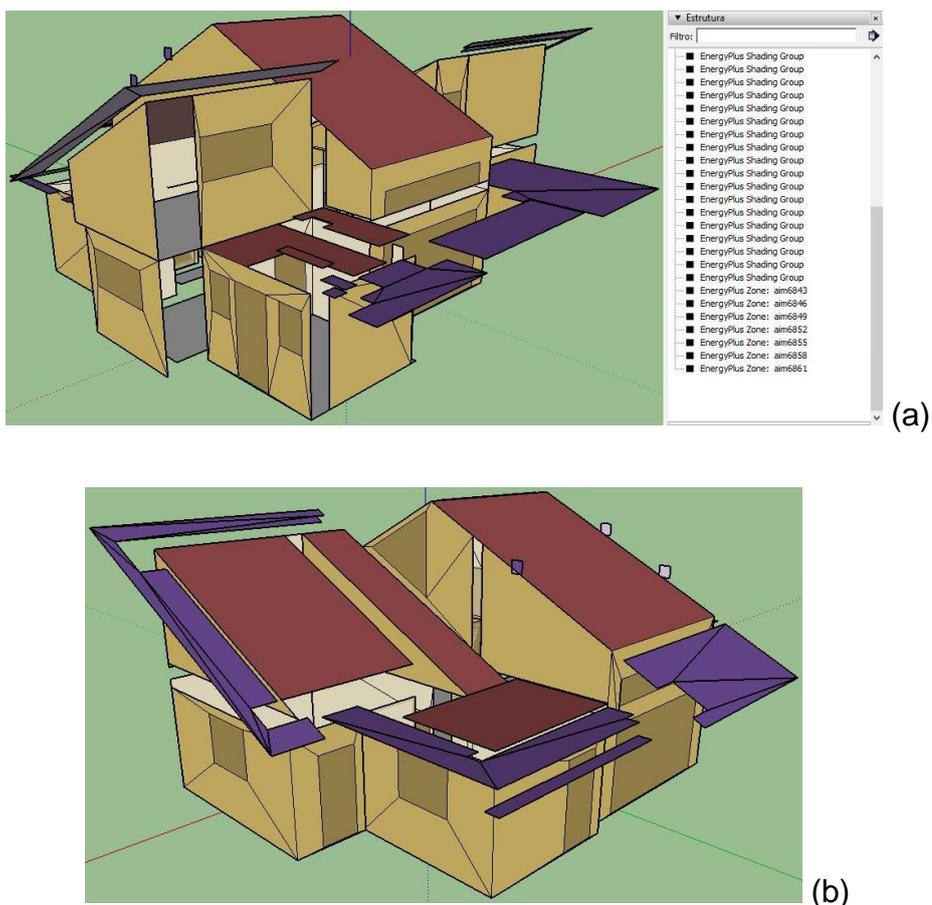


Fonte: Autor com base no programa SketchUp 2016.

Para os modelos de construção com ambientes e com espaços exportados em gbXML diretamente do GBS e a partir dos resultados do Revit, as geometrias originadas foram iguais (Figura 75). Nota-se que a geometria se apresenta ainda mais deformada e poluída, com a ausência de paredes, janelas interpretadas como portas (cor marrom), zonas adjacentes sem contato e superfícies recortadas. Como para estas exportações houve a interferência da análise do Revit com o GBS, acredita-se que essa ampla distorção decorreu da interpretação inadequada do modelo analítico

de energia que foi gerado automaticamente para o modelo de construção da Casa Eficiente (ver Figura 48, p. 107).

Figura 75 – Geometria do modelo de construção da Casa Eficiente exportado em gbXML dos resultados do Revit e do GBS: fachadas (a) leste e sul e (b) oeste e norte



Fonte: Autor com base no programa SketchUp 2016.

Observou-se também que as zonas da sala, da cozinha e do corredor foram identificadas como uma única zona térmica, decorrente do processo de modelagem da Casa Eficiente no Revit que não utilizou paredes para dividir estes cômodos tal como acontece na realidade da edificação; dessa forma o modelo identificou um total de sete zonas térmicas, em vez de nove zonas.

Todas as geometrias exportadas dos modelos de construção do Revit foram extremamente distorcidas, demonstrando que este processo específico de modelagem de informações da edificação (BIM), em que utiliza elementos construtivos

com espessuras para representar com maior proximidade a realidade da edificação, não é adequado para a produção de modelos BEM.

Portanto no caso dos arquivos gbXML do Projeto Casa Eficiente, o modelo de massas conceituais foi o que apresentou a melhor definição de geometria, independentemente do seu processo de exportação. Isto justifica-se devido às corretas dimensões do modelo e à menor ocorrência de erros na transferência e interpretação da edificação após a conversão em formato IDF, ainda que sejam necessárias algumas correções para torná-la mais fiel ao padrão de referência produzido diretamente para o EnergyPlus.

4.2.2.2 Verificação das configurações de simulação

As configurações gerais de simulação nos arquivos gbXML da Casa Eficiente foram idênticas às percebidas no Case 600, tais como a versão dos arquivos convertidos em formato IDF do EnergyPlus, a semelhança entre os arquivos exportados do Green Building Studio e dos resultados das análises de energia do Revit, as características de clima e localização que não foram transferidas do Revit para o arquivo IDF e a alteração da nomenclatura dos objetos no EnergyPlus para denominações genéricas identificadas com números. Recomenda-se ver a seção 4.1.2.2, p. 127, para mais detalhes.

Analisando especificamente cada tipo de modelo produzido no Revit, suas configurações de simulação também foram similares às do Case 600, mas com os parâmetros de acordo com o contexto da edificação da Casa Eficiente. No entanto ressalva-se alguns aspectos diferentes notados nos modelos de construção com ambientes: no arquivo exportado a partir do *menu* do Revit, nem todos os materiais inseridos durante a modelagem no programa foram reconhecidos ou transferidos para o EnergyPlus com os tipos e valores corretos; enquanto que para os arquivos originados a partir dos resultados do Revit e do GBS, foram criados materiais inexistentes para as superfícies facetadas em excesso na geometria e, ao contrário do Case 600, não foram transferidas os regimes específicos para o uso e ocupação da Casa Eficiente definidos no Revit (ver Figura 40, p. 101, e Gráfico 2, p. 102).

No caso dos arquivos gbXML originados da modelagem da Casa Eficiente no programa Revit, nenhum modelo se apresentou adequado quanto às configurações de simulação analisadas para ser convertido em formato IDF, devido à falta de muitas

informações definidas especificamente na modelagem e pela transferência de alguns dados padrões dos programas envolvidos que não retratam a real condição da edificação.

Assim como ocorreu no Case 600, não foi possível executar as simulações propostas com todos os arquivos IDF originais provenientes do formato gbXML exportado da Casa Eficiente, exatamente pela falta de dados mínimos para o processo de simulação, o que ocasionou um *fatal error* em cada tentativa.

4.2.3 Arquivos IDF

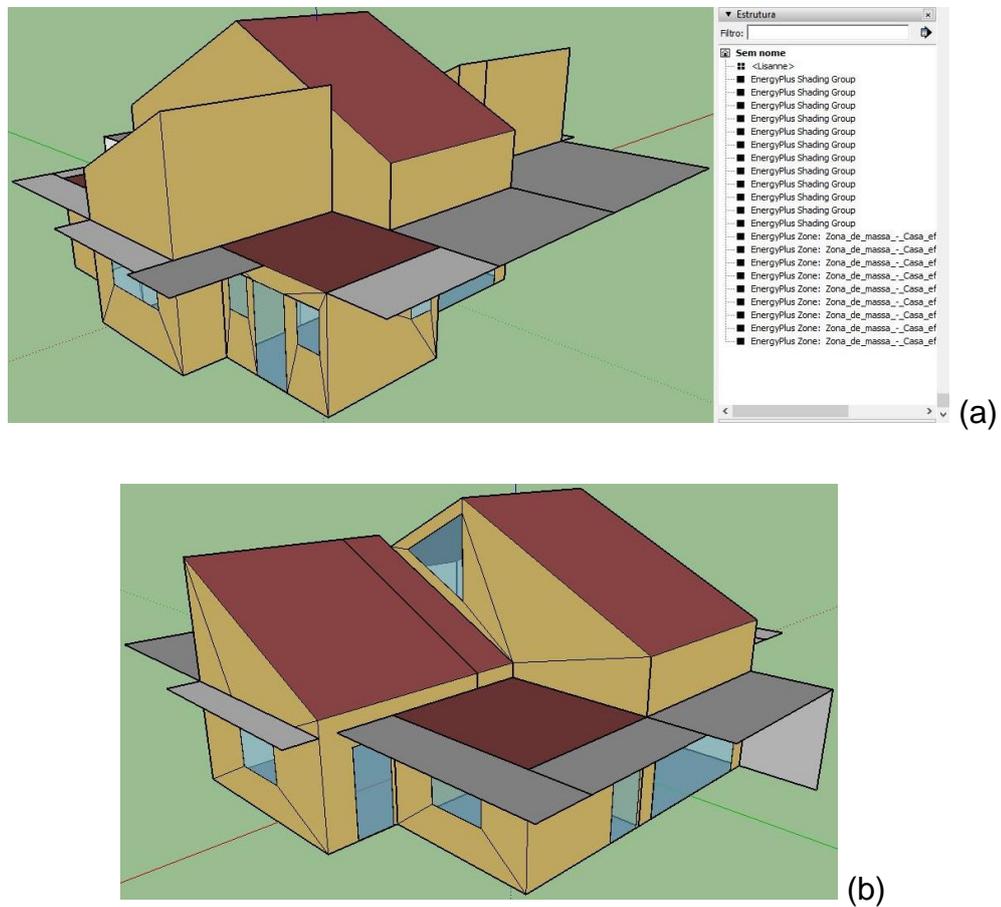
Novamente destaca-se aqui os benefícios da exportação direta de modelos de edificação do Revit para o formato IDF do EnergyPlus, uma vez que não necessita de ferramentas computacionais auxiliares para este processo, eliminando possíveis barreiras e corrompimentos na transferência de informações, tornando-o simples e com potencial para recomendação na interoperabilidade entre os dois programas.

4.2.3.1 Análise das geometrias

De maneira geral para os arquivos IDF originados da Casa Eficiente, as exportações tanto dos resultados da análise de energia do Revit como do Green Building Studio geraram uma mesma geometria para cada tipo de modelo produzido no Revit, sendo que os modelos de construção (com ambientes ou espaços) obtiveram uma mesma configuração de geometria exportada e diferente da observada no modelo de massas conceituais.

As geometrias exportadas do modelo de massas conceituais sofreram algumas distorções que se equivalem com os notados na extensão gbXML (ver Figura 72, p. 141), como recortes nas superfícies das paredes que possuem janelas, todas as portas externas foram interpretadas como janelas (azul translúcido) e as internas não foram reconhecidas pela sua função – somente seus limites foram marcados na geometria – e os elementos de sombreamento foram decodificados como classe de sombreamento externo do entorno da edificação (Figura 76). Todavia, as janelas foram reconhecidas adequadamente no modelo e as superfícies e subsuperfícies da geometria foram combinadas corretamente quando coplanares em zonas térmicas adjacentes.

Figura 76 – Geometria do modelo de massas conceituais da Casa Eficiente exportado em arquivos IDF: fachadas (a) leste e sul e (b) oeste e norte



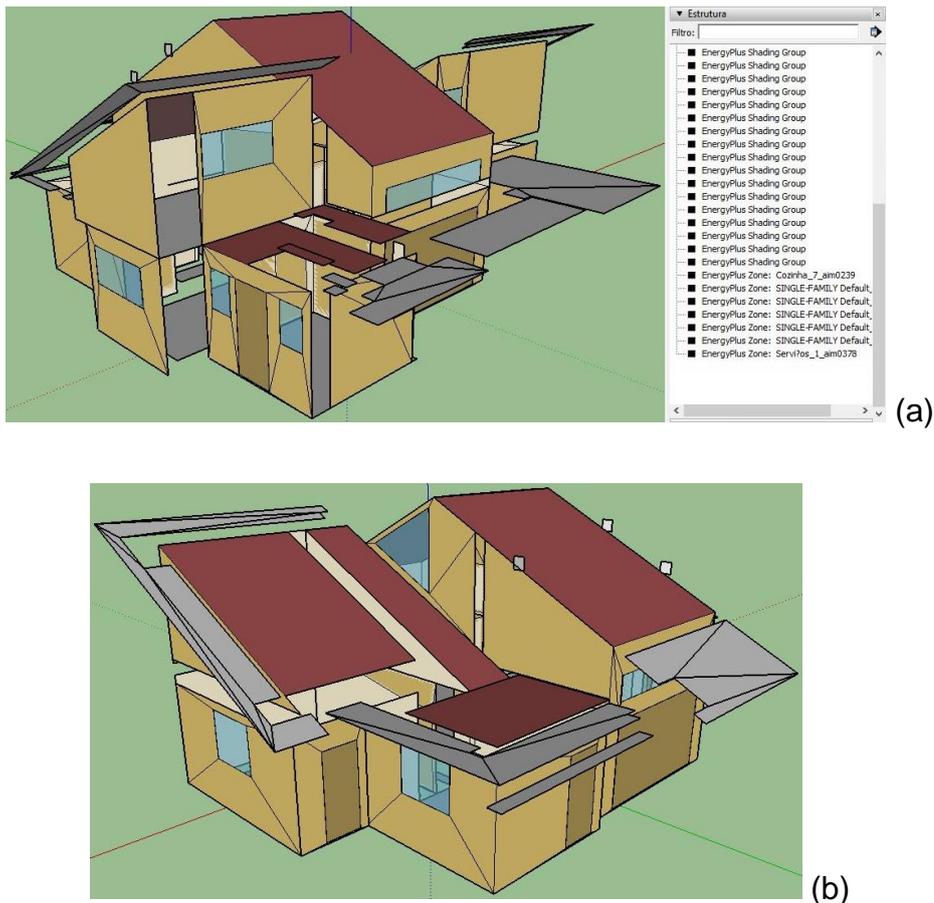
Fonte: Autor com base no programa SketchUp 2016.

Todos os modelos de construção exportados em IDF, demonstrados na Figura 77, apresentaram as mesmas distorções observadas nas dimensões e superfícies da geometria do arquivo gbXML exportado dos resultados do Revit e do GBS (ver Figura 75, p. 144), decorrente da má formação do modelo analítico de energia no Revit. As diferenças foram: as janelas foram identificadas corretamente quanto ao seu tipo, porém em compensação os componentes de sombreamento foram classificados como elementos externos de sombra do terreno. Neste caso também houve o reconhecimento de somente sete zonas térmicas devido a fusão entre sala, cozinha e corredor, como ocorreu nos arquivos gbXML para os modelos de construção.

Para a exportação direta de arquivos IDF da Casa Eficiente, a geometria do modelo de massas conceituais se apresentou como melhor opção, justificada pelas

suas dimensões apropriadas e a manifestação de menos erros na interpretação da edificação após a conversão.

Figura 77 – Geometria dos modelos de construção da Casa Eficiente exportados em arquivos IDF: fachadas (a) leste e sul e (b) oeste e norte



Fonte: Autor com base no programa SketchUp 2016.

4.2.3.2 Verificação das configurações de simulação

A exportação direta dos modelos digitais da Casa Eficiente produzidos no Revit para o formato de arquivo IDF transfere melhor as configurações de simulação inseridas na edificação se comparadas com as extensões IFC e gbXML.

Com o modelo de massas conceituais exportado a partir do Revit e do Green Building Studio foram transportados os mesmos tipos de configurações de simulação

observados no Case 600, ressaltando o contexto para a Casa Eficiente, como: dados sobre a edificação; os regimes e cargas térmicas de uso e operação da edificação, inclusive para a iluminação que foi considerada ausente no modelo de referência do EnergyPlus, e do sistema AVAC com configurações padrão do GBS para o tipo de habitação unifamiliar; e as propriedades térmicas dos materiais definidas pelas construções conceituais do Revit (ver Figura 43, p. 104).

No arquivo IDF do modelo de massas conceituais originado no Green Building Studio houve uma diferença com relação ao Case 600 quanto às informações sobre a localização geográfica da edificação: não foram transferidos os dados da estação climática definida no serviço de mapeamento na internet do Revit. No arquivo IDF proveniente dos resultados das análises de energia do Revit tais informações também não estão presentes.

Para ambos os arquivos IDF dos modelos de construção exportados com ambientes foram carregados os mesmos tipos de informações dos arquivos dos modelos de massas conceituais acima. Houve uma variação na quantidade de objetos de configuração transferidos em alguns dados, como para as *schedules* e cargas de uso e ocupação, porém os valores permaneceram idênticos. Assim como no Case 600, as propriedades térmicas dos materiais foram transportadas dos materiais definidos no Revit (ver Figura 46-b, p. 106), mas também foram criados materiais inexistentes para o excesso de superfícies facetadas.

As configurações de simulação exportadas para os dois arquivos IDF provenientes do modelo de construção com espaços foram as mesmas se comparadas com o modelo com ambientes inseridos. No entanto foi encontrada uma variação nos padrões de uso e ocupação que foram mais referentes às configurações do tipo de construção/espaço definidas no Revit para a Casa Eficiente (ver Figura 40, p. 101, Figura 51, p. 110, e Figura 52, p. 111): foram transferidos os regimes de uso de equipamentos, da ocupação da área de serviços e das atividades de limpeza e em pé, porém outras *schedules* definidas no Revit não foram encontradas no arquivo IDF, como para as ocupações da sala e do quarto de casal e para a atividade sentado; e quanto às cargas térmicas, os valores para ocupantes da cozinha e da área de serviços foram corretamente transportadas, diferentemente do quarto de casal e dos equipamentos (geladeira e computador) que estão ausentes.

Independentemente do processo de exportação do arquivo IDF, o modelo de construção com espaços da Casa Eficiente se apresenta como opção mais

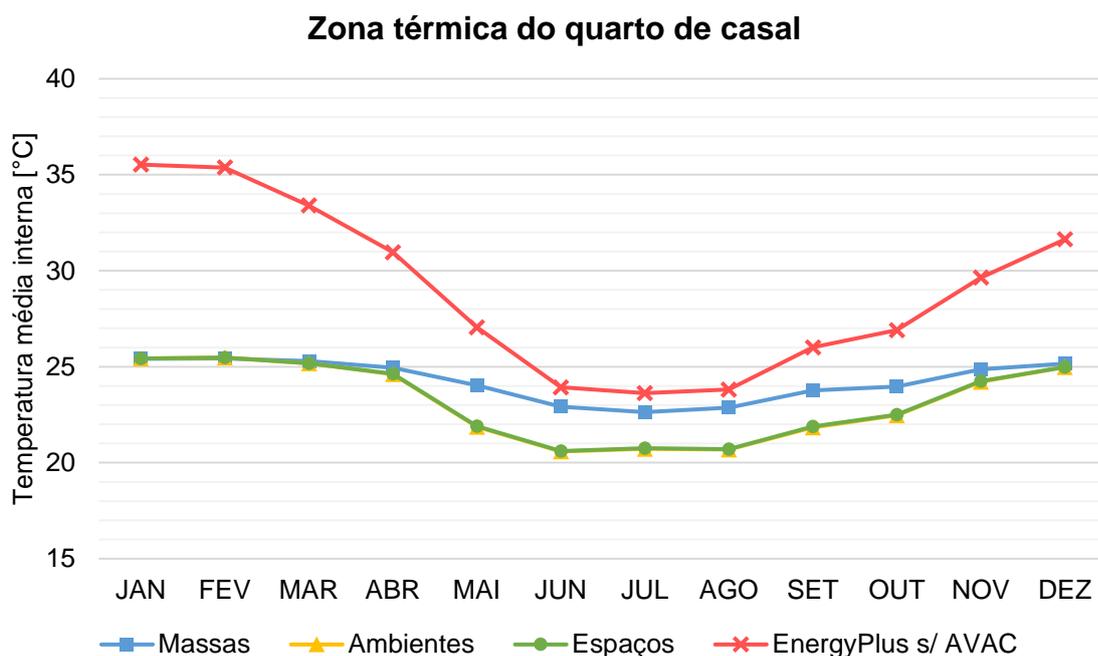
recomendada para a transferência das configurações de simulação analisadas, devido à troca de muitas informações definidas durante a modelagem no programa Revit que o torna mais fiel ao modelo de referência produzido diretamente no EnergyPlus e mais vantajoso com relação ao formato gbXML.

4.2.3.3 Comparação entre os resultados das simulações

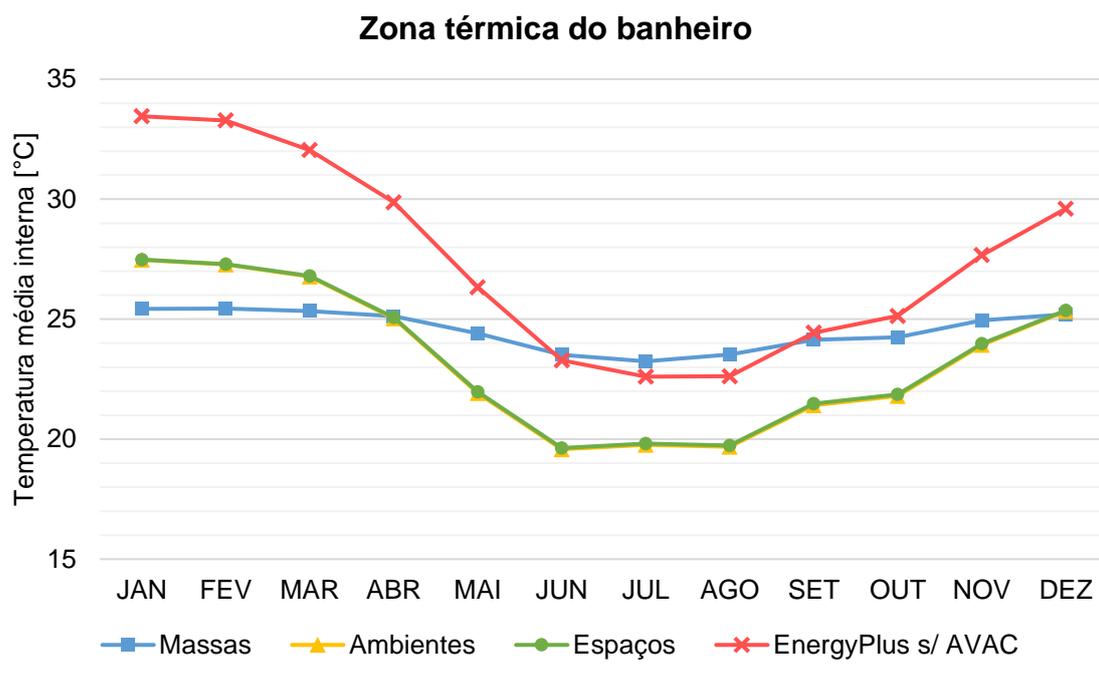
Do mesmo modo como ocorreu no Case 600, os arquivos IDF originais exportados dos modelos da Casa Eficiente foram os únicos formatos possíveis para realizar as simulações térmicas, com variações nos resultados refletidas pelas diferenças de configurações de cada modelo.

Após as simulações iniciais, pode ser percebido visualmente no Gráfico 5 que, em ambas as zonas avaliadas, os resultados das simulações dos arquivos IDF exportados obtiveram temperaturas com valores abaixo dos resultantes do modelo de referência do EnergyPlus (linha vermelha), devido à transferência do sistema AVAC inserido obrigatoriamente nas configurações do Revit e pela falta de algumas cargas térmicas que não foram transferidas para os arquivos.

Gráfico 5 – Comparação entre os resultados das simulações iniciais para as zonas do (a) quarto de casal e do (b) banheiro da Casa Eficiente



(a)



Fonte: Autor.

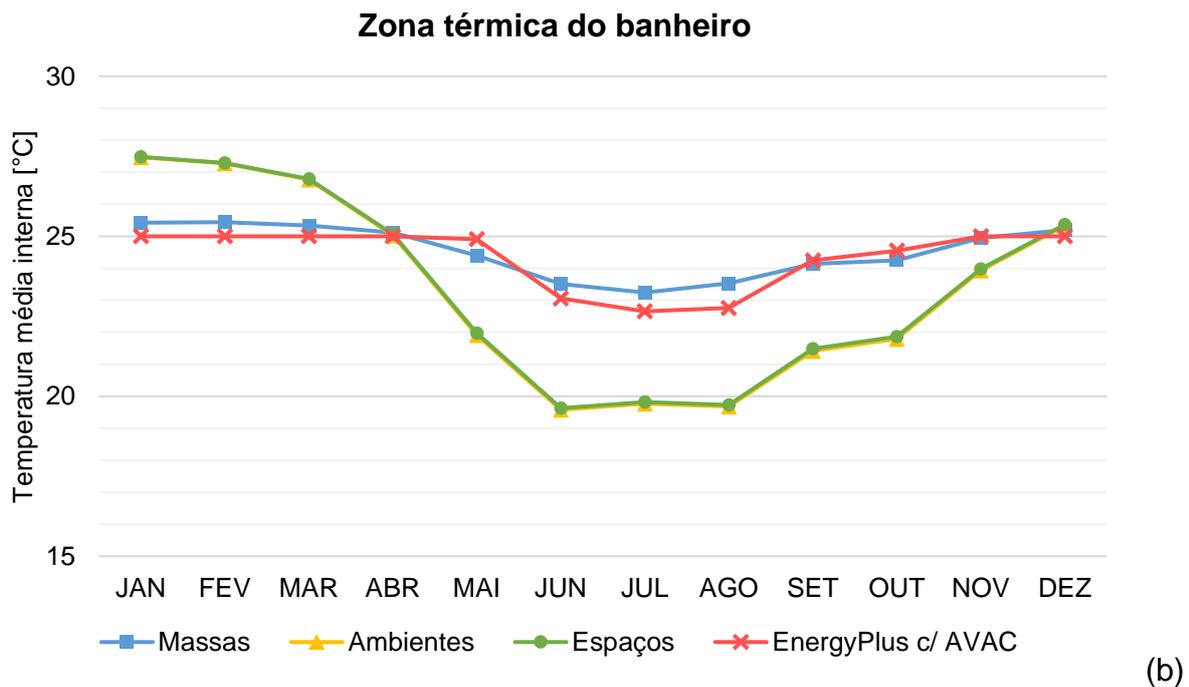
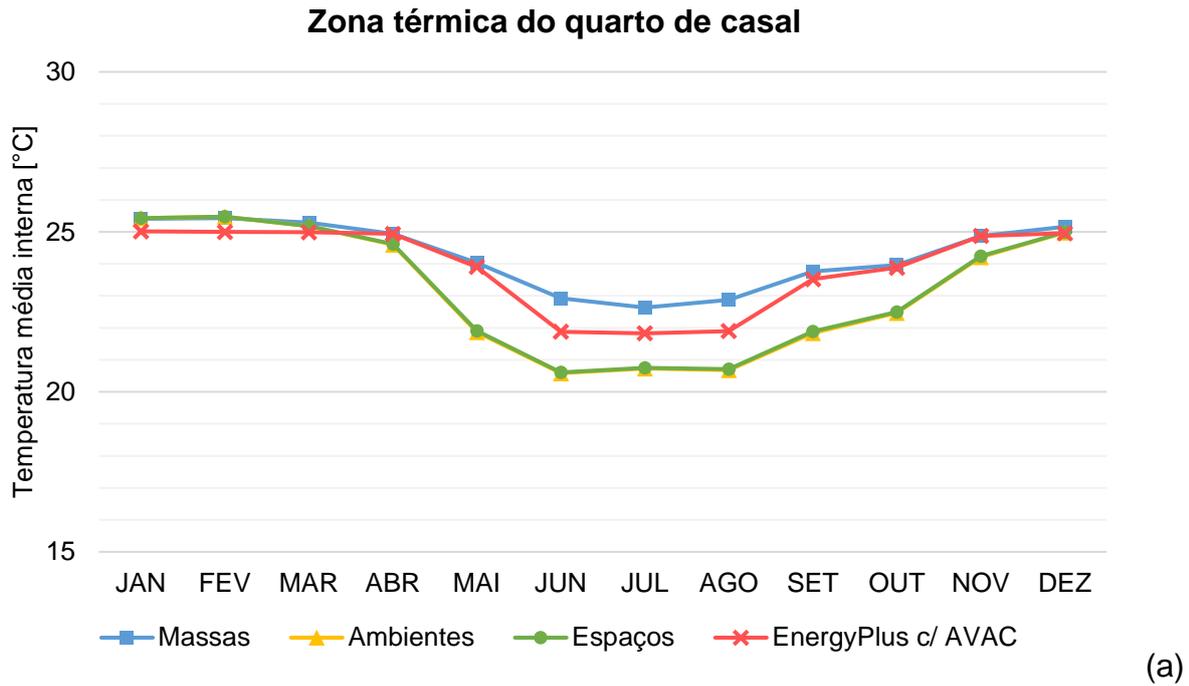
Esta discrepância nos resultados foi corrigida pela configuração do modelo do EnergyPlus da Casa Eficiente como também climatizado artificialmente. O sistema AVAC – tipo PTHP, *setpoint* do termostato entre 20 e 25 °C e com funcionamento sem interrupções ao longo do ano – teve que ser inserido em todas as zonas térmicas do modelo do EnergyPlus para se equivaler ao que foi encontrado nos modelos do Revit após suas exportações.

Após isso, as simulações finais evidenciaram, tanto para a zona do quarto de casal como para a do banheiro, uma diferença insignificante nas temperaturas internas mensais entre as formas de exportação (a partir do Revit ou do Green Building Studio) para cada tipo de modelo digital (massas conceituais e elementos de construção com ambientes ou espaços).

Quando os modelos exportados foram comparados com o modelo de referência, o Gráfico 6 demonstrou que a inserção do sistema AVAC no modelo do EnergyPlus o tornou mais coerente com os modelos do Revit, principalmente com os modelos de massas conceituais, pois estes apresentaram poucas deformações em sua geometria após as exportações em relação ao modelo-base (ver Figura 72, p. 141). A zona térmica do quarto de casal apresentou linhas de resultados de todos os modelos com perfis de curvatura similares e uma diferença de no máximo 2°C com o

modelo de referência; enquanto que no banheiro, os modelos de construção (com ambientes ou espaços) apresentaram variação maior em relação aos resultados de referência e as massas conceituais exibiram valores mais próximos ao EnergyPlus.

Gráfico 6 – Comparação entre os resultados das simulações finais para as zonas do (a) quarto de casal e do (b) banheiro da Casa Eficiente



Além da evidente diferença nas geometrias e configurações de simulação, um dos motivos que também contribuiu para essa variação nos resultados foram as diferenças das temperaturas mensais do solo utilizadas em cada arquivo: nos modelos do Revit foram adotadas as temperaturas transferidas automaticamente para o EnergyPlus, enquanto que o modelo criado no EnergyPlus utilizou os valores pré-processados, pela ferramenta Slab, do arquivo climático TRY da cidade de Florianópolis. Foi realizado o mesmo teste-piloto para o Case 600, no qual se isolou a variável igualando as temperaturas do solo em todos os arquivos exportados, e neste caso comprovou-se a influência do solo na variação das temperaturas internas da Casa Eficiente devido ao piso da edificação com pouca espessura.

Para o modelo de massas conceituais, ambas as exportações transportaram geometrias e configurações de simulação análogas e assim os resultados das simulações também foram idênticos. A Tabela 8 demonstra estes valores iguais para os resultados das zonas térmicas do quarto de casal e do banheiro do modelo exportado no Revit e no GBS, que condisseram com o modelo-base do EnergyPlus, mesmo com a transferência das configurações padrão do Revit.

Tabela 8 – Resultados das simulações com modelos de massas conceituais para as zonas do quarto de casal e do banheiro da Casa Eficiente

(continua)

	Revit [°C]	Green Building Studio [°C]	EnergyPlus c/ AVAC [°C]
Quarto de casal			
Janeiro	25,41336653	25,41336652	25,01678634
Fevereiro	25,43131491	25,43131491	24,99998657
Março	25,29420445	25,29420445	24,98930665
Abril	24,94422184	24,94422184	24,93823236
Maio	24,02836813	24,02836813	23,90632137
Junho	22,92290116	22,92290116	21,88107002
Julho	22,63485002	22,63485001	21,82860637
Agosto	22,87301166	22,87301166	21,89926277
Setembro	23,76685467	23,76685466	23,52351190
Outubro	23,96741039	23,96741039	23,87931919
Novembro	24,86862470	24,86862470	24,87181443
Dezembro	25,16315530	25,16315530	24,95722989
Média	24,27569031	24,27569031	23,89095399
Banheiro			
Janeiro	25,42347207	25,42347207	24,99999996
Fevereiro	25,44193829	25,44193829	24,99999999

Tabela 8 – Resultados das simulações com modelos de massas conceituais para as zonas do quarto de casal e do banheiro da Casa Eficiente

(conclusão)

	Revit [°C]	Green Building Studio [°C]	EnergyPlus c/ AVAC [°C]
		Banheiro	
Março	25,33865182	25,33865182	25,00000000
Abril	25,11710675	25,11710675	25,00000000
Mai	24,40016296	24,40016296	24,90983580
Junho	23,51559996	23,51559996	23,05933498
Julho	23,24268571	23,24268571	22,65353447
Agosto	23,52598590	23,52598590	22,75822013
Setembro	24,14104675	24,14104675	24,24745567
Outubro	24,24517991	24,24517991	24,55297998
Novembro	24,94994449	24,94994449	25,00000000
Dezembro	25,20161735	25,20161735	25,00000000
Média	24,54528266	24,54528266	24,34844675

Fonte: Autor.

No modelo de construção com ambientes (Tabela 9), a diferença entre os resultados dos arquivos exportados também é praticamente nula nas duas zonas analisadas, pela transferência similar das informações com ressalva para a pequena variação identificada na quantidade de objetos de configuração transferidos. No entanto, além de sua geometria exportada ter sido extremamente desconfigurada (ver Figura 77, p. 148), o tipo de modelagem no Revit com inserção de ambientes, que não permite um alto controle das características de cada zona, e algumas configurações padrão transferidas do Revit fizeram com que seus resultados fossem desviados do modelo de referência do EnergyPlus.

Tabela 9 – Resultados das simulações com modelos de construção com ambientes para as zonas do quarto de casal e do banheiro da Casa Eficiente

(continua)

	Revit [°C]	Green Building Studio [°C]	EnergyPlus c/ AVAC [°C]
		Quarto de casal	
Janeiro	25,43064471	25,43064467	25,01678634
Fevereiro	25,47497549	25,47497547	24,99998657
Março	25,17529913	25,17529905	24,98930665
Abril	24,60607682	24,60607658	24,93823236
Mai	21,87180468	21,87180440	23,90632137

Tabela 9 – Resultados das simulações com modelos de construção com ambientes para as zonas do quarto de casal e do banheiro da Casa Eficiente

	Revit [°C]	Green Building Studio [°C]	EnergyPlus c/ AVAC [°C]
(conclusão)			
Quarto de casal			
Junho	20,58494281	20,58494266	21,88107002
Julho	20,72553104	20,72553090	21,82860637
Agosto	20,68524121	20,68524106	21,89926277
Setembro	21,83991559	21,83991530	23,52351190
Outubro	22,46176718	22,46176692	23,87931919
Novembro	24,21149504	24,21149477	24,87181443
Dezembro	24,97711696	24,97711684	24,95722989
Média	23,17040089	23,17040072	23,89095399
Banheiro			
Janeiro	27,47244233	27,47243980	24,99999996
Fevereiro	27,27799055	27,27798800	24,99999999
Março	26,77760690	26,77760431	25,00000000
Abril	25,02606337	25,02606100	25,00000000
Maiο	21,91009382	21,91009162	24,90983580
Junho	19,57782255	19,57782058	23,05933498
Julho	19,76829468	19,76829274	22,65353447
Agosto	19,67931521	19,67931335	22,75822013
Setembro	21,41417121	21,41416910	24,24745567
Outubro	21,79821958	21,79821744	24,55297998
Novembro	23,92945080	23,92944841	25,00000000
Dezembro	25,33681834	25,33681593	25,00000000
Média	23,33069078	23,33068852	24,34844675

Fonte: Autor.

Quanto ao modelo de construção com espaços, verificou-se o mesmo padrão encontrado nos arquivos exportados, com médias equivalentes entre os tipos de exportação para as temperaturas internas em ambas as zonas do quarto de casal e do banheiro, como podem ser visualizadas na Tabela 10. A geometria exportada distorcida, a inconsistência na transferência de determinados dados e a ausência no arquivo de alguns dos padrões de uso e ocupação definidos no Revit para a Casa Eficiente foram as causas da discordância entre os resultados destas exportações e do modelo de referência.

Tabela 10 – Resultados das simulações com modelos de construção com espaços para as zonas do quarto de casal e do banheiro da Casa Eficiente

	Revit [°C]	Green Building Studio [°C]	EnergyPlus c/ AVAC [°C]
Quarto de casal			
Janeiro	25,43180976	25,43180973	25,01678634
Fevereiro	25,47548459	25,47548457	24,99998657
Março	25,18154833	25,18154825	24,98930665
Abril	24,62467396	24,62467374	24,93823236
Maió	21,90997192	21,90997164	23,90632137
Junho	20,60781454	20,60781439	21,88107002
Julho	20,74816458	20,74816443	21,82860637
Agosto	20,70571015	20,70571001	21,89926277
Setembro	21,88293631	21,88293601	23,52351190
Outubro	22,49824470	22,49824444	23,87931919
Novembro	24,23953272	24,23953246	24,87181443
Dezembro	24,98573040	24,98573028	24,95722989
Média	23,19096850	23,19096833	23,89095399
Banheiro			
Janeiro	27,48280927	27,48280676	24,99999996
Fevereiro	27,28715517	27,28715265	24,99999999
Março	26,79732987	26,79732731	25,00000000
Abril	25,06625270	25,06625030	25,00000000
Maió	21,97478793	21,97478568	24,90983580
Junho	19,62987647	19,62987447	23,05933498
Julho	19,81859546	19,81859350	22,65353447
Agosto	19,72949091	19,72948897	22,75822013
Setembro	21,48295952	21,48295734	24,24745567
Outubro	21,86137010	21,86136796	24,55297998
Novembro	23,98066771	23,98066539	25,00000000
Dezembro	25,36412420	25,36412182	25,00000000
Média	23,37295161	23,37294935	24,34844675

Fonte: Autor.

Realizando a comparação das médias anuais de temperaturas internas para cada arquivo IDF exportado com o modelo padrão do EnergyPlus, constatou-se pelos valores contidos na Tabela 11 que, para as duas zonas consideradas, os arquivos gerados dos modelos de massas conceituais possuíram a menor diferença entre os resultados, como já justificada pela melhor manutenção de sua geometria após o processo de exportação.

Tabela 11 – Diferença das médias dos resultados das simulações para as zonas do quarto de casal e do banheiro da Casa Eficiente

	Média [°C]	Diferença [°C]
Quarto de casal		
EnergyPlus c/ AVAC	23,89095399	-
EnergyPlus s/ AVAC	28,98953866	5,09858467
Massa_RVT	24,27569031	0,38473633
Massa_GBS	24,27569031	0,38473632
Ambientes_RVT	23,17040089	0,72055310
Ambientes_GBS	23,17040072	0,72055327
Espaços_RVT	23,19096850	0,69998549
Espaços_GBS	23,19096833	0,69998566
Banheiro		
EnergyPlus c/ AVAC	24,34844675	-
EnergyPlus s/ AVAC	27,52576625	3,17731950
Massa_RVT	24,54528266	0,19683591
Massa_GBS	24,54528266	0,19683591
Ambientes_RVT	23,33069078	1,01775597
Ambientes_GBS	23,33068852	1,01775823
Espaços_RVT	23,37295161	0,97549514
Espaços_GBS	23,37294935	0,97549740

Fonte: Autor.

Nota: AVAC = Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado; RVT = Revit; GBS = Green Building Studio.

Devido às possibilidades de configuração no processo de modelagem no programa Revit para uma edificação mais complexa, com a presença de várias zonas térmicas e a variedade de materiais em seus componentes construtivos, o modelo digital da Casa Eficiente evidenciou que a correta configuração da geometria possui papel relevante para a confiabilidade dos resultados, uma complementação do que se induziu a partir dos resultados para o Case 600. Por este motivo, o modelo de massas conceituais apresentou os resultados mais similares ao modelo de referência do EnergyPlus, mesmo com suas configurações padrão que podem se distanciar da fidelidade à realidade da edificação.

4.3 ANÁLISES GERAIS

No Autodesk Revit, foram identificados três tipos de modelos digitais disponíveis com diferentes configurações para as exportações: os modelos com

massas conceituais e com elementos de construção com ambientes ou espaços inseridos. Entretanto, a impossibilidade de eliminar o sistema AVAC nas configurações do Revit antes das exportações, limita o programa para análises em edificações climatizadas naturalmente ou sem climatização artificial.

Percebeu-se que os modelos de massas conceituais apresentam processo de modelagem similar ao realizado com o *plug-in* Legacy OpenStudio 1.0.14 vinculado ao programa SketchUp 2016 para a produção das geometrias de modelos energéticos utilizados em simulações no EnergyPlus. Com isso sua geometria é simplificada como recomendada para modelos BEM, sua produção é a mais rápida e fácil do Revit e apresenta benefícios para os profissionais que os utilizam desde as etapas iniciais do projeto arquitetônico para estudos preliminares e pretendem utilizá-los para análises da edificação. Por serem destinadas para tais estudos iniciais, no entanto, as massas conceituais possuem a desvantagem de serem configuradas somente com opções genéricas oferecidas pelo Revit, que podem não condizer com a realidade de uma edificação já planejada ou construída.

Ambos os modelos de construção traduzem perfeitamente o conceito do BIM no Autodesk Revit, pois representam a realidade das edificações com fidelidade. Portanto, seus elementos construtivos possuem características reais e com isto são mais complexos, demandando mais tempo para a sua produção e provocando distorções nas geometrias exportadas de acordo com a complexidade dos modelos. A inserção de ambientes ou espaços no modelo interfere nas configurações de energia que são manipuladas de acordo com as necessidades de análise, na qual os espaços inseridos possuem maior controle, que os torna mais adequados no quesito sobre configurações para simulações térmicas. Todavia as opções de configuração no Revit são limitadas quando comparadas com a variedade de parâmetros encontrados no EnergyPlus.

A partir desses modelos BIM do Autodesk Revit, também foi reconhecida a disponibilidade de exportações em três formatos de arquivos para serem convertidos e abertos no EnergyPlus: as extensões IFC, gbXML e IDF.

O tipo de arquivo IFC se confirmou como meio de troca de informações específico entre *softwares* BIM, e não para programas de simulação de edificações; por este motivo se apresenta como inadequado para o processo estudado de exportação de modelos digitais. A ferramenta auxiliar Space Boundary Tool, utilizada para realizar a sua conversão em formato apropriado para o EnergyPlus, também não

reconhece as zonas dos modelos por estar ultrapassada com relação à versão atual do Revit e com isto não é possível finalizar as conversões.

A extensão gbXML proporciona opções viáveis para que as geometrias dos modelos exportados sejam utilizadas no EnergyPlus, dependendo do tipo de modelagem no Autodesk Revit. Entretanto não transfere com eficiência as configurações de simulação inseridas no Revit quando convertidas pelo programa OpenStudio 1.10.0, devido à ausência de dados essenciais para a possibilidade de execução das simulações no EnergyPlus.

O arquivo de entrada de dados IDF para o EnergyPlus possui a possibilidade de ser exportado diretamente a partir dos modelos produzidos no Revit, o que se apresenta como vantagem por não haver a necessidade de conversão com ferramentas auxiliares, que poderiam implicar em perdas no processo, e pela transferência da maioria das informações configuradas em cada modelo que permite a realização das simulações sem a necessidade de correção nos arquivos.

As edificações utilizadas como estudos de caso na investigação – o Case 600 da norma ASHRAE Standard 140 e o Projeto Casa Eficiente localizado em Florianópolis – demonstraram que a complexidade da construção, refletida nas diferentes conformações de modelagem no Autodesk Revit, interfere principalmente na geometria quando exportada a partir de modelos com elementos de construção, de maneira que será maior a distorção à medida que for mais complexa a edificação.

5 CONCLUSÃO

O programa computacional Autodesk Revit 2016 se apresentou como um sistema de tecnologia BIM com diferentes possibilidades de modelagem virtual de edificações e de exportação de modelos para a ferramenta EnergyPlus 8.4.0 para a realização de simulações térmicas do ambiente construído, nas quais cada variação implicou em distintos resultados. Apesar disso, ainda foi importante avaliá-las por meio de parâmetros de comparação para as duas edificações estudadas, tais como: geometria, configurações e resultados de simulação.

Quanto à geometria, as melhores conformações são apresentadas pelas exportações com modelos de massas conceituais, devido à manutenção das dimensões das zonas térmicas definidas no programa Autodesk Revit e a menor ocorrência de distorções em seus componentes, não havendo variações discrepantes entre os tipos de arquivos. Especificamente os modelos de massas conceituais exportados em arquivo gbXML demandam menos correções de erros, independentemente do processo de exportação no Revit (a partir do menu principal do programa, dos resultados das análises no programa ou do Green Building Studio).

Para as configurações de simulação, como por exemplo as propriedades térmicas dos materiais, padrões de uso e ocupação etc., ficou evidente que os modelos de construção com espaços inseridos e exportados em arquivos IDF são os mais indicados. Isto justifica-se por possuírem maior controle e transportarem informações específicas e necessárias para executar as simulações de acordo com a realidade da edificação, independentemente do modo de exportação – seja pelo Revit ou pelo GBS.

Em relação aos resultados das simulações no EnergyPlus, utilizando os arquivos convertidos dos modelos produzidos no Revit e obtendo valores de saída para as temperaturas médias mensais das zonas térmicas, o formato IDF foi o único tipo de arquivo que permitiu a execução das simulações sem a necessidade de correções. Porém, todos estes modelos digitais exportados em arquivo IDF apresentaram resultados muito divergentes daqueles obtidos pelos modelos de referência criados diretamente para o EnergyPlus com as duas edificações de testes, pelos motivos de inconsistência na transferência das geometrias e de configurações de simulação, sendo necessária a inserção de sistema AVAC para garantir a consistência na comparação entre os resultados.

Ponderando todos os elementos analisados nas duas edificações utilizadas como estudos de caso, para as possibilidades de modelos digitais do Autodesk Revit, de formatos de arquivo exportados e convertidos e os parâmetros de comparação com os modelos de referência, os modelos de massas conceituais exportados em arquivos gbXML apresentaram-se como opção mais viável para utilização em simulações térmicas de edificações no programa EnergyPlus.

Ainda que suas configurações de simulação sejam padronizadas no Revit, a modelagem com massas conceituais manteve com mais fidelidade a geometria das edificações, de modo que é mais interessante priorizar a transferência da geometria com menos erros, pois é o elemento primário a ser criado no processo convencional para a geração de modelos BEM utilizando o SketchUp e o EnergyPlus, para depois serem acrescentadas as configurações de simulação. No entanto, a utilização de massas conceituais não elimina a necessidade de algumas correções na geometria.

Constatou-se que o Autodesk Revit também não possui um sistema de configuração adequado para a modelagem energética de edificações. Portanto a exportação de modelos digitais a partir do Revit não é recomendada para a utilização em processos de simulação térmica no EnergyPlus, devido ao retrabalho diante da necessidade de correções e inserção de configurações essenciais para a simulação.

Conclui-se que não é perfeita a interoperabilidade do Autodesk Revit 2016 para o EnergyPlus 8.4.0 para simulações térmicas de edificações, pois existe a possibilidade de transferência de informações entre os programas, entretanto esta troca é incompleta devido às distorções nas geometrias e a falta de alguns dados necessários para a correta simulação. Sendo assim, ainda se mantém recomendado o difundido processo de produção de modelos energéticos para o EnergyPlus a partir do *plug-in* Legacy OpenStudio no SketchUp.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No intuito de ampliar a fronteira do conhecimento nessa área de pesquisa em interoperabilidade entre programas computacionais para a realização de simulações térmicas em edificações, recomenda-se para trabalhos futuros:

- a) realizar testes de sensibilidade para analisar a correlação de cada modelagem e configuração do Autodesk Revit com os resultados das exportações e simulações;

- b) ajustar os erros decorrentes das exportações e conversões, como a falta de informações necessárias para as simulações;
- c) empregar outras tipologias de edificações, como por exemplo edifícios em altura, para verificar as diferenças nas distorções das geometrias de acordo com a complexidade do modelo;
- d) analisar outras ferramentas de tecnologia BIM, de simulação e de apoio, como o DesignBuilder que possui um plug-in de interoperabilidade com modelos BIM através de sua capacidade de importar arquivos gbXML e modelos arquitetônicos 3D criados no Revit;
- e) obter outros tipos de resultados de simulação, tais como cargas térmicas, consumo energético, entre outros;
- f) criar ferramentas adicionais para o Autodesk Revit a fim de torná-lo mais completo quanto às simulações térmicas de edificações, seja para a exportação de modelos ou para a realização da simulação dentro do próprio programa.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: desempenho térmico de edificações: parte 1: definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005a. 8 p.

_____. **NBR 15220**: desempenho térmico de edificações: parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005b. 30 p.

_____. **NBR 15220**: desempenho térmico de edificações: parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005c. 34 p.

_____. **NBR 15575**: edificações habitacionais: desempenho: parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013. 71 p.

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**, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 76–111, nov. 2009. Disponível em : <<http://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/viewFile/50960/55046>>. Acesso em: 10 set. 2015.

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE Standard 140-2011**: standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs. Atlanta, 2012. 276 p.

ATTIA, S. et al. Architect friendly: a comparison of ten different building performance simulation tools. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 11., 2009, Glasgow. **Proceedings...** Glasgow: IBPSA, 2009. p. 204-211. Disponível em: <http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2009/bs09_0204_211.pdf>. Acesso em: 15 set. 2015.

ATTIA, S. **State of the art of existing early design simulation tools for net zero energy buildings**: a comparison of ten tools. Louvain La Neuve, 2011. Disponível em: <http://www-climat.arch.ucl.ac.be/s_attia/attia_nzeb_tools_report.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2015.

AUTODESK. **Autodesk Revit 2016**: ajuda. 2016a. Disponível em: <<http://help.autodesk.com/view/RVT/2016/PTB/>>. Acesso em: 9 set. 2015.

_____. **Autodesk Ecotect Analysis**: sustainable building design software. 2016b. Disponível em: <<http://usa.autodesk.com/ecotect-analysis/>>. Acesso em: 20 ago. 2015.

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; WESTPHAL, F. S. Avaliação de desempenho térmico de componentes construtivos utilizando o EnergyPlus. In: ENCAC - ELACAC, 2005, Maceió. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2005. p. 145-154. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/267789226_avaliacao_de_desempenho_termico_de_componentes_construtivos_utilizando_o_energyplus?requestfulltext=1>.

Acesso em: 29 abr. 2016.

BRASIL. Portaria nº 18, de 16 de janeiro de 2012. **Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética de edificações residenciais**. Rio de Janeiro, 2012.

_____. Portaria nº 372, de 17 de setembro de 2010. **Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos**. Rio de Janeiro, 2013.

CBIC. CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Desempenho de edificações habitacionais**: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013. Disponível em: <http://www.cbic.org.br/arquivos/guia_livro/Guia_CBIC_Norma_Desempenho_2_edicao.pdf>. Acesso em: 24 set. 2015.

CHICCA JUNIOR, N. A. **A Realidade virtual como ferramenta de projeto de sinalização na aprendizagem da arquitetura e do design**. 2007. 121 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

CORREA, C. B. **Arquitetura Bioclimática: adequação do projeto de arquitetura ao meio ambiente natural**. **Portal Vitruvius**, 2001. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/drops/02.004/1590>>. Acesso em: 10 out. 2015. Não paginado.

CRESPO, C. C.; RUSCHEL, R. C. Ferramentas BIM: um desafio para a melhoria no ciclo de vida do projeto. In: ENCONTRO DE TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 3., 2007, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: TIC, 2007. Disponível em: <http://www2.pelotas.ifsul.edu.br/gpacc/BIM/referencias/CRESPO_2007.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2015.

CUNHA, E. G. **Simulação termoenergética de edificações**: módulo VIII: sistema de climatização artificial: apostila. Passo Fundo, 2015. 29 p.

DOE. UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus documentation, v8.4.0**: input output reference. DOE, 2015. Disponível em: <https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v8.4.0/InputOutputReference.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2015.

DONG, B. et al. A comparative study of the IFC and gbXML informational infrastructures for data exchange in computational design support environments. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 10., 2007, Beijing. **Proceedings...** Beijing: IBPSA, 2007. p. 1530-1537. Disponível em: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p363_final.pdf>. Acesso em: 15 set. 2015.

EASTMAN, C. et al. **Manual de BIM**: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores. Tradução de Cervantes Gonçalves Ayres Filho. Porto Alegre: Bookman, 2014.

ELETROSUL. **Casa Eficiente**. Disponível em: <<http://www2.eletrosul.gov.br/casaefici>>

ente/br/home/index.php>. Acesso em: 26 set. 2015.

HIPPERT, M. A. S.; ARAÚJO, T. T. A contribuição do BIM para a representação do ambiente construído. In: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO, 1., 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ANPARQ, 2010. Disponível em: <<http://www.anparq.org.br/dvd-enanparq/simposios/173/173-739-1-SP.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2015.

IBPSA. INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION. **BEST Directory**: building energy software tools. Disponível em: <<http://www.buildingenergysoftwaretools.com/>>. Acesso em: 29 set. 2015.

JEONG, W. et al. Visualization of building energy performance in building information models. In: ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE INTERNATIONAL CONFERENCE, 2013, Ontario. **Proceedings...** Ontario: ACADIA, 2013. p. 87-92. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/262006186_Visualization_of_Building_Energy_Performance_in_Building_Information_Models>. Acesso em: 1 out. 2015.

_____. Translating building information modeling to building energy modeling using model view definition. **The Scientific World Journal**, New York, v. 2014, n. 1, 21 p., 2014. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/638276/>>. Acesso em: 15 set. 2015.

JUDKOFF, R.; NEYMARK, J. Model validation and testing: the methodological foundation of ASHRAE Standard 140. In: ASHRAE ANNUAL MEETING, 2006, Quebec City. **Proceedings...** Springfield: NREL, 2006. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/40360.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2015.

JUSTI, A. **Revit Architecture 2010**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2010.

KASSEM, M.; AMORIM, S. R. L. **Diálogos setoriais para BIM**: Building Information Modeling no Brasil e na União Europeia. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://sectordialogues.org/sites/default/files/acoes/documentos/bim.pdf>>. Acesso em: 7 jan. 2016.

KENSEK, K. M.; KUMAR, S. Sustainable design through interoperability: building information models (BIM) and energy analysis programs, a case study. **Cadernos de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo**, São Paulo, v. 1, p. 42-58, 2008.

KUMAR, S. **Interoperability between BIM and energy analysis programs**. 2008. 160 p. Thesis (Master Program of Building Science)—University of Southern California, California, 2008.

LABEEE. **Arquivos climáticos em formato TRY, SWERA, CSV e BIN**. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>>. Acesso em: 17 mar. 2016.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2014.

LAMBERTS, R. et al. **Casa eficiente**: simulação computacional do desempenho termo-energético. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010a. v. 4. Disponível em: <<http://www.eletrosul.gov.br/casaeficiente/br/home/conteudo.php?cd=857>>. Acesso em: 19 out. 2015.

_____. **Casa eficiente**: bioclimatologia e desempenho térmico. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010b. v. 1. Disponível em: <<http://www.eletrosul.gov.br/casaeficiente/br/home/conteudo.php?cd=857>>. Acesso em: 23 out. 2015.

MARTINS, P. C. F. **A interoperabilidade entre sistemas BIM e simulação ambiental computacional**: estudo de caso. 2011. 229 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)–Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

MELO, A. P.; WESTPHAL, F. S.; MATOS, M. **Apostila do curso básico do programa EnergyPlus**. Florianópolis: LabEEE, 2009. 24 p. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4202_Apostila_EnergyPlus_0.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2015.

MENEZES, G. L. B. B. Breve histórico de implantação da plataforma BIM. **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, Belo Horizonte, v. 18, n. 22, p. 152–171, 2011. Disponível em: <<http://periodicos.pucminas.br/index.php/Arquiteturaeurbanismo/articloe/view/3363/3719>>. Acesso em: 4 ago. 2015.

NASYROV, V. et al. Building information models as input for building energy performance simulation: the current state of industrial implementations. In: MAHDAVI, A.; MARTENS, B.; SCHERER, R. (Eds.). **eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction**: ECPPM 2014. Vienna: CRC Press, 2014. p. 479-486.

O'DONNELL, J. T. et al. **Transforming BIM to BEM**: generation of building geometry for the NASA Ames Sustainability Base BIM. California: Berkeley Lab, 2013. Disponível em: <<http://buildings.lbl.gov/sites/all/files/LBNL-6033E.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2015.

PEREIRA, C. D. **A influência do envelope no desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ocupadas e ventiladas naturalmente**. 2009. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

RALLAPALLI, H. S. **A comparison of EnergyPlus and eQUEST**: whole building energy simulation results for a medium sized office building. 2010. 84 p. Thesis (Master Program)–Arizona State University, Arizona, 2010.

REEVES, T.; OLBINA, S.; ISSA, R. Validation of building energy modeling tools: Ecotect, Green Building Studio and IES<VE>. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2012, Berlin. **Proceedings...** Berlin: WSC, 2012. p. 582-593. Disponível em: <<http://informs-sim.org/wsc12papers/includes/files/inv156.pdf>>. Acesso em: 14 jul. 2015.

SHADRINA, A. **Framework for the transfer of building materials data between the**

BIM and thermal simulation software. Vienna, 2015. 20 p. Disponível em: <http://www.academia.edu/12460299/framework_for_the_transfer_of_building_materials_data_between_the_bim_and_thermal_simulation_software>. Acesso em: 1 out. 2015.

SPANNENBERG, M. G. **Análise de desempenho térmico, acústico e lumínico em habitação de interesse social:** estudos de caso em Marau-RS. 2006. 189 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

VERSAGE, R.; LAMBERTS, R. **Tutorial OpenStúdio 1.0:** plugin do EnergyPlus para Sketchup. Florianópolis: LabEEE, 2010. 20 p. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4202_Apostila_OpenStudio.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2016.

WESTPHAL, F. S. **Introdução ao EnergyPlus.** Florianópolis: LabEEE, 2006. 45 p. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4202_Tutorial%20EnergyPlus%202006.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2015.