

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO

VINICIUS GOMES DE ALMEIDA

**A utilização da tecnologia BIM para a análise de
desempenho térmico de edificações habitacionais**

São Carlos

2019

VINICIUS GOMES DE ALMEIDA

A utilização da tecnologia BIM para a análise de desempenho
térmico de edificações habitacionais

Dissertação apresentada ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

Área de Concentração: Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia

Orientadora: Profa. Dra. Kelen Almeida Dornelles
Co-Orientador: Prof. Dr. Márcio Minto Fabrício

Versão corrigida

São Carlos

2019

AUTORIZO A REPRODUCAO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRONICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Arquitetura e Urbanismo
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

de Almeida, Vinicius Gomes
dAL447 A utilização da tecnologia BIM para a análise de
u desempenho térmico de edificações habitacionais /
Vinicius Gomes de Almeida; orientadora Kelen
Almeida Dornelles; co-orientador Marcio Minto
Fabricio. -- São Carlos, 2019.
131 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e
Tecnologia -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo,
Universidade de São Paulo, 2019.

1. Processo BIM. 2. Desempenho Térmico. 3.
Simulação Computacional. I. Dornelles, Kelen Almeida,
orient. II. Fabricio, Marcio Minto , co-orient. III.
Título.

Bibliotecária responsável pela estrutura de catalogação da publicação de acordo com a AACR2:
Brianda de Oliveira Ordonho Sígolo - CRB - 8/8229

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Vinicius Gomes de Almeida

Título da dissertação: "A utilização da tecnologia BIM para a análise de desempenho térmico de edificações habitacionais"

Data da defesa: 02/10/2019

Orientador: Profa. Dra. Kelen Almeida Dornelles

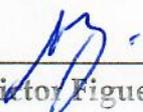
Comissão Julgadora:

Resultado:



Profa. Dra. Kelen Almeida Dornelles
(IAU/USP)

Não votante



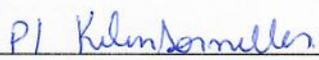
Dr. Victor Figueiredo Roriz
(IAU/USP)

APROVADO



Profa. Dra. Cristiane Bueno
(UFSCar)

APROVADO



Profa. Dra Leticia de Oliveira Neves
(FEC/UNICAMP)

REPROVADO

Coordenador e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: Prof. Dr. Tomás Antonio Moreira.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em primeiro lugar à Deus, por me permitir saúde e perseverança para a condução desse trabalho, aos meus pais, Silvio e Marina, por sempre estarem ao meu lado e terem apoiado a minha ida à São Carlos, e a minha amada esposa, Amanda, que foi a minha companheira incondicional durante toda a caminhada da pós-graduação e me deu forças para conclusão desse trabalho.

À minha orientadora, Profa. Kelen Dornelles, por ter aceitado me orientar e ter permitido a minha vinda à São Carlos, onde pude ter contato mais aprofundado ao mundo da pós-graduação e da produção científica, ao Prof. Márcio Minto, pelo apoio na condução inicial da pesquisa e introdução à equipe do Arquitec, e as Professoras Karin e Denise, pelas valiosas contribuições na minha banca de qualificação.

A todos os meus amigos da pós-graduação, que de forma direta ou indireta participaram dessa jornada, destacando Michele, Lorena, Carol, Rosilene, Lucas, Louise, Andrea, Júlio, Tito, Heliara e Beatriz, entre tantos outros que me ajudaram nessa pesquisa.

Ao professor Érico Peixoto, que me introduziu na pesquisa científica e no universo BIM, as professoras Sanadja e Grete pelo suporte no início da minha pesquisa, e ao meu primo Prof. Dr. Witembergue, pelo empurrão inicial para entrada no mestrado.

À Dra. Tereza Cristina, por ter me operado com maestria antes de minha ida à São Carlos, e permitido a minha vinda à cidade da tecnologia e o início da minha vida de mestrando.

À Barbara e Paulo, pela concessão do tempo necessário para condução dos trabalhos acadêmicos, e forte apoio para que fosse possível conduzir e finalizar este trabalho, e ao Sr. Cláudio e Dona Ivana, pelo suporte inicial na chegada em São Carlos, e por terem enorme importância no início da minha trajetória profissional.

RESUMO

ALMEIDA, V. G. de. **A utilização da tecnologia BIM para análise de desempenho térmico de edificações habitacionais**. 2019. 131 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

O surgimento da NBR 15575:2013 reforçou as discussões acerca do Desempenho Térmico das edificações habitacionais, entendido como um dos requisitos indispensáveis para o conforto e bem-estar dos usuários. A análise do desempenho térmico das edificações passa a ser subsidiado por procedimentos de avaliação descritos na NBR 15575, que passarão a integrar o desenvolvimento dos projetos em busca do atendimento aos critérios de desempenho. A simulação computacional, um dos métodos propostos para a análise térmica, não está totalmente incorporado às rotinas dos projetistas por conta da complexidade dos programas específicos e da distância que o processo de simulação possui das fases iniciais do projeto. Neste sentido, a Tecnologia BIM, que possui como principal função a redistribuição dos esforços da atividade projetual, dando maior ênfase à etapa de concepção do produto, surge como um facilitador para as análises de desempenho. Assim, este trabalho tem por objetivo analisar as potencialidades e limitações da utilização da Tecnologia BIM para a simulação do desempenho térmico de edificações habitacionais ainda na fase de concepção do projeto. Ao final desse trabalho, foi possível verificar que as ferramentas BIM conseguem suprir em parte a falta de ferramentas para análise de desempenho térmico nas fases iniciais do projeto, sendo de grande importância que o usuário tenha conhecimento dos principais conceitos fenômenos físicos envolvidos que impactam no desempenho térmico das edificações, assim como dos procedimentos da simulação de desempenho térmico e energético dos edifícios, de tal forma a incentivar o uso desta tecnologia por projetistas e proporcionar o desenvolvimento de edificações confortáveis e energeticamente eficientes.

Palavras-chave: Processo BIM. Desempenho Térmico. Simulação Computacional

ABSTRACT

ALMEIDA, V. G. de. **Use of BIM technology for thermal performance analysis of housing buildings**. 2019. 131 p. Master's os Science Thesis (Msc in Architecture and Urbanism) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

The appearing of the NBR 15575:2013 supplies the discussions about the Thermal Performance of Housing Buildings, known as one of the most important requirement for the users comfort and well-being. The Thermal Performance analysis from buildings are described by the analysis proceedings for the NBR 15575, who will integrated the development of projects in search to attend the Performance Rules. The Computational Simulation, one of the methods proposed for thermal analysis, its not introduced in the designers pratices by the complexity of the simulation softwares and the gap between the simulation process and the early design stages. The BIM Technology, who has as main function the redistribution of the efforts for the design process, giving more emphasis for the concept phase, come as a facilitator for perfomance analysis. This work aims to analyze the potentialities and limitations of the use of BIM Technology to simulate the thermal performance of housing buildings still in the project design phase. At the end of this work, it was possible to verify that BIM tools can partially compensate for the lack of tools for thermal performance analysis in the early stages of the project. procedures for building thermal performance simulation in such a way as to encourage the use of this technology by designers and to provide the development of comfortable and energy efficient buildings.

Key-words: BIM Process. Thermal Performance. Computational Simulation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistemas abordados pela ABNT NBR 15.575 (ABNT, 2013).....	28
Figura 2 - Dados de entrada de uma simulação computacional.....	32
Figura 3 - Parâmetros mínimos necessários para avaliação de desempenho térmico por programas de simulação.....	33
Figura 4 - Utilização do BIM durante o ciclo de vida da edificação	36
Figura 5 - Curva de McLeamy associada as etapas do projeto e o processo BIM....	38
Figura 6 - Taxonomia Triangular do desenvolvimento de Edificações Sustentáveis com uso do BIM	40
Figura 7 - Análise de trajetória solar na edificação com uso do Autodesk Revit® 2017	43
Figura 8 - Configuração das características térmicas dos materiais no Revit	46
Figura 9 - Definição da orientação solar no Revit.....	47
Figura 10 - Configuração das Coordenadas Geográficas e escolha da Estação Climática no Revit	47
Figura 11 - Configuração de dados para cálculo das cargas de aquecimento e resfriamento no Revit	48
Figura 12 - Fatores de desempenho do edifício, apresentado em relatório de simulação do GBS.....	49
Figura 13 - Rosa dos ventos anual, apresentada em relatório de simulação do GBS	50
Figura 14 - Dados mensais do projeto, apresentado em relatório de simulação do GBS.....	50
Figura 15 - Média diurna do clima, apresentada em relatório de simulação do GBS	51
Figura 16 - Configuração de uma Zona Térmica na edificação modelada no Revit ..	51
Figura 17 - Dados de saída do cálculo das cargas de aquecimento e resfriamento .	52
Figura 18 - Contribuição em percentual dos elementos da edificação nas cargas de aquecimento e resfriamento	53
Figura 19 – Ciclo de trabalho no Virtual Environment	54
Figura 20 - Plugin do IES-VE na interface do Revit.....	54
Figura 21 - Formas de exportação do modelo geométrico para análise de desempenho no IES-VE	55
Figura 22 - Exportação no modo Simple	56
Figura 23 - Exportação no modo Complex	57
Figura 24 - Aba de resultados da simulação energética no Ve-Ware	58
Figura 25 - Aba Overview do <VE> Toolkits.....	59
Figura 26 - Relatório apresentado na funcionalidade Climate Metrics	60
Figura 27 - Relatório apresentado na funcionalidade Climate Index.....	61
Figura 28 - Relatório apresentado na funcionalidade Building Metrics.....	62

Figura 29 - Aba Sustainability do <VE> Toolkits.....	63
Figura 30 - Módulos de análise disponíveis na interface do IES-VE 2018.....	64
Figura 31 - Plug-in do DesignBuilder na aba de ferramentas do Revit	65
Figura 32 - Transferência do modelo geométrico do Revit para o DesignBuilder.....	66
Figura 33 - Opções de configuração no plug-in DesignBuilder Revit.....	67
Figura 34 - Configurações de combinação do Modelo Geométrico do Revit para o DesignBuilder	68
Figura 35 - Configurações avançadas do Modelo Geométrico do Revit para o DesignBuilder	68
Figura 36 - Configuração de arquivo gbxml no Revit para importação no DesignBuilder	69
Figura 37 - Gráfico de Temperatura do Ar e Ganhos de Calor apresentado no DesignBuilder	70
Figura 38 - Gráfico de consumo energético apresentado no DesignBuilder.....	71
Figura 39 - Plano de Manchas da incidência da iluminação natural na edificação no DesignBuilder	71
Figura 40 - Etapas metodológicas do desenvolvimento do trabalho.....	79
Figura 41 - Passos metodológicos para atendimento dos objetivos específicos	79
Figura 42 - Parâmetros para análise preliminar de desempenho térmico de edificações.....	80
Figura 43 - Implantação do empreendimento residencial objeto de estudo.....	82
Figura 44 - Planta Baixa do Pavimento Tipo com 08 unidades habitacionais.....	82
Figura 45 - Vedação da edificação em alvenaria estrutural de bloco cerâmico	84
Figura 46 - Revestimento argamassado (Chapisco e Reboco) da fachada.....	84
Figura 47 - Pintura acrílica na fachada nas cores Marfim e Camurça.	84
Figura 48 - Laje maciça de concreto armado.....	85
Figura 49 - Cobertura em telhas cerâmicas coloniais.....	85
Figura 50 - Envelope construtivo com portas e janelas de alumínio e vidro liso incolor	86
Figura 51 - Fluxograma para realização das simulações de desempenho térmico. .	87
Figura 52 - Escolha da unidade 308 do bloco 07, de acordo com a orientação mais crítica do ponto de vista térmico para o verão (ABNT, 2013)	89
Figura 53 - Escolha da unidade habitacional 308, do bloco 07, conforme procedimento de simulação da NBR 15575 (ABNT, 2013).....	89
Figura 54 - Amostra das tintas utilizadas no envelope construtivo da edificação objeto do estudo	90
Figura 55 - Refletância espectral das tintas medidas em laboratório	90
Figura 56 - Modelo digital da edificação elaborado no Revit	94
Figura 57 - Paredes externas na cor marfim e camurça	96
Figura 58 - Modelagem das paredes internas da Sala e Cozinha	98
Figura 59 - Modelagem das paredes internas da circulação comum.....	98
Figura 60 – Modelagem das esquadrias dos quartos, banheiros e cozinhas	100
Figura 61 - Modelagem da porta de entrada e janela da circulação comum	100
Figura 62 - Modelagem das portas internas das unidades habitacionais	101

Figura 63 - Modelagem das portas de entrada das unidades habitacionais, e do painel de elementos vazados	101
Figura 64 - Pisos implantados no modelo digital	103
Figura 65 - Modelagem final da cobertura da edificação.....	104
Figura 66 - Modelagem do espaçamento entre a laje de cobertura e o telhado	104
Figura 67 - Conceito do modelo de energia elaborado no Revit	105
Figura 68 - Aba Navegador de materiais para configuração das propriedades térmicas dos materiais no Revit	106
Figura 69 - Modelo digital com norte do projeto configurado conforme edificação em campo	107
Figura 70 - Implantação original da edificação no Google Earth, com destaque para o bloco 07, objeto da simulação de desempenho	107
Figura 71 - Configuração da localização do clima e terreno	109
Figura 72 - Modelo de energia elaborado a partir de modelo de arquitetura detalhado	110
Figura 73 - Aba de configuração de energia do Revit	111
Figura 74 - Janela do Revit de configurações avançadas de energia	112
Figura 75 - Rosa dos ventos anual apresentada no relatório de desempenho termo-energético do GBS	113
Figura 76 - Gráfico da temperatura média mensal para projeto (Bulbo-seco).....	114
Figura 77 - Gráfico da frequência da umidade relativa do ar ao longo do ano	114
Figura 78 - Gráfico do consumo energético mensal da edificação em kWh.....	115
Figura 79 - Gráfico de variação da temperatura externa de bulbo seco emitido através de arquivos .csv do GBS	116
Figura 80 - Análise do Caminho do sol e pontos de sombreamento na fachada	117
Figura 81 - Janela de configuração das cargas de aquecimento e resfriamento da edificação	118
Figura 82 - Relatório com resumo dos dados de Localização e clima da edificação	118
Figura 83 - Relatório com a contribuição dos elementos da edificação nas cargas de aquecimento e resfriamento da Zona 06 – Dormitório 01	119
Figura 84 - Relatório com a contribuição dos elementos da edificação nas cargas de aquecimento e resfriamento da Zona 07 – Dormitório 02	119
Figura 85 - Relatório com a contribuição dos elementos da edificação nas cargas de aquecimento e resfriamento da Zona 08 – Estar Jantar/Cozinha.....	120
Figura 86 - Potencialidades e limitações no uso do Autodesk Revit 2017 para a simulação de desempenho térmico de edificações habitacionais	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - 12 principais ferramentas BIM para análise de parâmetros de sustentabilidade	42
Tabela 2 - Pontos principais dos trabalhos citados sobre análise de desempenho térmico com uso de ferramentas BIM. (continua)	76
Tabela 3 - Configuração das paredes externas da edificação	95
Tabela 4 - Configuração das paredes internas da edificação	97
Tabela 5 - Configuração das esquadrias da edificação	99
Tabela 6 - Configuração dos pisos da edificação	102
Tabela 7 - Características da cobertura da edificação.....	103
Tabela 8 - Densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (C) de materiais	106

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Objetivos	22
1.2	Estrutura da dissertação	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	O Processo de projeto e as Fases Projetuais	25
2.2	Desempenho das Edificações Habitacionais	26
2.2.1	A Norma ABNT NBR 15.575:2013.....	27
2.2.2	O Desempenho Térmico das Edificações Habitacionais	29
2.3	A Simulação Computacional do Desempenho Térmico	31
2.4	A Modelagem da Informação da Construção	35
2.4.1	O BIM e o Processo Projetual	37
2.5	Simulação de Desempenho Térmico com o uso do BIM.....	39
2.6	Ferramentas BIM e a análise de desempenho térmico de edificações	43
2.6.1	Autodesk® Green Building Studio - GBS.....	44
2.6.2	Integrated Environmental Solutions® Virtual Environment – IES-VE	53
2.6.3	DesignBuilder	65
2.6.4	Análise comparativa entre os programas de simulação de desempenho	72
2.7	Interoperabilidade entre modelos BIM e programas de análise de desempenho	73
3	MATERIAIS E MÉTODOS	79
3.1	Seleção da ferramenta BIM para análise de desempenho térmico	80
3.2	Edificação objeto do estudo	81
3.2.1	Características do Sistema Construtivo	83
3.3	Simulação de Desempenho Térmico	86
4	RESULTADOS	93
4.1	Simulação de desempenho térmico com uso do Green Building Studio	93
4.1.1	Modelagem da edificação no Autodesk® Revit 2017	93
4.1.2	Configuração do modelo de construção para simulação computacional	105
4.1.3	Elaboração do modelo de energia	109
4.1.4	Dados de saída da Simulação de desempenho no Green Building Studio	112

4.2	Potencialidades e limitações do Autodesk® GreenBuilding Studio para análises de desempenho térmico nas fases iniciais do projeto	120
5	CONCLUSÃO.....	123

1 INTRODUÇÃO

O exercício profissional da Arquitetura se viu intensamente transformado durante as últimas décadas, em virtude das novas tecnologias que foram incorporadas ao ofício. Além disso, os novos conceitos e as demandas solicitadas pelo mercado influenciaram diretamente os projetos, o planejamento e a execução das edificações habitacionais. A divisão entre os projetos e a obra, com o advento da industrialização, gerou especialidades projetuais e subsistemas construtivos, dentre eles: arquitetura, estrutura, instalações, consultorias e projetos de produção (FABRICIO, 2002).

A Tecnologia BIM, termo em inglês para “*Building Information Modeling*”, ou Modelagem da Informação da Construção, pode ser considerada como uma grande responsável pela transformação que vem ocorrendo nos processos produtivos da indústria da construção civil, sendo definida como um conjunto inter-relacionado de políticas, processos e tecnologias que geram uma metodologia para gerenciar a essência de projeto da edificação e seus dados associados em um modelo digital, durante todo o ciclo de vida da edificação (SUCCAR, 2009).

O BIM permite um processo interativo de construção digital, promovendo o envolvimento das diversas disciplinas da construção civil, através da criação de um modelo digital abastecido com todas as informações necessárias das diversas especialidades da construção para subsidiar as etapas de planejamento, execução e manutenção da obra. Através deste processo, estas etapas ocorrem de forma mais integrada, pois informações de normas técnicas, projetos complementares, cronogramas, orçamentos, podem ser atribuídos ao modelo digital, o que facilita a visualização do que será executado, além de permitir simulações de desempenho, que concedem uma análise preliminar do comportamento em uso da edificação, criando a possibilidade de avaliar os sistemas construtivos, minimizando erros de projeto e custos.

A Norma ABNT NBR 15575 – Desempenho de Edificações Habitacionais, que foi revisada e entrou em vigor em julho de 2013, ainda é vista como um desafio para

os principais agentes envolvidos no processo da produção habitacional, mesmo trazendo benefícios tanto para o setor produtivo como para os clientes finais.

A CBIC¹ (Câmara Brasileira da Indústria da Construção Civil) comenta que a norma é um indutor para desenvolver novos produtos e melhorar a construção em geral, de forma que quem produz vai poder atestar a qualidade de seu produto demonstrando o atendimento aos critérios de desempenho. “Além disso, quando falamos em durabilidade dos sistemas, estamos falando em sustentabilidade. A ideia é prevenir a reposição de materiais e proteger os recursos do meio ambiente” (CBIC, 2014, p. 03). O desempenho térmico, citado nas partes 1, 4 e 5 da NBR 15575, é um requisito de extrema importância para a usabilidade da habitação, pois está diretamente associado ao bem-estar do usuário, além de contribuir na redução do consumo energético da edificação, tendo em vista que as edificações residenciais são responsáveis pelo consumo de mais de 25% (vinte e cinco por cento) de toda a energia elétrica produzida no país (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2017).

Um dos métodos de se avaliar o desempenho térmico é através da simulação computacional, onde podem ser definidas estratégias e soluções projetuais que minimizem o impacto da radiação solar na edificação, melhorando o desempenho final da edificação. “Esse processo de análise-síntese deve prosseguir até que um desempenho razoável seja atingido. Quanto antes o arquiteto iniciar este processo, melhor e mais facilmente encontrará bons resultados” (LAMBERTS *et al.*, 2014, p. 289).

Estas avaliações podem ser realizadas em programas BIM, permitindo a análise de desempenho térmico dos elementos construtivos da edificação ainda nas etapas preliminares de projeto. A capacidade de utilizar ferramentas de análise de desempenho térmico no modelo digital cria oportunidades de melhorar a qualidade final da edificação (EASTMAN *et al.*, 2013).

Em um momento em que o desempenho das edificações habitacionais passa a ser questionado e subsidiado por normas de desempenho, o desenvolvimento de

¹ CBIC. **O Brasil adota novos Padrões de Qualidade para Construção de Casa e Apartamentos.**

2014. Disponível em:

<<http://www.cbic.org.br/sites/default/files/Lan%C3%A7amento%20do%20Guia%20Orientativo%20da%20Norma%20de%20Desempenho.pdf> > Acesso em 01 jun. 2015

novas metodologias projetuais auxilia o agente produtor, neste caso o projetista, a atender a esta demanda. A Tecnologia BIM é uma ferramenta eficiente que os projetistas dispõem e que permite que usuários com pouca experiência em programação e Tecnologia da Informação possam realizar ajustes no modelo digital e definir regras e simulações que possam auxiliar no desenvolvimento dos projetos, neste caso o atendimento às normas e boas práticas para o desempenho térmico das edificações.

O cenário atual da indústria da construção no Brasil ainda prioriza a metodologia tradicional de elaboração de projetos, tendo em vista que a metodologia BIM ainda não é requisito obrigatório para contratação de obras públicas em todo país, como já é trabalhado em países como a Inglaterra e a Austrália. Dessa forma, existe uma grande tendência à incorporação do BIM ao processo projetual e processos de gestão vinculados, levando os profissionais da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) à necessidade de capacitação nessa nova tecnologia (ABDI, 2017a).

Dispondo-se dos conceitos de Tecnologia BIM, desempenho térmico das edificações habitacionais e de simulação computacional, este trabalho tem a finalidade de avaliar as potencialidades e as limitações do BIM para a análise de desempenho térmico de edificações habitacionais ainda durante a etapa projetual e apresentar uma nova metodologia para os profissionais de AEC (Arquitetura, Engenharia e Construção) realizarem simulações computacionais durante as etapas iniciais de concepção do projeto, permitindo melhorias na avaliação do desempenho térmico e na qualidade do produto final a ser construído.

1.1 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar as potencialidades e as limitações da Tecnologia BIM para a simulação do desempenho térmico de edificações habitacionais nas fases iniciais do projeto.

Os objetivos específicos são destacados abaixo:

- Levantamento de ferramentas/plug-ins BIM para avaliação do desempenho térmico de edificações habitacionais;
- Análise geral de 3 ferramentas/plug-ins BIM selecionadas (documentação e métodos de análise de desempenho);
- Verificação das potencialidades e limitações da análise de desempenho térmico com o uso da ferramenta BIM, e sua aplicabilidade junto aos parâmetros de análise de desempenho térmico nas fases iniciais do projeto.

1.2 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, partindo do Capítulo 1, que aborda a introdução, justificativa, objetivos e delineamento da pesquisa, e sendo seguido por:

- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: Apresenta um breve panorama do estado da arte dos temas do trabalho, como o processo de projeto e as etapas projetuais, o desempenho das edificações habitacionais, a simulação de desempenho térmico, a modelagem da informação da construção e a simulação de desempenho térmico com o uso do BIM;
- Capítulo 3 – Materiais e Métodos: Etapa onde é destacada a metodologia do trabalho, a escolha da edificação objeto do estudo, suas características construtivas, e a apresentação da forma como serão conduzidas as simulações de desempenho térmico nas fases iniciais de projeto com uso da ferramenta BIM;
- Capítulo 4 – Resultados: Realização da simulação de desempenho térmico com a ferramenta BIM, e apresentação das potencialidades e

limitações da ferramenta BIM para simulações térmicas nas fases iniciais do projeto;

- Capítulo 5 – Conclusão: Etapa final do trabalho, onde são apresentadas as conclusões da pesquisa a partir dos resultados obtidos e recomendações para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentado um panorama do estado da arte dos temas relacionados com a pesquisa, como o processo de projeto e as fases projetuais, o desempenho das edificações habitacionais, com destaque para norma NBR 15.575, a simulação computacional de desempenho térmico, a modelagem da informação da construção e a simulação de desempenho térmico com o uso de ferramentas BIM.

2.1 O Processo de projeto e as Fases Projetuais

O processo de projeto é uma atividade que compreende as fases de análise dos principais elementos que compõem o problema de projeto, da síntese das ideias e possíveis soluções que atendam aos objetivos e satisfaçam às restrições e oportunidades, da avaliação que consiste em comparar a solução proposta com as metas, restrições e oportunidades que o projeto deve atender, e a representação que consiste no produto oriundo das três primeiras fases (KOWALTOWSKI et al., 2011).

De acordo com a NBR 16636-2 (ABNT, 2017), as etapas do processo do projeto arquitetônico podem ser divididas em fase de preparação e fase de elaboração e desenvolvimento de projetos técnicos. A primeira fase compreende no levantamento de informações preliminares do projeto, de forma a abastecer o programa geral de necessidades, para elaboração do estudo de viabilidade do empreendimento. Já a segunda fase consiste basicamente na determinação e representação prévia da configuração arquitetônica da edificação, após compatibilização com demais projetos complementares.

A forma como o projeto é desenvolvido reflete no desempenho final da edificação, tendo em vista a maior antecipação de questões do comportamento em uso da edificação nas fases preliminares do projeto.

2.2 Desempenho das Edificações Habitacionais

Segundo a Norma ABNT NBR 15575 (ABNT, 2013), a definição de desempenho pode ser caracterizada pelo comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas, de forma que, para que uma edificação atenda aos requisitos mínimos de desempenho, é de suma importância o atendimento dos requisitos das normas pelos agentes produtores da obra e pelos usuários finais.

O edifício é um produto que deve apresentar determinadas características que o capacitem a cumprir objetivos e funções para os quais foi projetado, portanto, em busca de atingir boas condições de usabilidade e definir parâmetros para a durabilidade das edificações a serem construídas, as normas de desempenho surgem como agentes balizadores para todo o processo de construção e uso das edificações.

Diferente das Normas Prescritivas, que se caracterizam pelo conjunto de critérios e especificações estabelecidos para um produto ou procedimento específico diante da consagração do uso ao longo do tempo, as de desempenho apresentam um conjunto de requisitos e critérios com base em requisitos do usuário, independentemente da sua forma ou dos materiais constituintes.

Por conta da maior parte das normas nacionais serem normas prescritivas, novos produtos e sistemas construtivos ficam sem referencial para o nível mínimo de qualidade que deve ser atingido, dificultando a utilização de novas tecnologias e significando uma barreira à inovação no país (DE SOUZA, 2015).

As Normas de Desempenho estimulam a utilização das normas prescritivas, mas não limitam os usuários a atender somente às normas já consolidadas no mercado, o que propicia um ambiente de inovação e crescimento tecnológico. “O estímulo à inovação tecnológica é a principal motivação para justificar a aplicação do conceito de desempenho” (BORGES, 2008, p.91).

Além da Norma de Desempenho, o Sistema Nacional de Avaliação Técnica (SINAT) é uma ferramenta do Ministério das Cidades que permite a avaliação de produtos inovadores desenvolvidos para a utilização na Indústria da Construção Civil. São elaboradas Diretrizes e Documentos de Avaliação Técnica (Datecs), através da análise dos produtos por Instituições Técnicas Avaliadoras (ITAs), permitindo que seus

desempenhos (térmico, estrutural, acústico, segurança, entre outros) sejam aferidos antes de serem disponibilizados para o mercado.

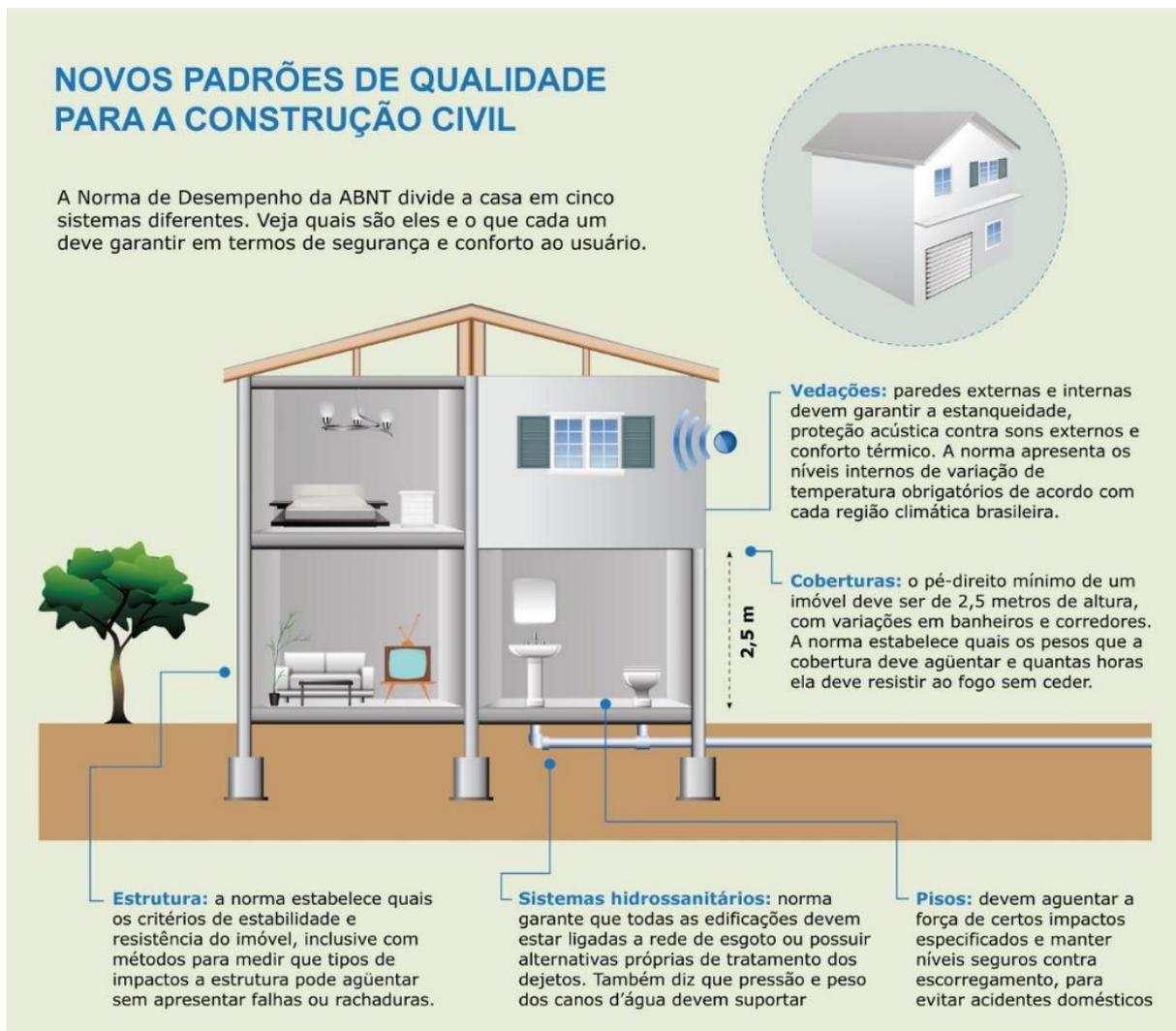
Produtos inovadores podem ser considerados materiais de construção, componentes, elementos, sistemas e processos construtivos que não possuem normas prescritivas próprias (BRASIL, 2007). “Ao estabelecer mecanismos institucionais que contemplam diretrizes e critérios técnicos para análise de produtos e sistemas de construção inovadores, o SINAT busca garantir critérios mínimos de desempenho de produtos homologados” (FABRICIO; ONO, 2015, p.10), favorecendo a utilização de inovações na Construção Civil e sendo, junto à Norma de Desempenho, um forte indutor de competitividade e qualidade na Construção Civil.

2.2.1 A Norma ABNT NBR 15.575:2013

Publicada inicialmente em 2008, a Norma ABNT NBR 15575 – Desempenho de Edificações Habitacionais, apresentava requisitos e critérios somente para edificações habitacionais de até cinco pavimentos. Após ser revisada e ampliada, visando abranger novos requisitos e critérios e também ser aplicável em habitações acima de cinco pavimentos, a norma foi publicada novamente em 2013, entrando em vigor no mesmo ano.

Após sua revisão, a NBR 15575 (ABNT, 2013) foi dividida em seis partes, de forma a organizar os Requisitos, Critérios e Especificações através dos diferentes sistemas que incluem uma edificação habitacional, conforme apresentado na Figura 1. A primeira parte da norma trata dos Requisitos Gerais e das interfaces entre os diferentes elementos da construção e do seu desempenho global, a Parte 2 trata dos Sistemas Estruturais, seguida pela Parte 3 que aborda os Sistemas de Pisos. Na parte 4 da norma são abordados os sistemas de Vedações Internas e Externas, na Parte 5 os Sistemas de Cobertura, e por final a Parte 6, que trata dos Sistemas Hidrossanitários.

Figura 1 - Sistemas abordados pela ABNT NBR 15.575 (ABNT, 2013).



Fonte: CERBRAS (2013).

“Apesar das normas técnicas não serem leis, têm força de lei em função do Código de Defesa do Consumidor, mas o próprio meio técnico, de uma maneira geral, considera que as normas são apenas referências” (BORGES, 2008, p. 168). A NBR 15575 (ABNT, 2013) possui embasamento no Artigo 39 do Código de Defesa do Consumidor, onde:

é vetado ao fornecedor de produtos ou serviços, dentre outras práticas abusivas: VIII – colocar, no mercado de consumo, qualquer produto ou serviço em desacordo com as normas expedidas pelos órgãos oficiais competentes ou, se normas específicas não existirem, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas [...] (Art. 39 da Lei N° 8.078, de 11.9.1990)

Assim, o Código de Defesa do Consumidor (BRASIL, 2001), garante à norma um caráter obrigatório de atendimento, tendo como premissa permitir que os usuários finais recebam produtos com o desempenho comprovado. A forma de estabelecimento do desempenho é comum e internacionalmente pensada por meio da definição de requisitos (qualitativos), critérios (quantitativos ou premissas) e métodos de avaliação, os quais sempre permitem a mensuração clara do seu cumprimento (DE SOUZA, 2015). O atendimento aos critérios da norma é classificado em níveis: Mínimo, Intermediário e Superior, de forma a estabelecer parâmetros de desempenho para as edificações e fomentar a busca por qualidade dos empreendimentos (ABNT, 2013).

2.2.2 O Desempenho Térmico das Edificações Habitacionais

Na constante busca pelo desempenho das edificações, o Conforto Ambiental, que compreende em condições ambientais favoráveis ao bem-estar térmico, visual, acústico, antropométrico, a qualidade do ar e conforto olfativo dos usuários (LAMBERTS *et al.*, 2014), é um requisito indispensável no desenvolvimento do projeto arquitetônico.

Dessa forma, o profissional de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) deve ter conhecimento das informações climáticas do ambiente onde será inserida a edificação, de forma a definir as melhores estratégias de conforto que atendam aos usuários. “A Arquitetura, como uma das suas funções, deve oferecer condições térmicas compatíveis ao conforto térmico humano no interior dos edifícios, sejam quais forem as condições climáticas existentes” (FROTA; SCHIFFER, 2001, p.15).

Neste sentido, o desempenho térmico é um dos principais requisitos de desempenho das edificações habitacionais, podendo ser compreendido como o comportamento dos materiais e sistemas construtivos quanto ao conforto térmico dos usuários, sendo o resultado da relação harmônica das características bioclimáticas do local onde está inserida a edificação, e de suas soluções construtivas. Segundo Dornelles (2008, p. 42) “o meio mais eficaz do projetista poder controlar a quantidade de calor que chega até o interior de uma edificação é considerar cuidadosamente o modo como o envelope construtivo tanto absorve quanto reflete a radiação solar”.

Além da NBR 15.220 (ABNT, 2005), existem atualmente dois regulamentos brasileiros para a avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais: o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), elaborado pelo Inmetro (2012), e a NBR 15.575 (ABNT, 2013). O primeiro, mais voltado para a avaliação dos níveis de eficiência energética das edificações, e o segundo apresentando procedimentos simplificados e de simulação computacional, para a análise da relação entre a temperatura externa e a interna do ar nas edificações (SILVA;GHISI, 2014).

O RTQ-R, Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, foi criado em 2012 para avaliar a eficiência energética das habitações, sendo uma iniciativa do Procel Edifica, da Eletrobrás, e do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), do Inmetro. Neste regulamento, são avaliados requisitos relativos ao desempenho da envoltória, à eficiência do(s) sistema(s) de água e a eventuais bonificações (INMETRO, 2012), e classificados numa escala de A (mais eficiente) a E (menos eficiente).

Já a NBR 15.575, estabelece critérios de desempenho térmico para sistemas de vedações e coberturas, tendo como base valores de Transmitância Térmica (U), Absortância (α) e Capacidade Térmica (CT) dos materiais e sistemas construtivos, levando-se em conta a zona climática onde a edificação será inserida. São descritas três formas de se avaliar o Desempenho Térmico: a primeira através de um método simplificado de cálculo, a segunda por simulação térmica em programas específicos, e a última, apenas consultiva, por medição em campo de um protótipo ou da edificação construída (ABNT, 2013). É recomendado pela norma se proceder inicialmente o método simplificado de avaliação, e se não for possível o atendimento dos critérios de desempenho deve-se proceder à simulação computacional.

Apesar de não ser o primeiro esforço normativo para a avaliação do desempenho térmico das edificações, tendo em vista a NBR 15220 (ABNT, 2005), o processo simplificado da NBR 15.575 apresenta discordâncias com a simulação computacional (CHVATAL, 2014), tornando-se um procedimento incompleto de avaliação térmica, e podendo levar o projetista a conclusões equivocadas quanto ao desempenho térmico da edificação. Já a simulação computacional, dentre os procedimentos de medição da NBR 15.575, é a melhor alternativa para a avaliação do desempenho térmico, tendo em vista que a medição em campo só pode ser realizada após a construção da

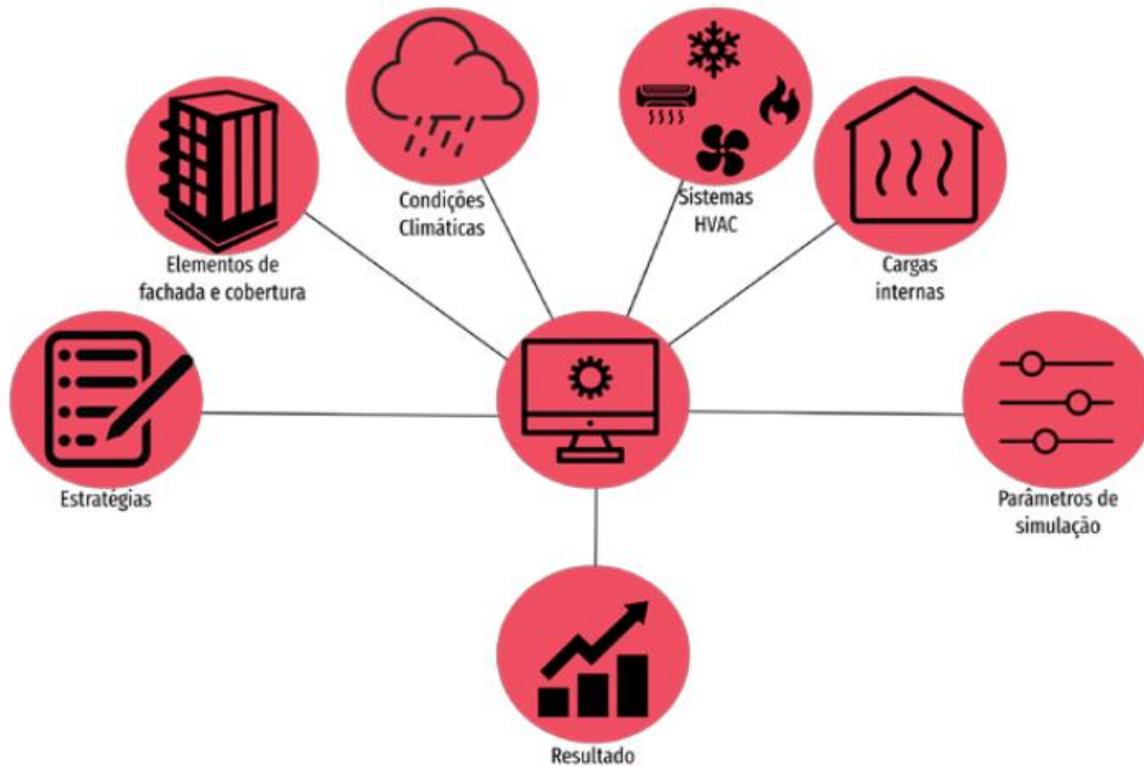
edificação, servindo apenas de parâmetro para futuros projetos, e possui somente caráter informativo pela NBR 15575. Apesar de ser o método mais completo para análise do desempenho térmico das edificações, a simulação ainda encontra barreiras para ser praticada nas fases preliminares dos projetos, e que serão discutidos nos capítulos seguintes.

2.3 A Simulação Computacional do Desempenho Térmico

Durante a análise do desempenho térmico das edificações, a simulação computacional se apresenta como uma alternativa que permite avaliar o desempenho térmico de materiais e sistemas construtivos, sendo aconselhado procedê-la nas primeiras etapas da fase projetual. “Usualmente, arquitetos procuram por suporte na avaliação do desempenho da edificação durante a fase de detalhamento do projeto, quando há poucas possibilidades de mudança” (PEDRINI;SZOKOLAY, 2005, p.43). A utilização de ferramentas de simulação só é incorporada à rotina inicial de projeto quando é possível substituir as diversas ferramentas, ábacos, tabelas e métodos de cálculo por uma solução simplificada, e que reúna um conjunto menor de ferramentas (DELBIN, 2006).

Para realização da simulação de desempenho térmico, conforme descrito na Figura 2, é necessário basicamente a inserção dos dados de entrada da edificação, como geometria, arquivos climáticos, características termofísicas dos materiais, uso e ocupação da edificação, entre outros, de forma a analisar o comportamento térmico da edificação frente ao clima em que está inserida, e sendo possível verificar parâmetros como a temperatura do ar no interior da edificação, temperatura radiante, percentual de contribuição dos elementos construtivos (coberturas, vedações, entre outros) na carga térmica da edificação.

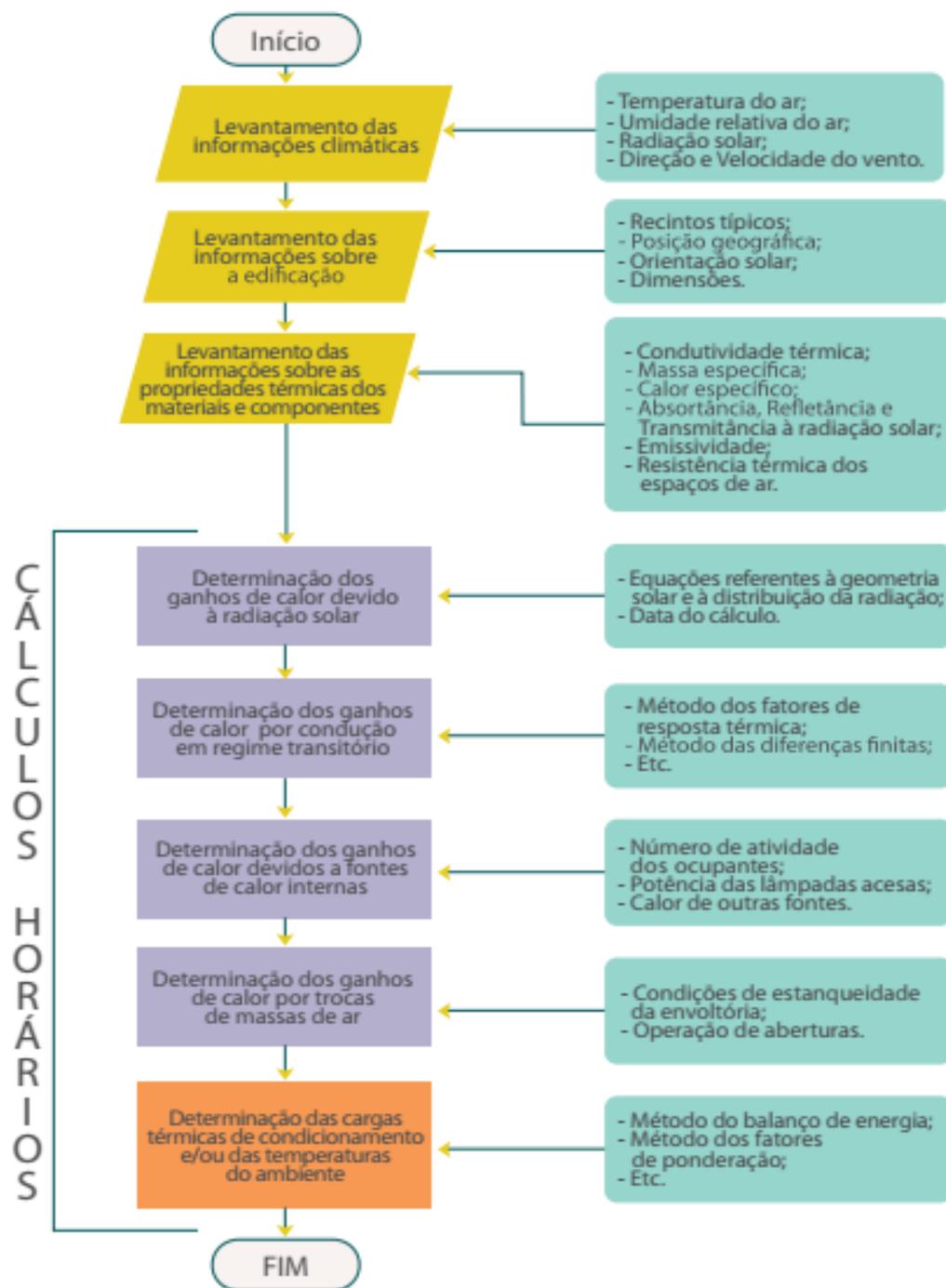
Figura 2 - Dados de entrada de uma simulação computacional



Fonte: ABDI (2017b).

De acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013), é recomendado a utilização do programa Energyplus para as simulações computacionais de análise de desempenho térmico, admitindo a utilização de outros programas desde que sejam validados pela norma *ASHRAE Standard 140* (ASHRAE, 2011). Segundo o “Guia Orientativo para Atendimento à Norma ABNT NBR 15575/2013” (CBIC, 2013), os programas de simulação de desempenho devem permitir a análise de uma série de parâmetros mínimos, conforme demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Parâmetros mínimos necessários para avaliação de desempenho térmico por programas de simulação



Fonte: CBIC (2013).

Apesar de existirem inúmeras ferramentas que aliam a modelagem do projeto à análise do desempenho em uma única solução, os projetistas ainda preferem desenvolver o modelo em uma ferramenta, e depois exportar as informações do

projeto para outro programa, onde será realizada a simulação de desempenho (NEGENDAHL,2015). No entanto, esta transferência entre programas nem sempre preserva as características originais do modelo, o que ocasiona retrabalhos e perda de produtividade na etapa projetual.

O EnergyPlus, que é o principal programa de simulação térmica utilizado no mercado e recomendado pela NBR 15.575 para a análise de desempenho térmico, não possui boas ferramentas para modelagem da edificação, além da falta de uma interface amigável aos projetistas (MENDES et al., 2005), levando à exportação de informações de outros programas para posterior simulação do desempenho térmico (FERREIRA, 2015; QUEIROZ; GRIGOLETTI; SANTOS, 2016).

Porém, quando o projetista dispõe de ferramentas mais intuitivas para a análise de desempenho térmico, e que não apresentam tantas opções de configuração como as ferramentas consolidadas, muitos parâmetros são configurados como *default* (padrão), o que pode comprometer o resultado da simulação caso o profissional não tenha conhecimento das limitações da ferramenta (BEAZLEY; HEFFERNAN; MCCARTHY, 2017).

Apesar da simulação de desempenho térmico nas fases iniciais de projeto não possuir todas as informações necessárias para uma análise mais completa da edificação, ela se constitui como um importante passo para atingir um desempenho térmico final satisfatório, pois com análises no comportamento dos elementos construtivos frente a parâmetros de sombreamento e ventilação, por exemplo, já é possível verificar quais elementos não se adequam ao clima, e apontar direções quanto à correta escolha dos materiais e a volumetria final da edificação (ABDI, 2017b).

Para integrar o processo de simulação com o desenvolvimento inicial do projeto, é necessário mapear o processo de concepção projetual e identificar onde é possível proceder oportunidades de melhoria no desempenho. A definição de metas e valores a serem alcançados durante o início do projeto, auxilia o projetista na leitura da simulação preliminar de desempenho, como a utilização de normas e manuais com diretrizes técnicas (RODRIGUES;PEDRINI, 2017).

Nesse contexto, a simulação de desempenho térmico nas fases iniciais de projeto se encontra como uma importante lacuna na área que essa pesquisa buscou

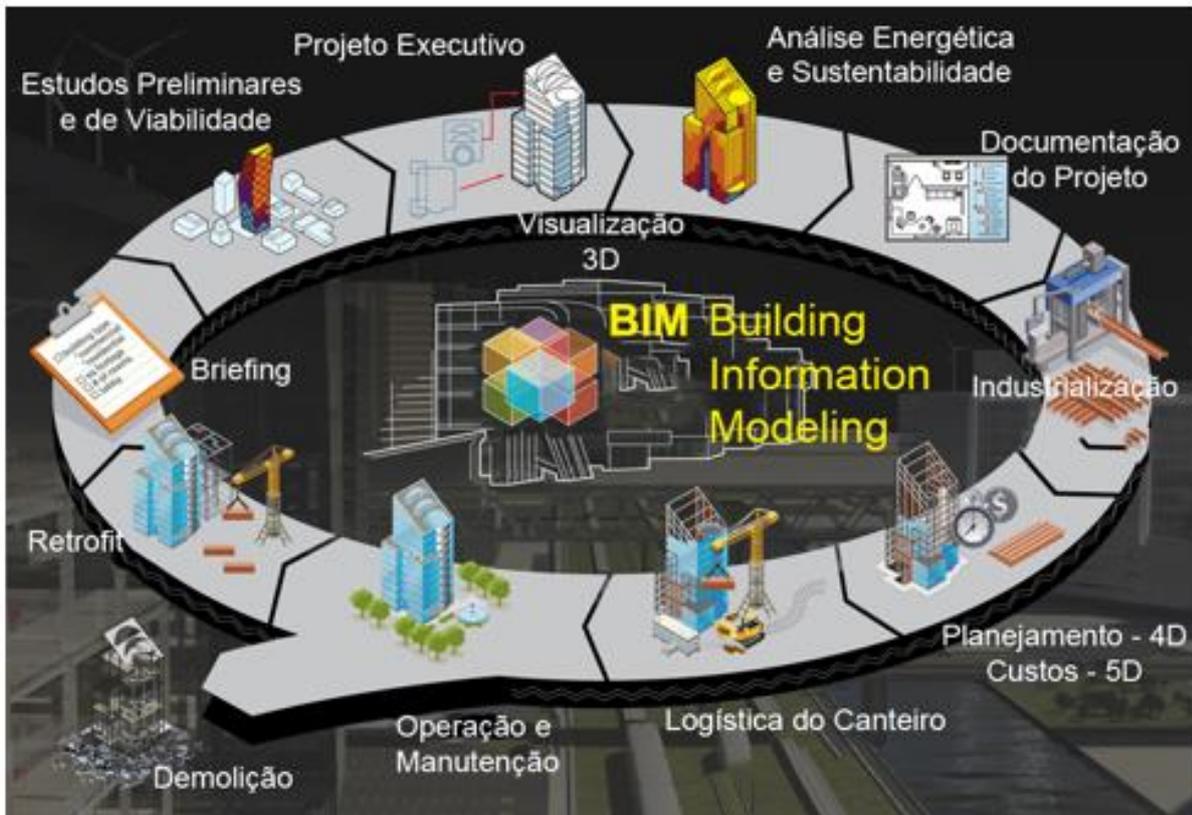
suprir, a partir do uso da simulação computacional com ferramentas BIM ainda na fase de desenvolvimento inicial do projeto.

2.4 A Modelagem da Informação da Construção

A busca por soluções em modelagem digital do produto ganhou força no final da década de 70, com a globalização dos mercados e aumento da dinâmica das empresas. Fomentou-se a melhoria dos processos através de uma abordagem integrada dos diferentes aspectos relacionados ao produto, a fim de atingir um mercado cada vez mais exigente quanto a prazos, qualidade e custos (NOBREGA JUNIOR; MELHADO, 2013).

O aumento da complexidade dos processos da indústria da Construção Civil criou a necessidade de inserção de uma nova mentalidade, buscando a aplicação de soluções mais eficientes e precisas (AMORIM; LYRIO; SOUZA, 2009). Surgiu assim, uma modelagem do produto adotada por outras indústrias, dando origem ao conceito BIM, como uma ferramenta que busca integrar todos os processos relacionados à construção de uma edificação abrangendo todo o seu ciclo de vida, conforme exposto na Figura 4, da concepção do projeto à demolição (LIMA, 2015).

Figura 4 - Utilização do BIM durante o ciclo de vida da edificação



Fonte: LIMA (2015).

Ao desenvolver um edifício em 3D com um programa que utiliza a tecnologia BIM, são utilizados os elementos construtivos como paredes, lajes, vigas, esquadrias, forros, escadas, telhados, entre outros, os quais têm todas as características definidas em suas propriedades, desde as informações geométricas, referências normativas, comportamento com relação a outros elementos construtivos, características do material a ser utilizado para construção e material usado para a representação do modelo digital (LIMA, 2012).

O conceito BIM reúne a ideia de que as informações para construir um edifício estão no modelo digital criado ao projetar em um *software* com este conceito. O modelo digital torna-se um banco de dados que permite a simulação real de um protótipo da verdadeira construção. Dessa forma, o profissional de AEC (Arquitetura, Engenharia e Construção) que dispõe dessa tecnologia possui uma gama de informações referente ao objeto a ser construído, muito mais rápida e eficiente, o que potencializa a tomada de decisões e permite maior participação dos demais agentes envolvidos no projeto.

2.4.1 O BIM e o Processo Projetual

O BIM se apresenta como um facilitador para a atividade projetual, devido a duas características que possui: a Modelagem Paramétrica e a Interoperabilidade (EASTMAN et al., 2013). Sua principal função é redistribuir os esforços da atividade projetual, dando maior ênfase à etapa de concepção do produto, mudando a estrutura de ação de projeto, redefinindo as estratégias de investigação, técnicas e procedimentos de avaliação (KOWALTOWSKI et al., 2011).

A Modelagem Paramétrica se caracteriza pela capacidade de representar um objeto digitalmente, o qual passa a ser construído com entidades geométricas e informacionais, criando atributos fixos e variáveis representados por parâmetros e regras, permitindo que estes objetos sejam automaticamente ajustados conforme as necessidades do projetista. Através da utilização de objetos paramétricos, o profissional pode explorar diferentes alternativas projetuais de forma rápida e eficiente.

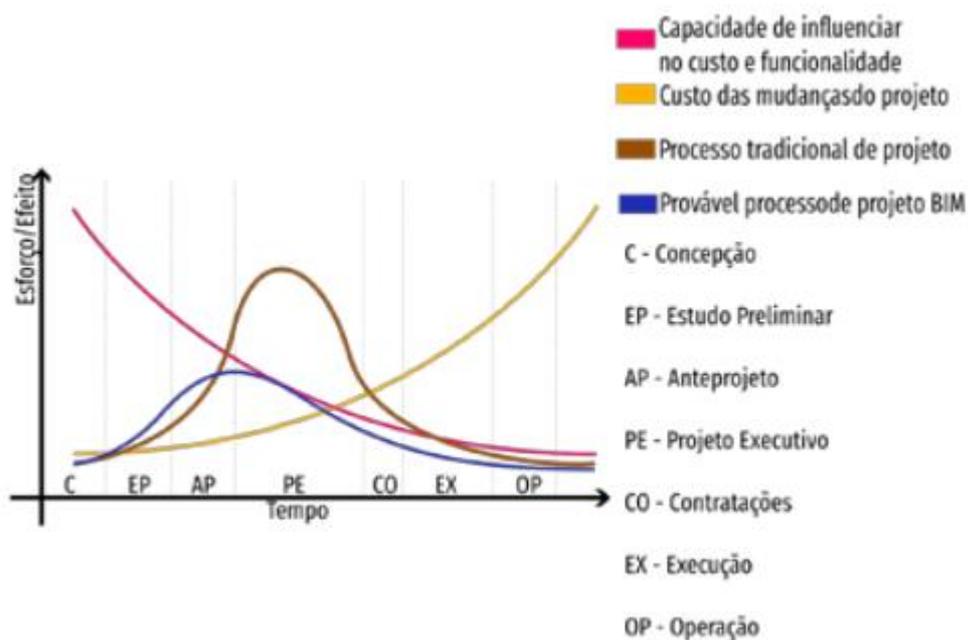
A Interoperabilidade é a capacidade de identificação dos dados projetuais entre diversos aplicativos, eliminando a necessidade de repetição dos dados de entrada, o que facilita o fluxo de informações. A possibilidade de combinar diferentes informações das várias áreas da AEC em um único modelo geométrico é a principal vantagem desta solução, permitindo que um mesmo modelo seja utilizado para diferentes aplicações, como a análise de desempenho (KOWALTOWSKI *et al.*, 2011). A interoperabilidade entre programas auxilia a colaboração entre projetistas, construtores e fabricantes, que passam a trabalhar de forma mais integrada e colaborativa.

Uma das contribuições do BIM para o processo projetual é a possibilidade de incorporar as avaliações de soluções projetuais, que consistem na avaliação do desempenho térmico, lumínico, estrutural, dentre outros, ainda na sua fase conceitual, o que permite uma grande influência nos custos, desempenho e na qualidade da edificação. “A utilização do modelo BIM no desenvolvimento de projetos altera não só o fluxo de informações, mas também as interfaces entre os projetistas e o coordenador

de projetos [...] A partir do processo BIM, o projeto deixa de ser entendido como linear e paralelo, e torna-se integrado” (DURANTE et al., 2015, p.02)

Através de uma interpretação da curva de McLeamy com as fases de desenvolvimento do projeto associadas ao processo BIM, demonstrado na Figura 5, é possível verificar que a principal diferença com o processo tradicional, é o maior esforço no BIM para tomada de decisões nas fases iniciais do projeto, que representam um maior impacto na qualidade final do produto, com menores custos de mudanças no projeto (ABDI, 2017a).

Figura 5 - Curva de McLeamy associada as etapas do projeto e o processo BIM



Fonte: ABDI (2017a).

A possibilidade de antecipar a maior quantidade de decisões projetuais ainda nas fases iniciais do projeto, ocasiona na redução de desperdícios e retrabalhos durante a fase de obras, refletindo diretamente no custo e na qualidade final da edificação. A definição de mais critérios na fase de concepção projetual permite a redução de incertezas e a melhoria na assertividade das soluções do projeto, tendo em vista que os componentes de um projeto em BIM não são meras representações gráficas, eles interagem entre si melhorando o entendimento como um todo do funcionamento da edificação (ABDI, 2017a).

2.5 Simulação de Desempenho Térmico com o uso do BIM

A utilização de ferramentas BIM para simulação de desempenho térmico possibilita a visualização de informações termofísicas dos materiais, uso e ocupação, dados climáticos do entorno, entre outras características da edificação durante as fases iniciais do projeto, antecipando as decisões projetuais a favor do desempenho térmico durante a modelagem inicial da edificação, que na análise tradicional só seriam levantadas após o detalhamento do projeto.

As análises termoenergéticas de edificações costumam ser complexas e onerosas, não sendo desenvolvidas durante as fases conceituais do projeto. A capacidade de integrar esse processo nas fases iniciais com o uso do BIM, permite a inserção de informações coordenadas e confiáveis acerca do projeto da edificação (ABANDA; BYERS, 2016).

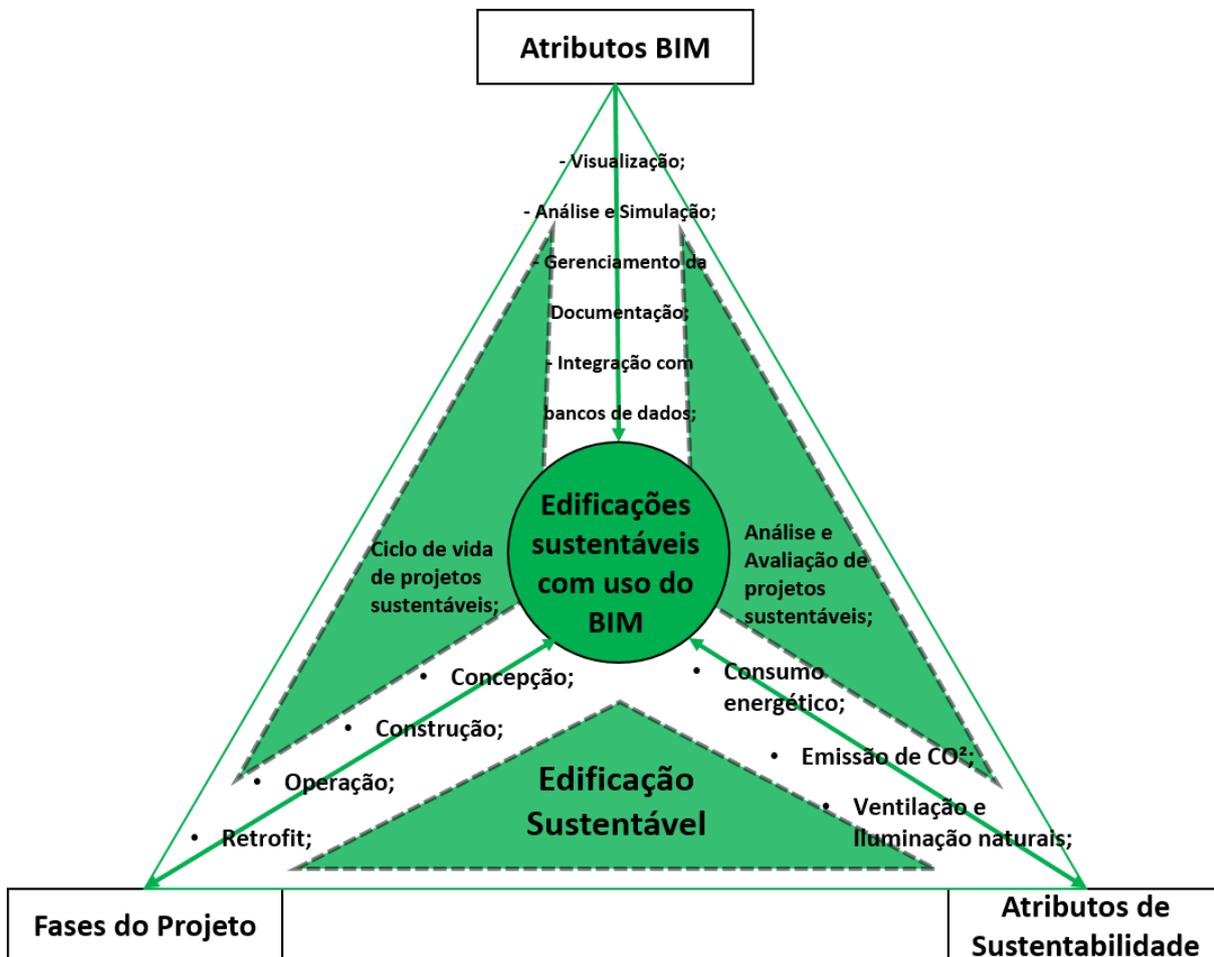
Porém, com a grande quantidade de informações que é possível inserir durante o desenvolvimento de um modelo BIM, é necessário mapear e organizar quais dados são importantes para a realização da simulação inicial. A utilização de *Information Delivery Manuals* (IDM), que são manuais que definem quais são as informações necessárias para cada tipo de análise em ferramentas BIM, auxilia no desenvolvimento das simulações na fase conceitual (BEAZLEY; HEFFERNAN; MCCARTHY, 2017).

A *US General Services Administration* (GSA) desenvolveu um IDM para a análise de desempenho térmico nas fases conceituais do projeto, apontando a necessidade do levantamento de informações do entorno da edificação, orientação solar, geometria dos elementos construtivos e utilização de configurações padrão de parâmetros avançados de análise (GSA, 2009), de forma a permitir a visualização do impacto da geometria proposta da edificação no seu desempenho térmico.

A análise de desempenho térmico com o uso de ferramentas BIM, faz parte de um conceito chamado de “*green BIM*” (CHANG, et al., 2017), que consiste num processo de modelagem focado na coordenação e gerenciamento de informações de todo o ciclo de vida da edificação, em busca da melhoria do desempenho termoenergético da edificação e o atendimento de critérios de sustentabilidade.

Chang et al. (2017) desenvolveu uma Taxonomia Triangular, conforme apresentado na Figura 6, que relaciona em 03 dimensões os processos e etapas de desenvolvimento de edificações sustentáveis com o uso do BIM.

Figura 6 - Taxonomia Triangular do desenvolvimento de Edificações Sustentáveis com uso do BIM



Fonte: Adaptado de Chang et al. (2017)

Os “Atributos BIM”, que seriam a dimensão em que as ferramentas BIM se enquadram, representam as funcionalidades que estas ferramentas permitem na fase de elaboração da edificação, como a visualização do modelo digital, a realização de análises de desempenho e simulações, o gerenciamento e documentação das principais informações da edificação, e a integração com bancos de dados entre ferramentas que utilizam a mesma metodologia.

A dimensão de “Fases do Projeto” apresenta as diferentes etapas do ciclo de vida de uma edificação, da concepção do projeto a um possível *retrofit* na solução original e a demolição final da edificação. Essas fases são subsidiadas pela dimensão

de “Atributos de Sustentabilidade”, representando a análise e avaliação da edificação com as ferramentas BIM, através de simulações de desempenho termoenergético para verificação do consumo energético, análise da emissão de carbono durante todo o ciclo de vida da edificação, a iluminação e ventilação natural, conforto acústico, entre outros critérios de desempenho que permitem que a edificação atenda parâmetros de sustentabilidade, como o menor desperdício de energia, e a redução no consumo de materiais.

Segundo Chang et al. (2017), as ferramentas BIM permitem uma visualização mais intuitiva das informações relacionadas ao desempenho e processos de sustentabilidade da edificação, permitindo que a equipe de desenvolvimento da edificação, composta por projetistas, construtores, e empreendedores tomem decisões favoráveis ao meio ambiente.

De forma a mapear as principais ferramentas BIM para a análise de parâmetros de sustentabilidade, Chang et. al (2017) desenvolveram uma tabela com 12 dos principais programas no mercado, conforme Tabela 1, verificando a possibilidade de análise energética, emissão de carbono, ventilação natural, iluminação natural, desempenho acústico e consumo de água.

Tabela 1 - 12 principais ferramentas BIM para análise de parâmetros de sustentabilidade

Ferramentas BIM	Análises de Sustentabilidade					
	AE	EC	VN	IN	DA	CA
Autodesk® Green Building Studio	x	x	x	x		x
IES® VE	x	x	x	x		x
Bentley Hevacomp	x	x	x			
AECOSim	x	x		x		
EnergyPlus	x	x	x	x		x
HEED	x	x				
DesignBuilder Simulation	x	x	x	x		
eQUEST	x		x	x		
DOE2	x		x	x		
FloVENT			x			
ODEON					x	
TRNSYS	x		x	x		

AE = Análise Energética, EC = Emissão de Carbono, VN = Ventilação Natural, IN = Iluminação Natural, DA = Desempenho Acústico, CA = Consumo de Água

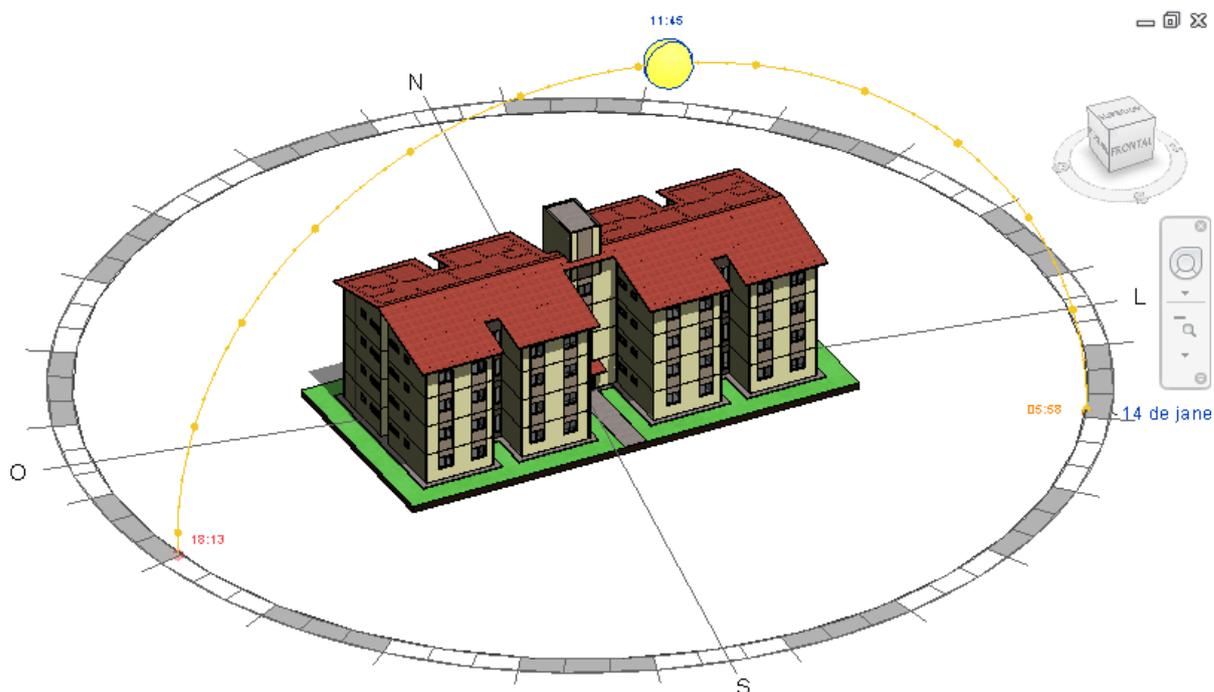
Fonte: Adaptado de Chang et al. (2017)

Após análise da tabela, é possível verificar que o Autodesk® Green Building Studio e o IES® VE são as ferramentas que permitem a análise de mais parâmetros de sustentabilidade, seguidos pelo DesignBuilder Simulation levando em conta a análise de emissão de carbono e de parâmetros aplicáveis ao desempenho térmico das edificações (Análise Energética, Ventilação Natural e Iluminação Natural).

Durante o levantamento das principais ferramentas computacionais para análise do desempenho térmico de edificações habitacionais, Mahmud et al. (2018) destaca o uso da ferramenta BIM MC4Suite para simulação térmica, com a análise das temperaturas de pico no verão e inverno, o dimensionamento de placas fotovoltaicas permitindo a análise da utilização de energias alternativas pela edificação, e da trajetória solar na edificação.

A visualização da trajetória solar na edificação, conforme Figura 7, é um parâmetro fundamental da análise do desempenho térmico-energético, permitindo a verificação da incidência da radiação solar nas fachadas da edificação, e uma rápida checagem do sombreamento nas fachadas durante os horários com maior incidência de radiação solar.

Figura 7 - Análise de trajetória solar na edificação com uso do Autodesk Revit® 2017



Fonte: O Autor (2019)

Utilizando o Autodesk Revit® em conjunto com o Green Building Studio, Abanda e Byers (2016) desenvolveram a análise do consumo energético de uma edificação através da simulação de vários cenários da sua orientação solar, permitindo verificar uma economia de aproximadamente 5% no consumo de energia elétrica, comparando a melhor com a pior orientação.

2.6 Ferramentas BIM e a análise de desempenho térmico de edificações

Nesta etapa serão analisadas as principais ferramentas de simulação de desempenho térmico que trabalham em conjunto com o Autodesk Revit®, um dos programas mais populares na indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) para desenvolvimento de edificações em BIM (ABANDA; BYERS, 2016).

A escolha das ferramentas levou em consideração o levantamento de Chang, et al., 2017, onde foram identificadas as 12 ferramentas BIM mais populares para análises de sustentabilidade, sendo destacadas as 3 que possuíam mais parâmetros de verificação como Consumo Energético, Emissão de Carbono, Ventilação Natural,

Radiação Solar e Iluminação Natural. Dessa forma, foram escolhidos os softwares Autodesk® Green Building Studio, Integrated Environmental Solutions® Virtual Environment, e DesignBuilder®, que podem atuar na forma de programas independentes ou plug-ins² dentro do Revit.

Para levantamento das funcionalidades dos programas de simulação, foram analisados de que forma os programas trabalham com os parâmetros apresentados no *Information Delivery Manual* (IDM) para análises energéticas em programas BIM (GSA, 2009), durante a fase de concepção do projeto, considerando-se:

- Geometria da edificação, incluindo o layout e configuração dos ambientes internos;
- Orientação solar da edificação;
- Propriedades térmicas dos sistemas e materiais que integram a edificação;
- Tipo de utilização (Residencial, comercial, institucional, entre outros);
- Cargas internas (Troca de calor) e dados de iluminação, ocupação e equipamentos;
- Análise de cargas de aquecimento/resfriamento, ventilação e características de operação dos sistemas de ar-condicionado e aquecedores elétricos;
- Dados da estação climática.

Além dos parâmetros descritos no *IDM*, foram avaliados se os programas possuem validação de suas simulações por norma de verificação de confiabilidade, e se possuem licença livre ou estudantil de utilização.

2.6.1 Autodesk® Green Building Studio - GBS

O Autodesk® Green Building Studio, é um *software* de análise de desempenho de edificações que opera através de sistema de nuvem, no formato gbxml, podendo ser utilizado online ou através de programas BIM como o Autodesk® Revit ou Vasari.

² Plug-ins são extensões ou ferramentas que são instalados em programas hospedeiros de forma a adicionar novos recursos e funções ao programa original (CAMBRIDGE, 2019)

O GBS (Green Building Studio) utiliza o DOE 2.2 como motor de simulação para estimativa de consumo energético e custo de operação das edificações, processando os dados da geometria da edificação, materiais, sistemas, tipo de ocupação e dados climáticos (AUTODESK, 2019), sendo possível verificar a velocidade do vento, temperatura externa e interna do ar, radiação solar no envelope construtivo, entre outros.

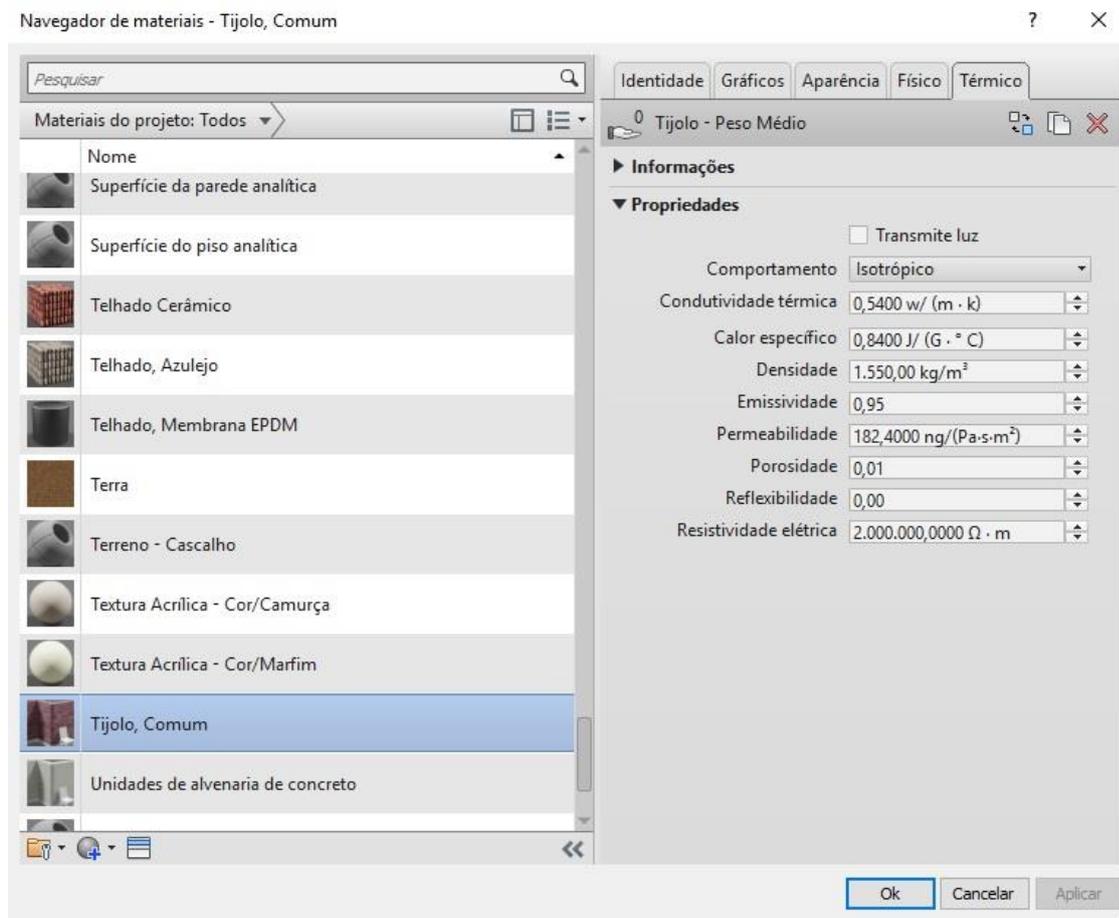
O GBS não possui ferramentas para modelagem da geometria da edificação dentro da sua plataforma, sendo utilizado o Revit® ou Vasari® para elaboração do modelo e posterior desenvolvimento da simulação de desempenho. A orientação da edificação deve ser definida no *software* de modelagem, junto da inserção dos dados térmicos dos materiais e elementos construtivos.

Na Figura 8 é possível verificar a janela de configuração dos materiais, onde dentre as características térmicas, é possível inserir dados de Condutividade térmica, Calor Específico, Densidade, Emissividade, Permeabilidade, Porosidade, Reflexibilidade, Resistividade elétrica, além do comportamento térmico do material, que pode ser Isotrópico³ ou Ortotrópico⁴, e se possui transmissão de luz (Superfície opaca ou translúcida).

³ Característica do material em que suas propriedades mecânicas e térmicas são as mesmas em todas as direções (DASSAULT SYSTEMES,2012)

⁴ Característica do material em que suas propriedades mecânicas e térmicas são únicas e independentes nas três direções mutuamente perpendiculares (DASSAULT SYSTEMES, 2012)

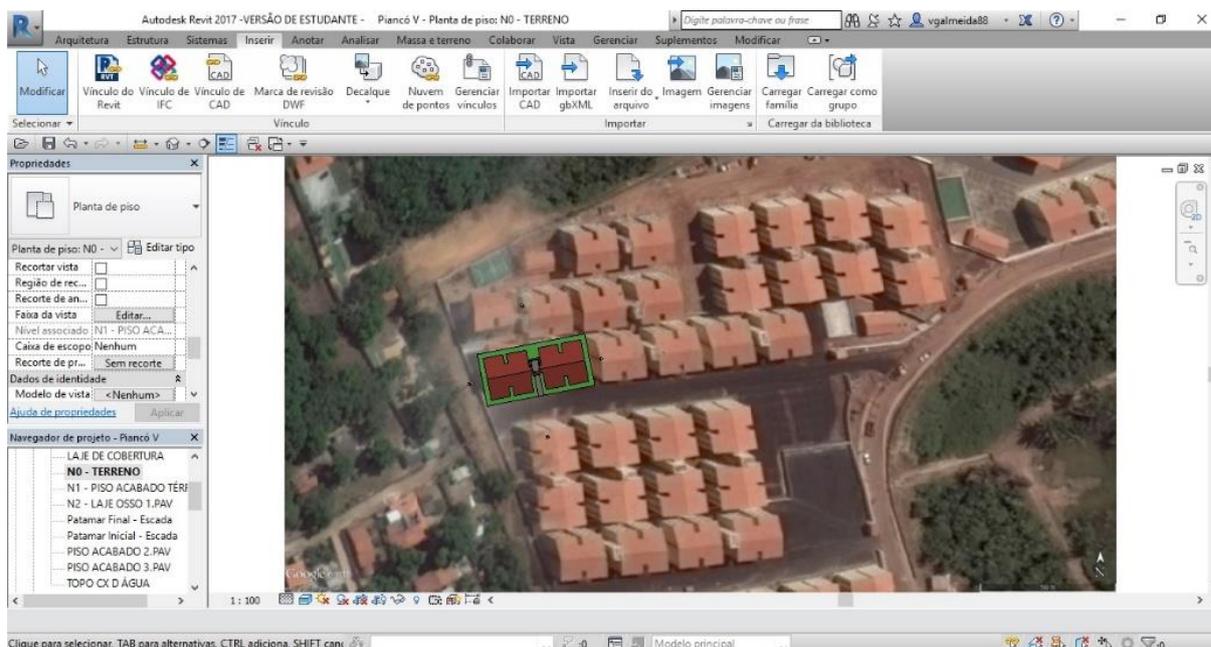
Figura 8 - Configuração das características térmicas dos materiais no Revit



Fonte: O Autor (2019).

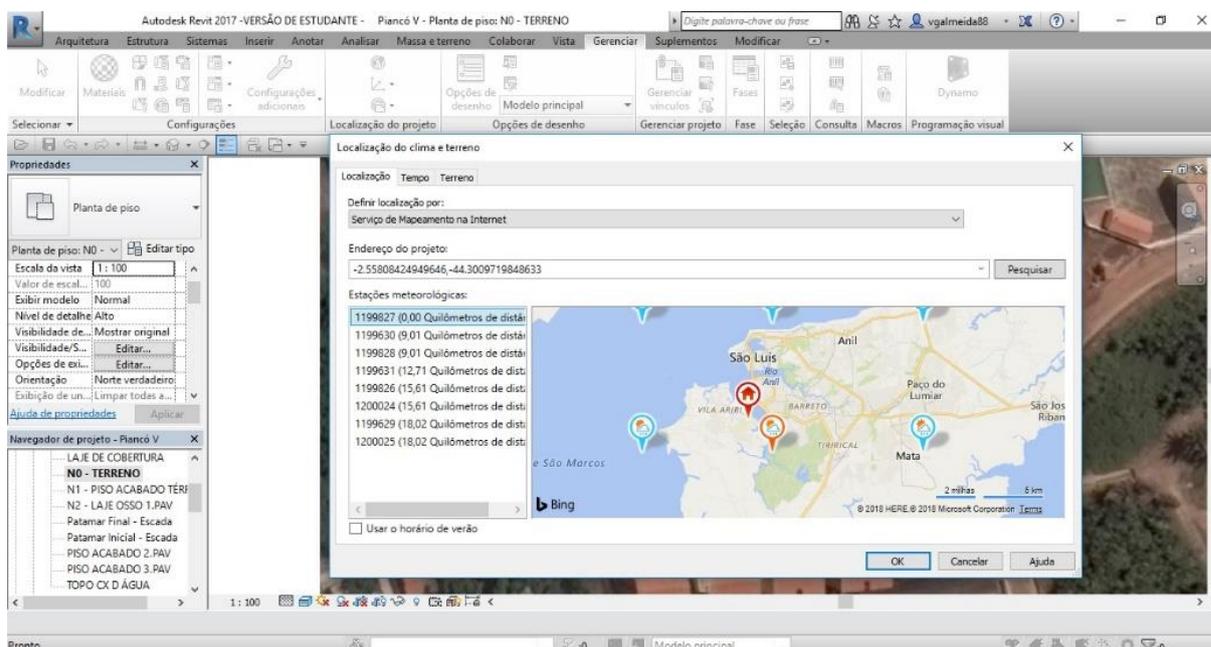
A orientação e o entorno da edificação também são configurados no programa de modelagem, conforme Figura 9, através da definição do norte do projeto e modelagem de possíveis edificações ou obstáculos que estejam no entorno da edificação em análise, e que possam interferir no seu desempenho térmico. O programa também permite inserir as coordenadas geográficas da edificação, destacado na Figura 10, que serão utilizadas para identificação da estação climática mais próxima, e coleta dos dados climáticos do entorno, que serão aproveitados para a simulação no GBS. O Revit® possui um banco de dados com diversas estações climáticas, porém não é possível carregar novas estações ou arquivos climáticos.

Figura 9 - Definição da orientação solar no Revit



Fonte: O Autor (2019).

Figura 10 - Configuração das Coordenadas Geográficas e escolha da Estação Climática no Revit

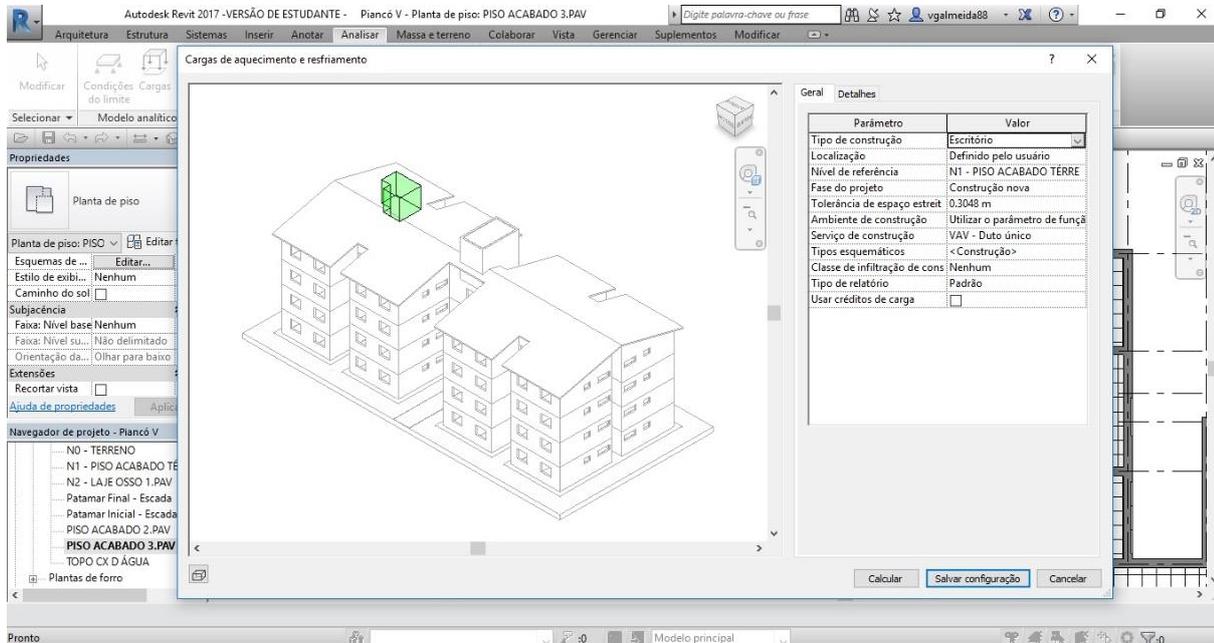


Fonte: O Autor (2019).

Os dados de utilização da edificação são inseridos diretamente no Revit®, na etapa de configuração do modelo energético, para que sejam calculadas as cargas de resfriamento e aquecimento da edificação, conforme Figura 11. Após essa etapa é

possível verificar dados de trocas de calor dos ambientes internos com o externo, tabelas com cargas de iluminação, ocupação, e equipamentos, além das cargas de aquecimento, resfriamento, ventilação e as características de ocupação da edificação.

Figura 11 - Configuração de dados para cálculo das cargas de aquecimento e resfriamento no Revit



Fonte: O Autor (2019).

O programa possui três metodologias para análise do desempenho da edificação, partindo de uma análise simplificada para a mais abrangente. A primeira chama-se *Conceptual Massing Elements*, que permite uma análise de desempenho inicial, através de uma modelagem básica da geometria da edificação. A segunda, chamada de *Room/Space Elements*, onde é desenvolvida uma análise separada dos ambientes da edificação e a última e mais criteriosa das três metodologias, chamada de *Building Elements*, permitindo a análise das características térmicas de todos os elementos da edificação (vedações, forros, pisos, entre outros).

Cada metodologia possui sua vantagem e desvantagem, considerando o tipo de análise que será realizado pelo usuário. A conceitual, mais voltada para análise da geometria da edificação, permite a verificação da incidência da radiação solar no envelope construtivo, e os pontos de sombreamento nas fachadas, porém não apresenta dados de trocas térmicas e o comportamento térmico dos ambientes internos. A segunda metodologia já possui mais informações do modelo, como área de piso, volume dos ambientes, podendo ser direcionada a análise de ambientes em específico trabalhando com zonas térmicas, e a última metodologia, mais robusta das

três, permite uma análise da edificação como um todo, através da leitura de todos os elementos da edificação.

Após a realização da simulação, o GBS apresenta um relatório com gráficos, tabelas, e desenho esquemáticos, com os principais dados do comportamento térmico da edificação e do seu entorno, que pode ser apresentado diretamente na interface do Revit, ou na página digital do Green Building Studio, dentre os principais dados de saída que a ferramenta apresenta na interface do Revit, podem ser destacados os seguintes:

- Fatores de desempenho do edifício;
- Rosa dos Ventos Anual;
- Dados mensais do projeto;
- Média diurna do clima;
- Cargas de aquecimento e resfriamento.

Os Fatores de desempenho do edifício, destacado na Figura 12, apresentam dados gerais sobre a localização da edificação, os dados de temperatura externa obtidos através da estação meteorológica, as informações de área dos elementos construtivos, entre outros dados de consumo.

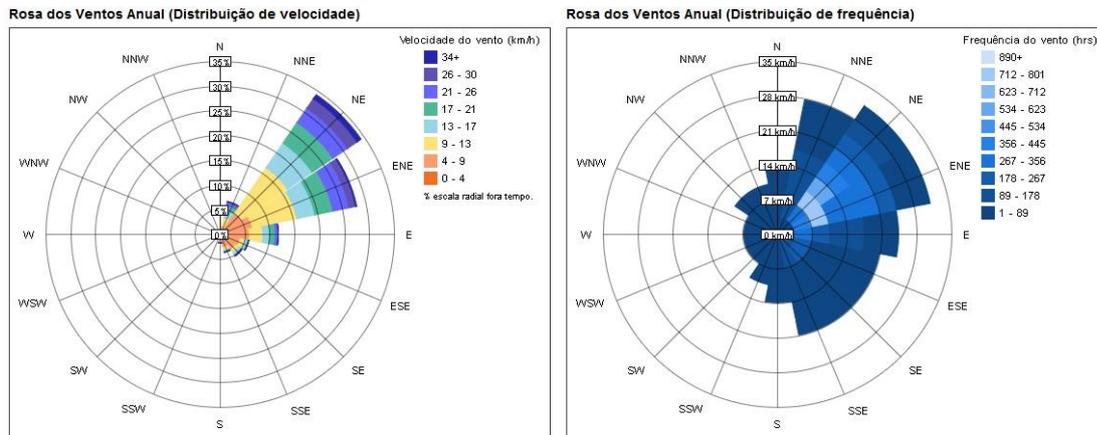
Figura 12 - Fatores de desempenho do edifício, apresentado em relatório de simulação do GBS

Fatores de desempenho do edifício	
Localização:	-2.55808424949646,-44.3009719848633
Estação de meteorologia:	1199827
Temperatura externa:	Máx: 35°C/Mínimo: 21°C
Área do piso:	1.407 m ²
Área da parede externa:	1.834 m ²
Potência média de iluminação:	9.69 W/m ²
Pessoas:	26 pessoas
Coefficiente de janela externa:	0,11
Custo de eletricidade:	\$ 0,12/kWh
Custo de combustível:	\$ 1,25/Térmica

Fonte: O Autor (2019)

Na Figura 13 é possível verificar a Rosa de ventos anual, que apresenta valores de ventilação durante todos os meses do ano, destacando a velocidade do vento em km/h e a sua frequência em horas.

Figura 13 - Rosa dos ventos anual, apresentada em relatório de simulação do GBS

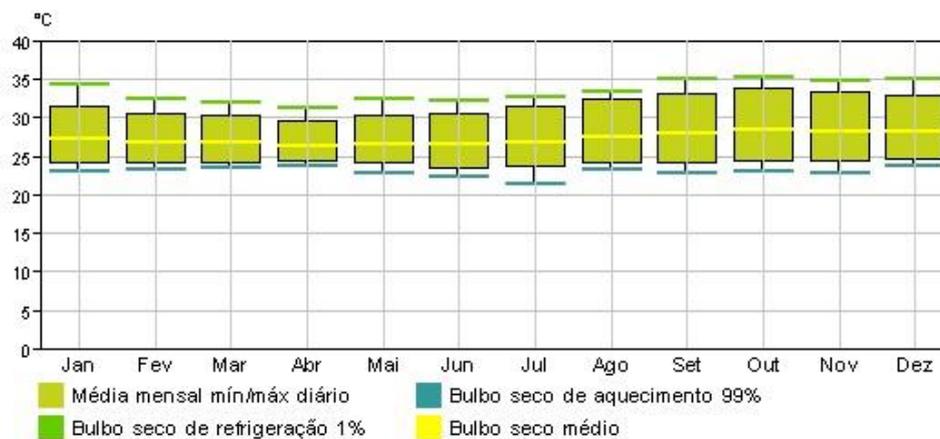


Fonte: O Autor (2019)

Os dados mensais de projeto, apresentados na Figura 14, apresentam a média mensal das temperaturas mínimas e máximas diárias, e as temperaturas de bulbo seco de refrigeração, de aquecimento, e o valor médio mensal.

Figura 14 - Dados mensais do projeto, apresentado em relatório de simulação do GBS

Dados mensais do projeto

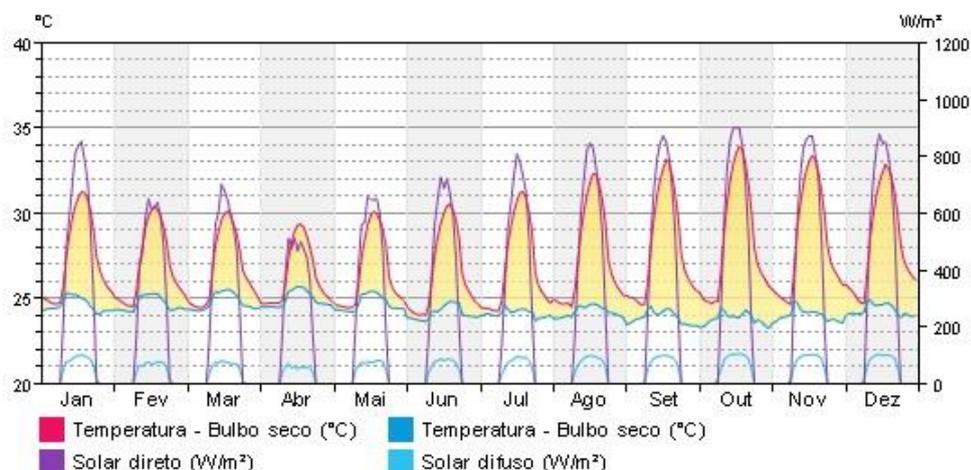


Fonte: O Autor (2019)

A média diurna do clima, apresentada na Figura 15, destaca os picos de temperatura de bulbo seco ao longo do ano, em relação a quantidade de radiação solar direta e difusa, que incidem na edificação, sendo possível evidenciar a temperatura máxima e mínima diurna anual.

Figura 15 - Média diurna do clima, apresentada em relatório de simulação do GBS

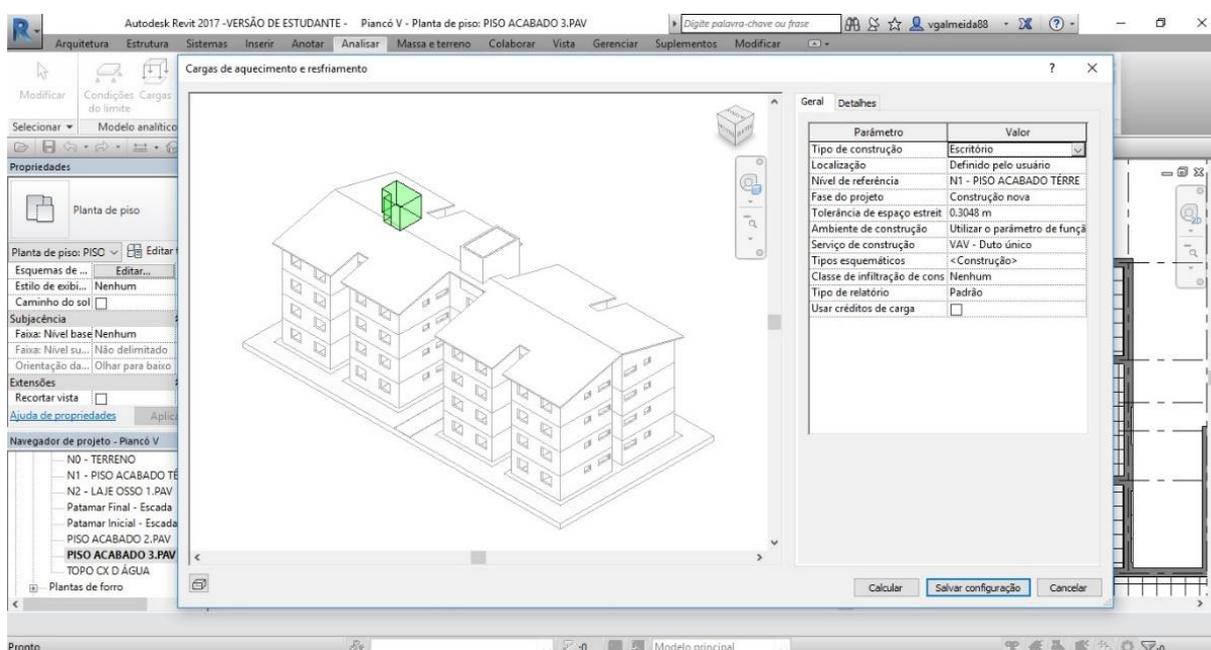
Média diurna do clima



Fonte: O Autor (2019)

As cargas de resfriamento e aquecimento da edificação são apresentadas a partir da definição de uma zona térmica na edificação, conforme destacado na Figura 16.

Figura 16 - Configuração de uma Zona Térmica na edificação modelada no Revit



Fonte: O Autor (2019)

Após definição da zona térmica e realização dos cálculos das cargas de aquecimento e resfriamento, é gerado uma tabela, conforme Figura 17, que apresenta os dados de entrada do ambiente pré-definido, dados psicométricos para dimensionamento de equipamento de aquecimento e resfriamento, resultados calculados e verificação de somas, e uma tabela da contribuição térmica dos elementos e componentes da edificação, destacado na Figura 18.

Figura 17 - Dados de saída do cálculo das cargas de aquecimento e resfriamento

Resumo da região - 1	
Entradas	
Área (m ²)	8
Volume (m ³)	20,88
Ponto de definição de resfriamento	23 °C
Ponto de definição de aquecimento	21 °C
Temperatura do suprimento de ar	12 °C
Número de pessoas	1
Infiltração (L/s)	0,0
Tipo de cálculo do volume de ar	VAV - Duto único
Umidade relativa	44,00% (Calculated)
Psicométricas	
Mensagem psicométrica	None
Temperatura do bulbo seco na entrada da serpentina de resfriamento	28 °C
Temperatura do bulbo molhado na entrada da serpentina de resfriamento	19 °C
Temperatura do bulbo seco na saída da serpentina de resfriamento	12 °C
Temperatura do bulbo molhado na saída da serpentina de resfriamento	14 °C
Temperatura do bulbo seco do ar misto	28 °C
Resultados calculados	
Carga total de pico de resfriamento (W)	3,390
Mês e hora do pico de resfriamento	Janeiro 17:00
Carga sensível do pico de resfriamento (W)	3,372
Carga latente do pico de resfriamento (W)	18
Fluxo de ar do pico de resfriamento (L/s)	182,3
Carga do pico de aquecimento (W)	255
Fluxo de ar do pico de aquecimento (L/s)	17,3
Fluxo de ar do pico de ventilação (L/s)	0,0
Verificação de somas	
Densidade da carga de resfriamento (W/m ²)	427,02
Densidade do fluxo de resfriamento (L/(s·m ²))	22,96
Fluxo / Carga de resfriamento (L/(s·kW))	53,77
Área / Carga de resfriamento (m ² /kW)	2,34
Densidade da carga de aquecimento (W/m ²)	32,06
Densidade do fluxo de aquecimento (L/(s·m ²))	2,18
Densidade da ventilação (L/(s·m ²))	0,00
Ventilação / Pessoa (L/s)	0,0

Fonte: O Autor (2019)

Figura 18 - Contribuição em percentual dos elementos da edificação nas cargas de aquecimento e resfriamento

Cooling Components	Total (W)	Percentage	Norte (W)	Sul (W)	Leste (W)	Oeste (W)	Nordeste (W)	Sul este (W)	Noroeste (W)	Sudeste (W)
Parede	3,066	92.38%	794	324	604	1,344	0	0	0	0
Janela	35	1.05%	35	0	0	0	0	0	0	0
Porta	51	1.54%	0	51	0	0	0	0	0	0
Telhado	46	1.39%	-	-	-	-	-	-	-	-
Clareabóia	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partição	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltração	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Iluminação	49	1.49%	-	-	-	-	-	-	-	-
Alimentação	24	0.72%	-	-	-	-	-	-	-	-
Pessoas	47	1.42%	-	-	-	-	-	-	-	-
Plenum	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	3,319	100%	829	375	604	1,344	0	0	0	0
Heating Components	Total (W)	Percentage	Norte (W)	Sul (W)	Leste (W)	Oeste (W)	Nordeste (W)	Sul este (W)	Noroeste (W)	Sudeste (W)
Parede	239	93.91%	54	54	67	64	0	0	0	0
Janela	5	2.10%	5	0	0	0	0	0	0	0
Porta	9	3.36%	0	9	0	0	0	0	0	0
Telhado	2	0.64%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partição	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Clareabóia	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltração	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	255	100%	59	63	67	64	0	0	0	0

Fonte: O Autor (2019)

A ferramenta apresenta, na interface do Revit, um relatório geral com todos os dados de saída da análise termoenergética da edificação, sendo permitindo ao usuário a seleção de quais dados de saída serão exibidos apenas na opção de leitura dos resultados na página online do Green Building Studio. O GBS possui validação das suas simulações pela norma ANSI/ASHRAE Standard 140, através do *Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*, e certificado pelo *U.S. Department of Energy* (AUTODESK, 2019), com seus últimos relatórios datados de outubro de 2013.

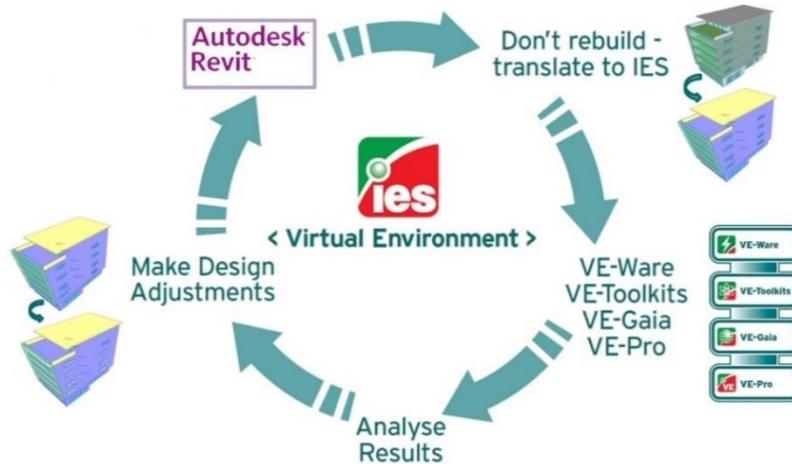
Para utilização do programa, é possível solicitar uma licença estudantil, através de cadastro de um e-mail no sistema da Autodesk®, a licença permite a utilização de todos os recursos do programa, bem como acesso a fóruns e páginas de ajuda.

2.6.2 Integrated Environmental Solutions® Virtual Environment – IES-VE

O *Virtual Environment* é um programa desenvolvido pela *Integrated Environmental Solutions®* que possui uma mecânica de uso similar ao GBS, conforme apresentado na Figura 19, sendo possível utilizar o modelo geométrico de uma edificação desenvolvida no Revit para posterior desenvolvimento de simulação de

desempenho termoenergético através da exportação dos dados da edificação no formato gbxml, ou utilização de um plug-in direto na interface do programa BIM.

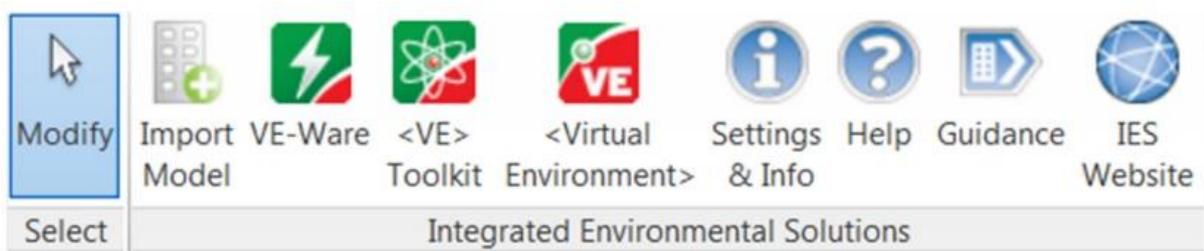
Figura 19 – Ciclo de trabalho no Virtual Environment



Fonte: IES (2019)

O IES-VE pode utilizar os dados térmicos dos elementos construtivos, a orientação e localização da edificação configurados no Revit para desenvolvimento das simulações de desempenho térmico, sendo utilizado no mesmo ambiente de trabalho do programa de modelagem na forma de um plug-in, demonstrado na Figura 20, limitado às versões do Revit 2008 à 2016.

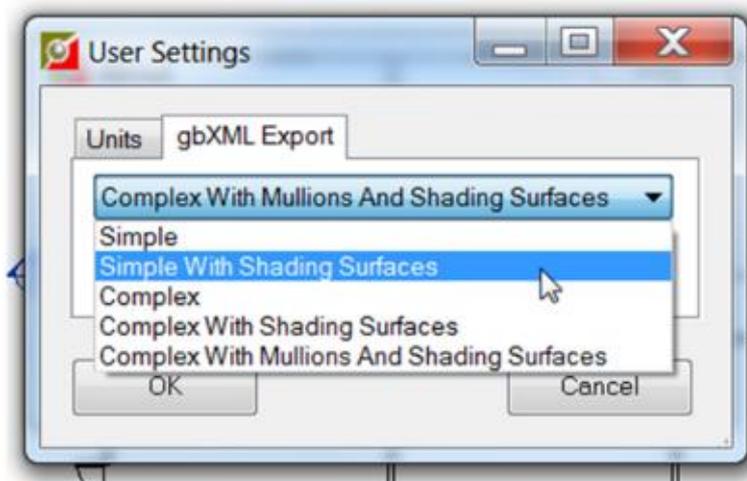
Figura 20 - Plugin do IES-VE na interface do Revit



Fonte: IES (2014)

O plug-in apresenta cinco formas de exportação da geometria da edificação para a simulação de desempenho, destacado na Figura 21, dependendo do tipo de análise que o usuário pretende alcançar.

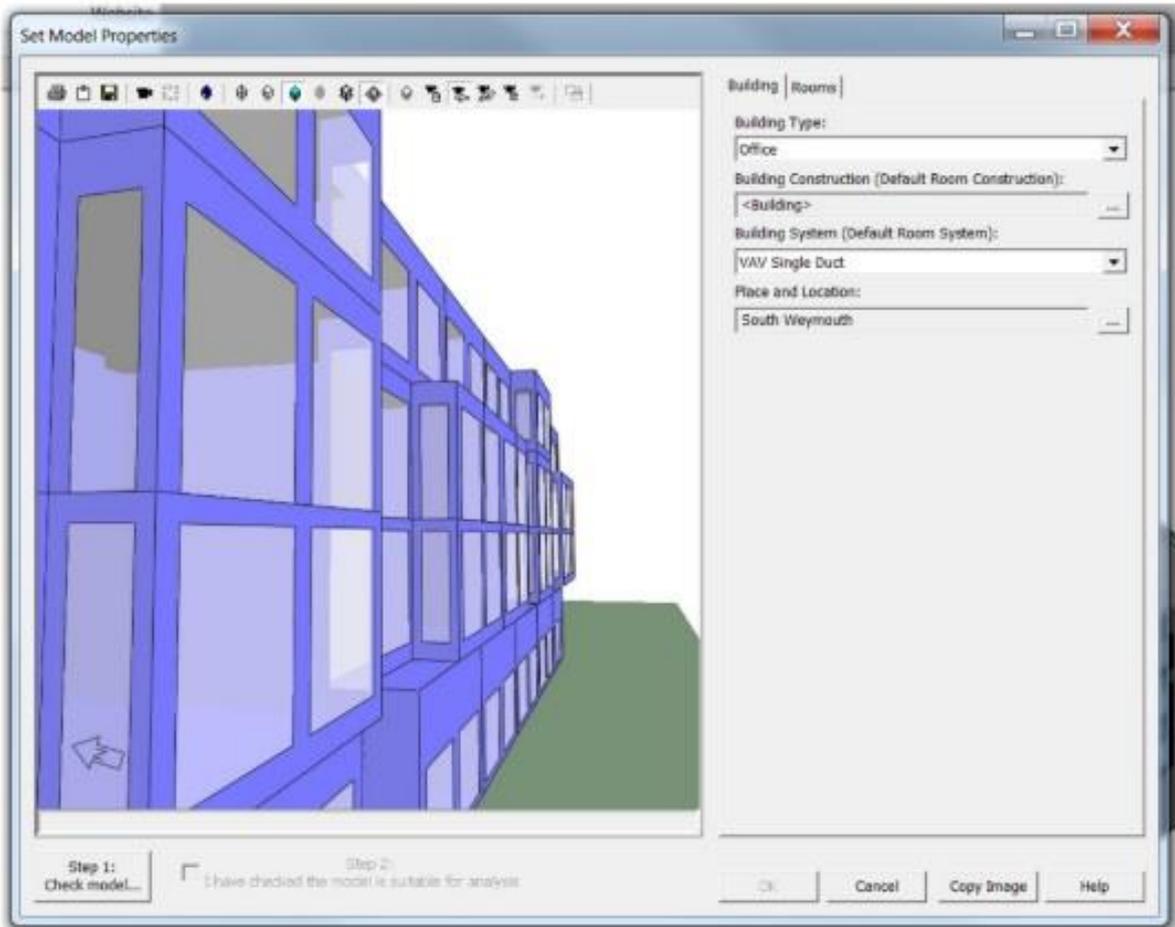
Figura 21 - Formas de exportação do modelo geométrico para análise de desempenho no IES-VE



Fonte: IES (2014)

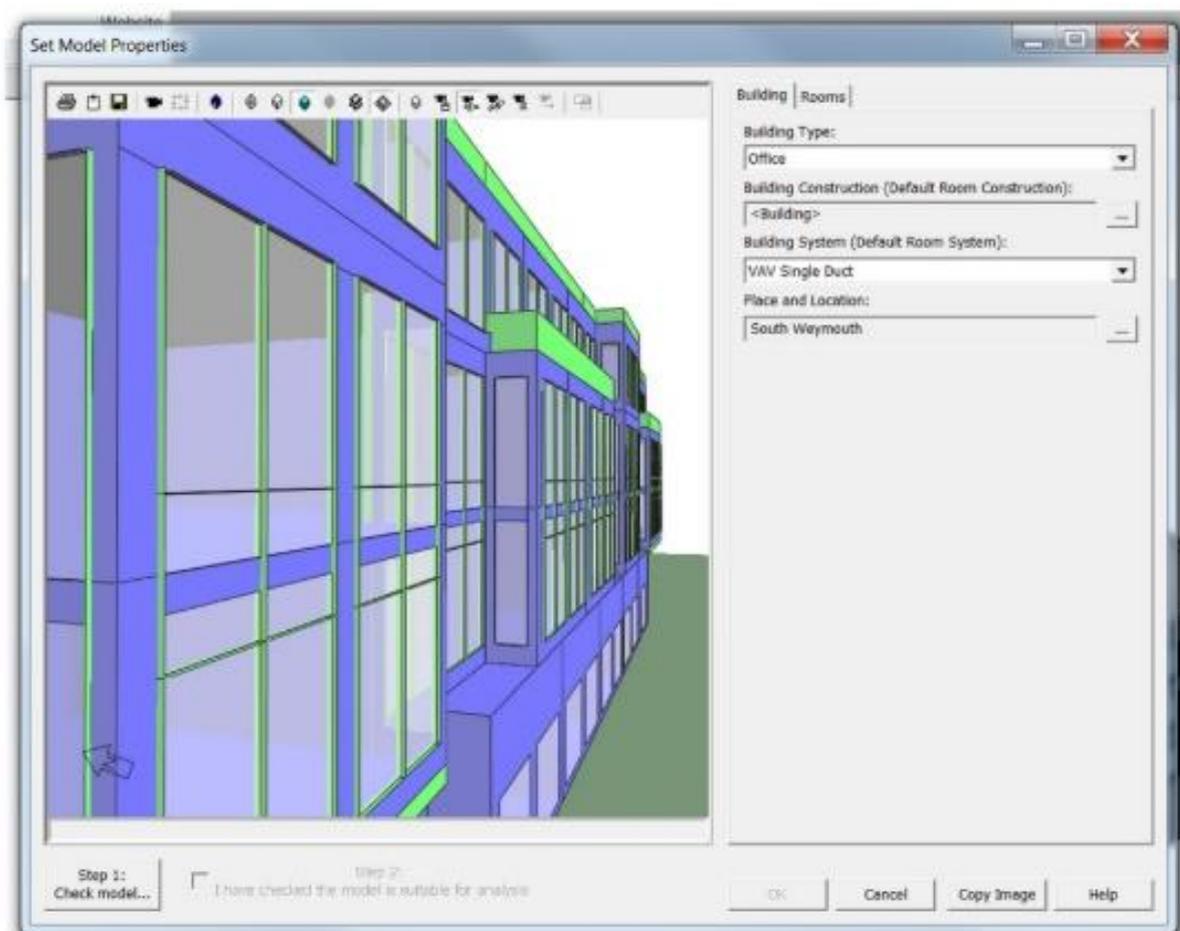
O modo *Simple*, demonstrado na Figura 22, é mais indicado para simulações rápidas e nas fases conceituais de projeto, considerando todas as aberturas de vidros e de paredes cortina como uma única face translúcida, de forma a deixar o modelo mais leve, o modo *Simple With Shading Surfaces* possui as mesmas configurações do modo anterior, com o acréscimo das sombras dos elementos da edificação. Para simulações mais complexas existem os modos *Complex*, *Complex With Shading Surfaces* e *Complex With Mullions And Shading Surfaces*, conforme demonstrado na Figura 23, com uma leve diferença no nível de detalhamento das esquadrias de vidros e paredes cortina, e a presença ou não do sombreamento na edificação.

Figura 22 - Exportação no modo Simple



Fonte: IES (2014)

Figura 23 - Exportação no modo Complex



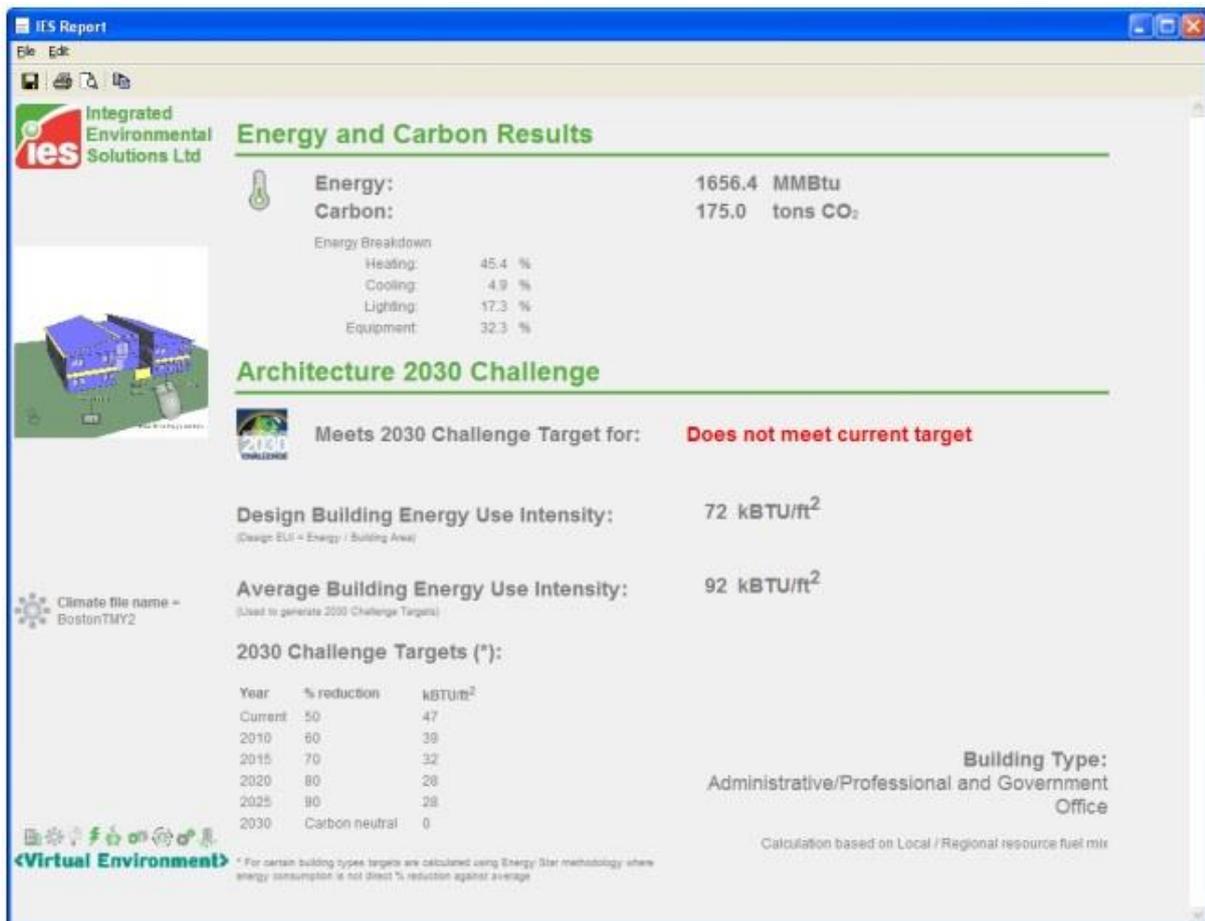
Fonte: IES (2014)

Na aba *Set Model Properties*, é possível configurar o tipo da edificação, *Building Type*, que pode ser residencial, escritório, hotel, educacional, entre outros, o sistema construtivo, *Building Construction*, que considera os elementos construtivos modelados da edificação ou a escolha de sistemas construtivos padrão, os sistemas de aquecimento e resfriamento da edificação, *Building System*, e por último a localização do edifício, *Place and Location*, esses parâmetros devem ser configurados para posterior desenvolvimento das simulações de desempenho com o plug-in.

O IES-VE possui duas opções de simulação de desempenho, o *VE-Ware*, que através de uma simulação básica de desempenho termoenergético apresenta dados anuais do consumo energético, emissão de carbono, contribuição de cada sistema da edificação no consumo energético (aquecimento, resfriamento, iluminação e

equipamentos) e o alcance das metas do *Architecture 2030 Challenge* (IES, 2008), conforme Figura 24.

Figura 24 - Aba de resultados da simulação energética no Ve-Ware

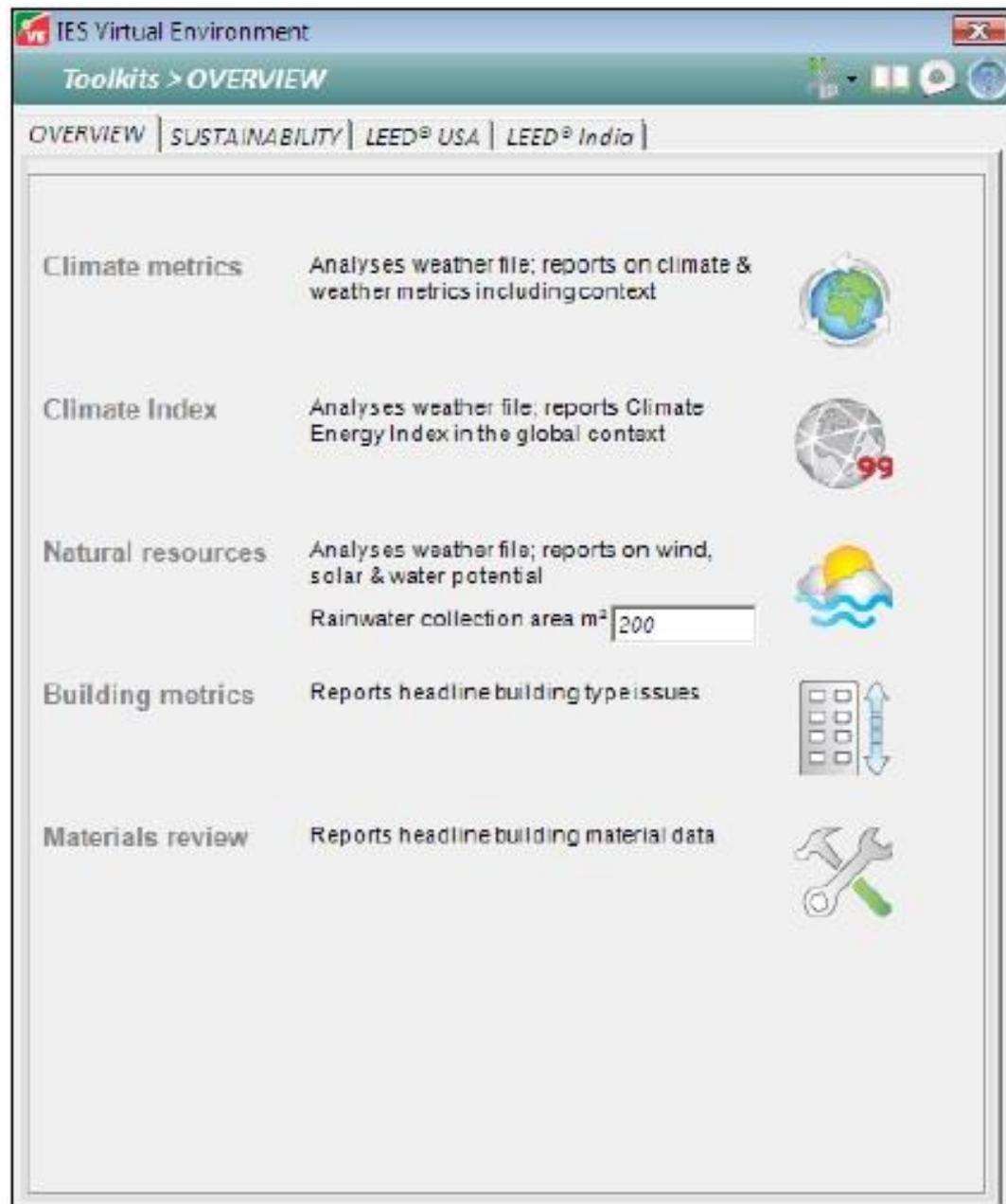


Fonte: IES (2014)

O <Ve>*Toolkit* permite uma análise de desempenho mais completa da edificação, sendo possível verificar o atendimento de critérios de normas e certificações como o *LEED*, e demais requisitos de sustentabilidade, como consumo de água, cargas de aquecimento e resfriamento, análise de sombreamento, iluminação natural e artificial e análise de tecnologias de baixa e zero emissão de carbono (IES, 2015a).

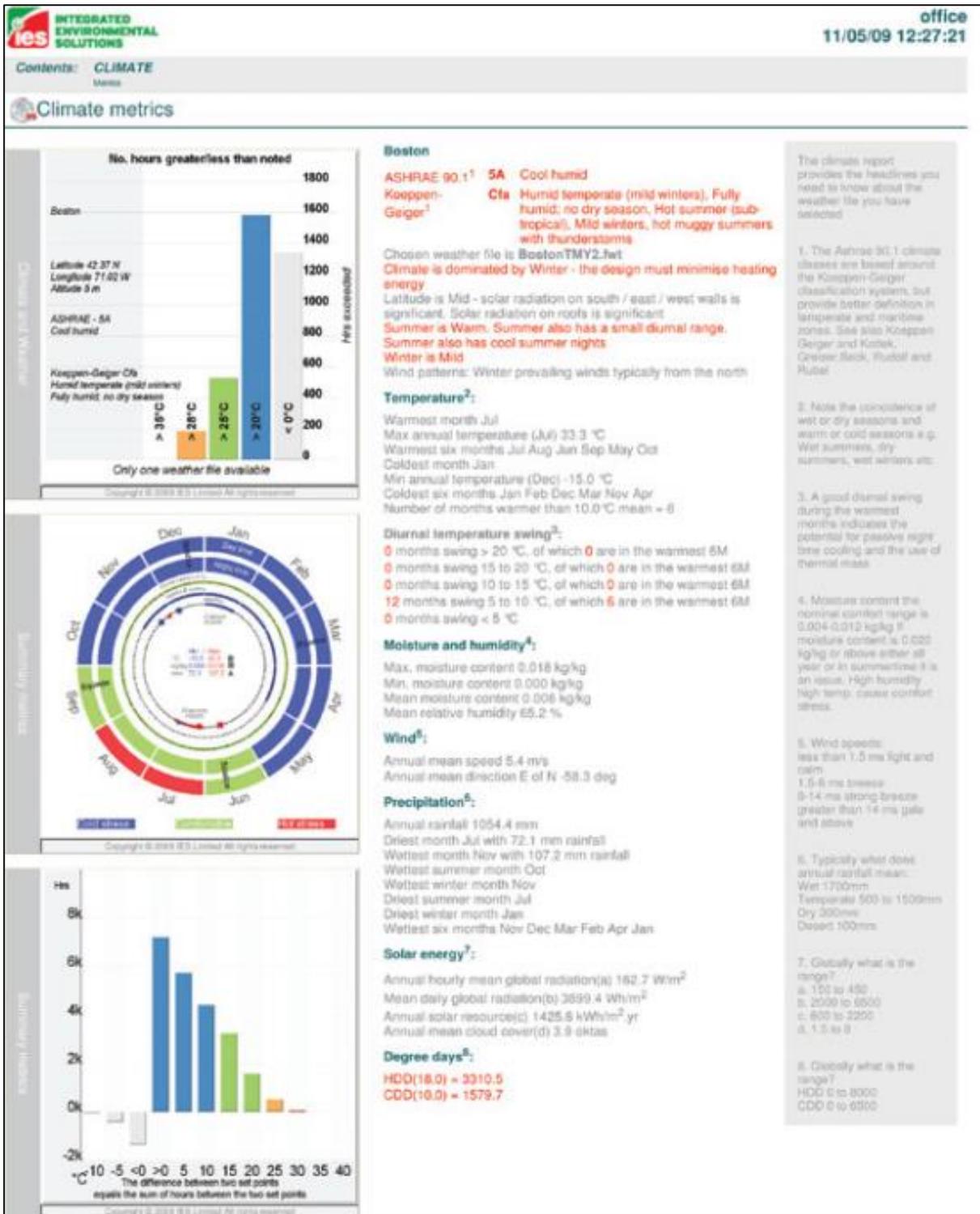
Na aba *Overview*, conforme apresentado na Figura 25, é possível acessar a funcionalidade *Climate Metrics*, destacado na Figura 26, que apresenta um relatório com o resumo dos principais dados climáticos do entorno da edificação, como temperatura externa, umidade do ar, velocidade e direção do vento, dados de precipitação, entre outros, baseados nos sistemas de classificação da ASHRAE 90.1 e Koeppen-Ginger (IES, 2015).

Figura 25 - Aba Overview do <VE> Toolkits



Fonte: IES (2015)

Figura 26 - Relatório apresentado na funcionalidade Climate Metrics

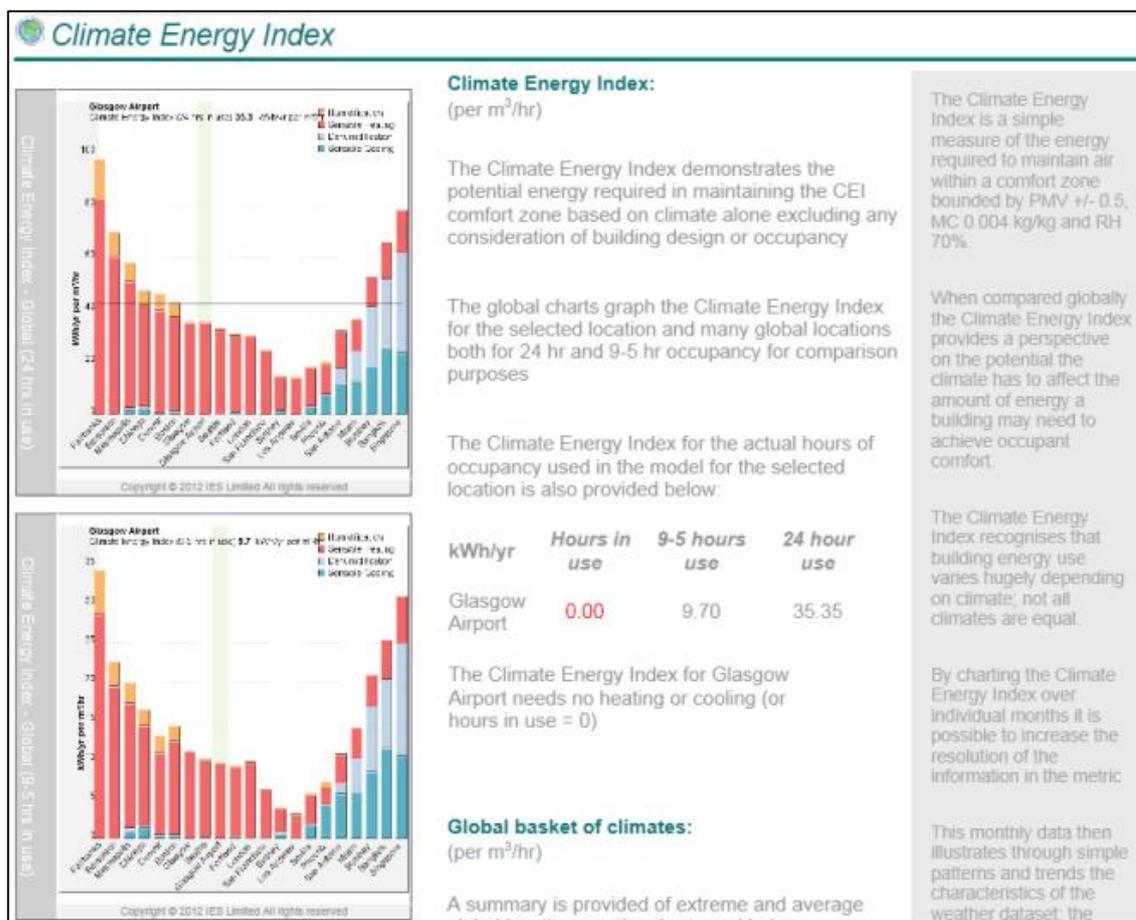


Fonte: IES (2009)

Na opção *Climate Index*, conforme destacado na Figura 27, é apresentado um relatório com o potencial que o clima do entorno possui no consumo de energia para que a edificação atenda aos critérios de conforto dos usuários, apresentando dados

de consumo energético para o aquecimento, resfriamento, umidificação e desumidificação do edifício (IES, 2015b).

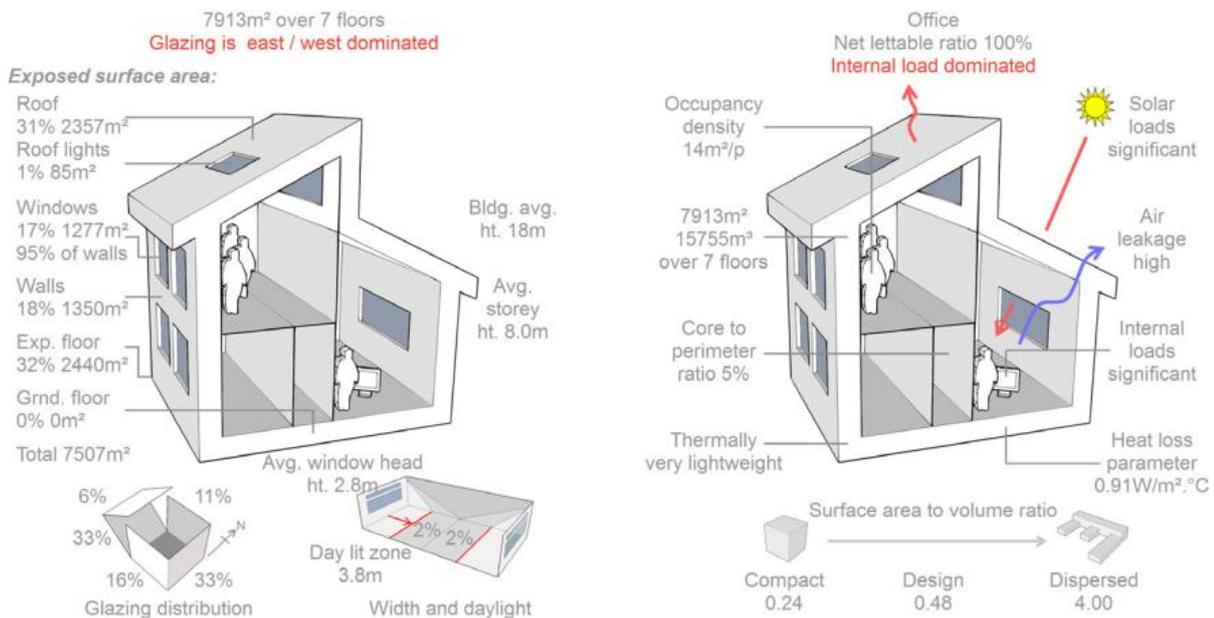
Figura 27 - Relatório apresentado na funcionalidade Climate Index



Fonte: IES (2010)

Na opção *Natural Resources*, é gerado um relatório indicando o potencial de uso de energia solar, energia eólica, e reaproveitamento de água da chuva no projeto, através da análise da volumetria da edificação e dos dados climáticos (IES, 2015). No *Building Metrics*, são apresentados dados das áreas envidraçadas da edificação, fluxo da ventilação natural, pontos críticos da fachada em relação a radiação solar, entre outros, conforme Figura 28.

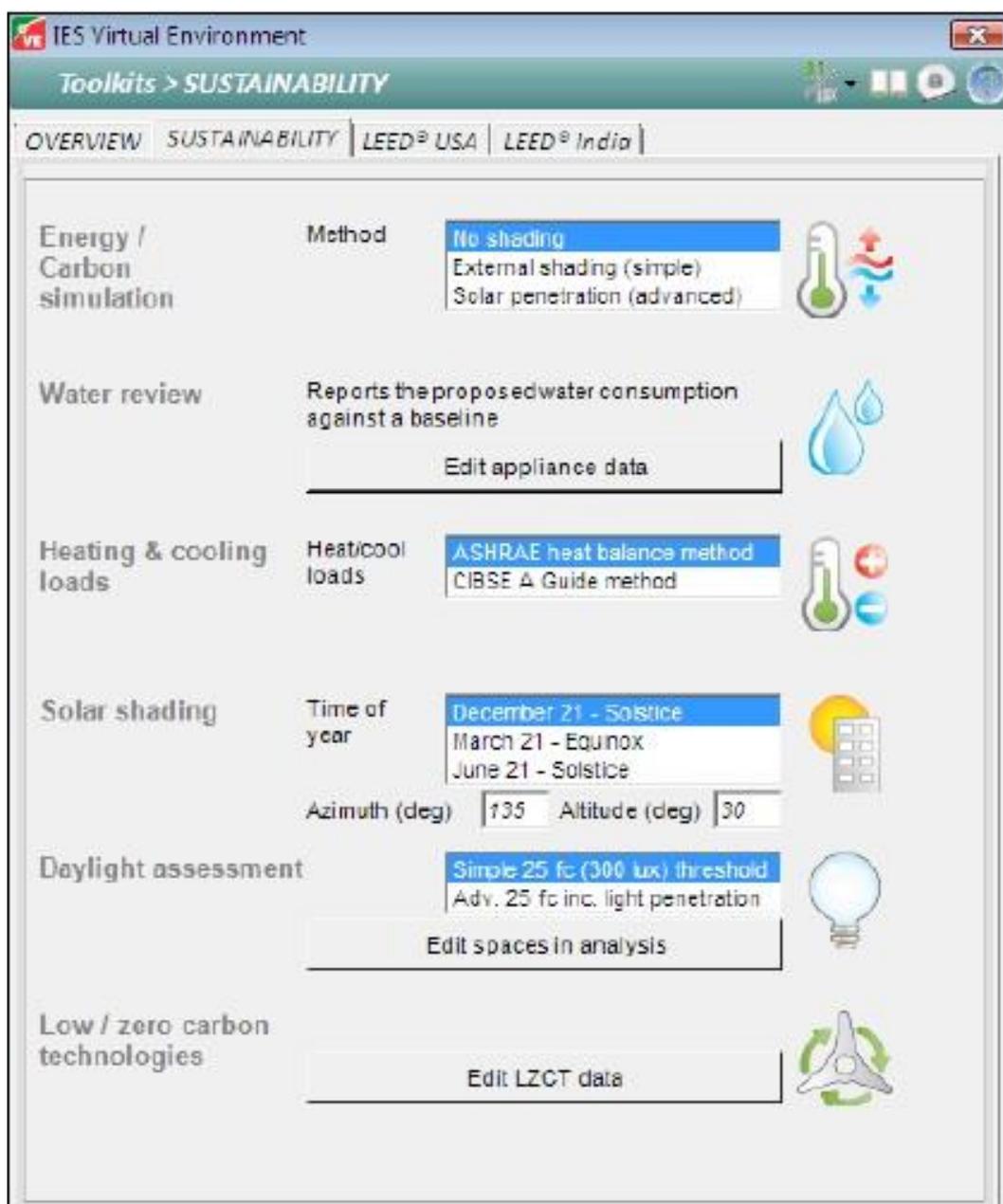
Figura 28 - Relatório apresentado na funcionalidade Building Metrics



Fonte: IES (2010)

Finalizando as funcionalidades da aba *Overview*, a opção *Material Review* apresenta um relatório com os materiais utilizados na edificação e o potencial de desperdício dos mesmos durante a construção da edificação. Ainda no <VE>*Toolkit* é possível acessar a aba *Sustainability*, conforme Figura 29, que possui opções de simulação do consumo energético e de carbono, consumo de água, análise das cargas de aquecimento e resfriamento, estudo do sombreamento na edificação, cálculo de iluminação natural e da utilização de tecnologias de zero e baixo consumo de carbono (IES, 2015b). Além dos parâmetros que podem ser analisados nas abas *Overview* e *Sustainability*, o <VE>*Toolkits* também permite a análise do atendimento de critérios de certificação *LEED USA* e *INDIA*.

Figura 29 - Aba Sustainability do <VE> Toolkits

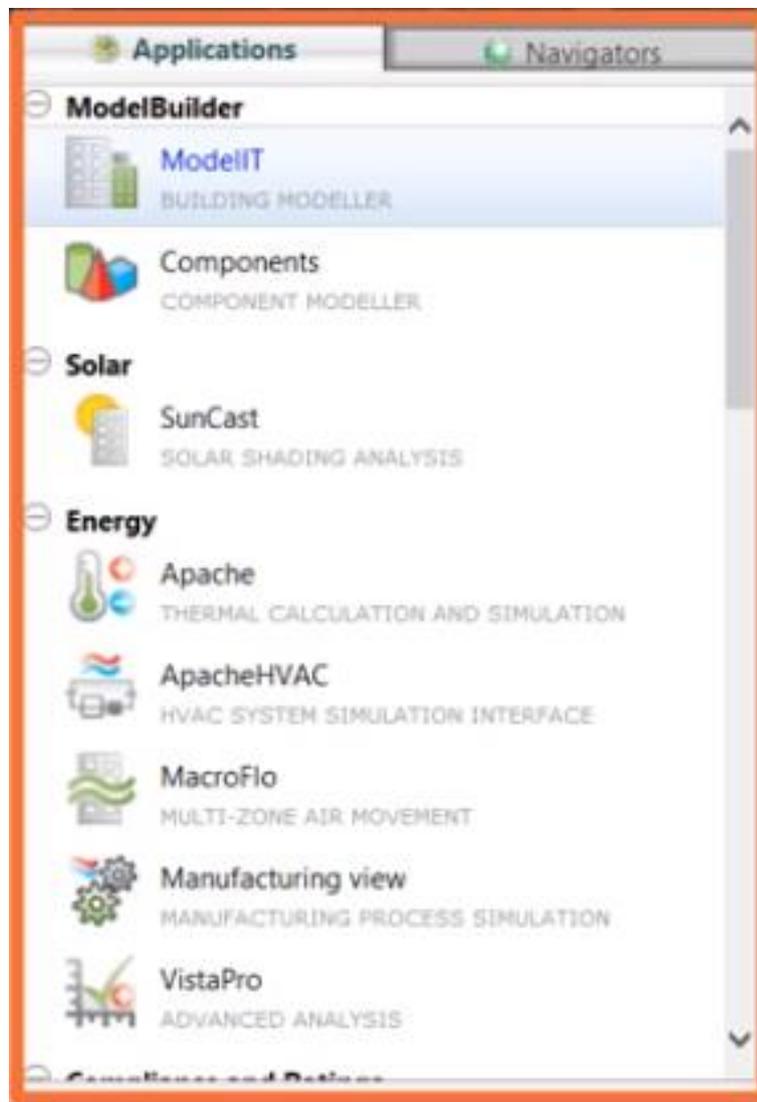


Fonte: IES (2015b)

A última opção de análise do plug-in, <Virtual Environment>, abre o modelo do Revit diretamente no programa IES-VE Pro, permitindo mais parâmetros e módulos de configuração da simulação de desempenho dentre da interface do programa, conforme Figura 30, como o módulo *SunCast* que permite a análise da trajetória solar sobre a edificação, o *Apache* onde são realizadas as simulações termo-energéticas, o *ApacheHVAC* para sistemas de ar-condicionado e aquecimento, *MacroFlo* para

simulações de ventilação, entre outros módulos avançados para simulações de desempenho.

Figura 30 - Módulos de análise disponíveis na interface do IES-VE 2018



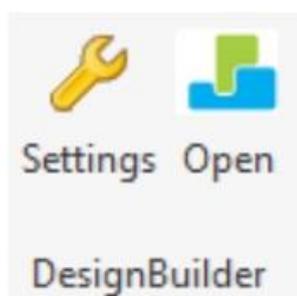
Fonte: IES (2019)

O IES-VE possui uma grande gama de recursos e uma boa interoperabilidade com o Revit, além da simulação dos principais parâmetros de desempenho termoenergético das edificações residenciais (GARWOOD, et. al, 2017). O *software* possui validação através da ASHRAE 140, com último relatório de validação emitido em 2014 (IES, 2019). Não possui licença livre para estudantes, sendo necessário o pagamento da taxa anual de £50,00 para uso do *software* nessa modalidade.

2.6.3 DesignBuilder

O DesignBuilder possui uma operabilidade similar ao GBS e IES-VE, através da instalação de um plug-in na interface do *software* de modelagem, demonstrado na Figura 31, que permite a pré-configuração dos parâmetros para desenvolvimento de simulações de desempenho utilizando os dados do modelo geométrico elaborado no Revit, para posterior análise no *software* de análise de desempenho. O plug-in está disponível para download no site oficial do DesignBuilder, atualmente compatível nas versões 2018 e 2019 do Revit.

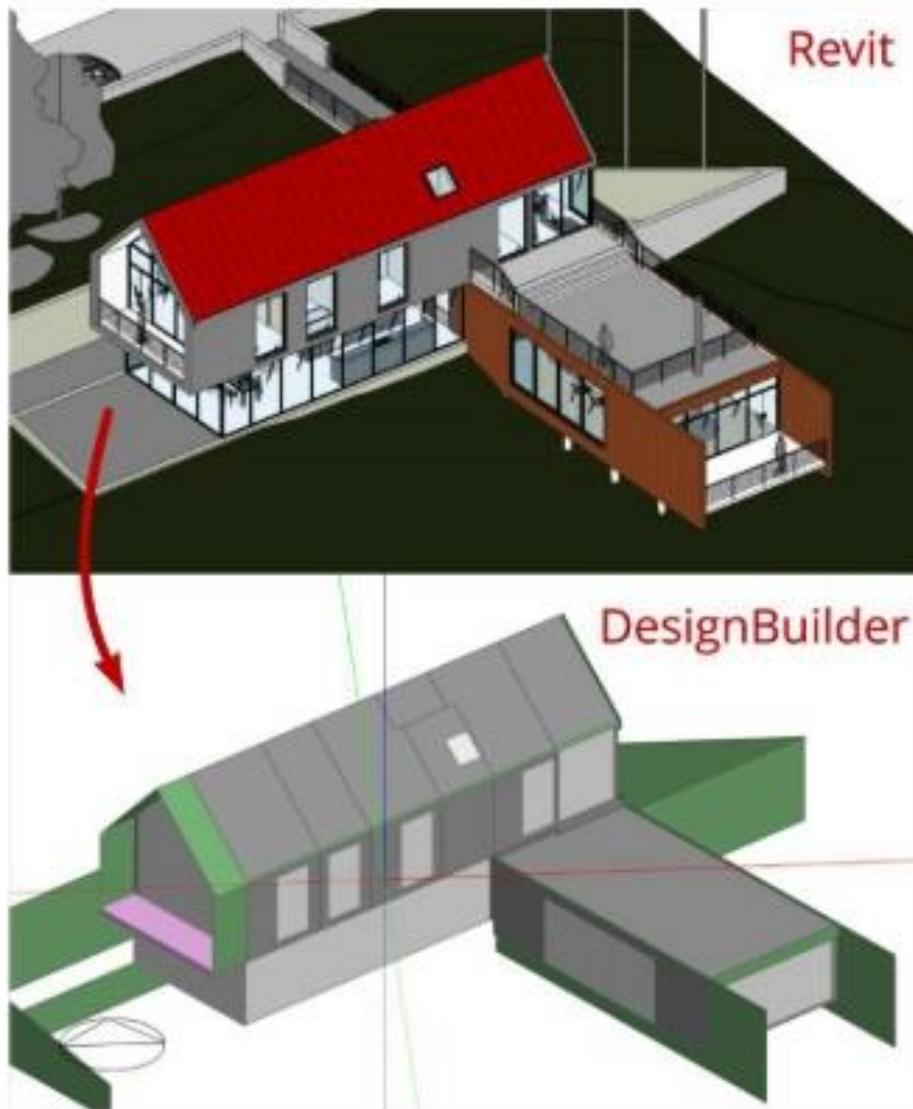
Figura 31 - Plug-in do DesignBuilder na aba de ferramentas do Revit



Fonte: DesignBuilder (2015)

O plug-in importa todos os dados geométricos e térmicos dos elementos construtivos da edificação diretamente para o DesignBuilder, conforme Figura 32, utilizando os dados configurados no modelo energético do Revit, como orientação da edificação, localização, tipo de utilização da edificação, zonas térmicas, cargas de aquecimento/resfriamento, entre outros.

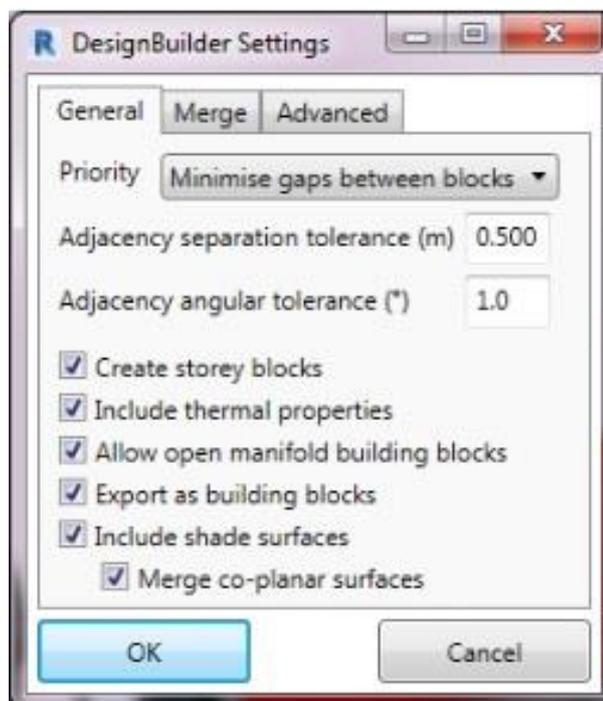
Figura 32 - Transferência do modelo geométrico do Revit para o DesignBuilder



Fonte: DesignBuilder (2015)

Conforme Figura 33, na opção *Settings* é possível configurar parâmetros gerais (general), de combinação (merge), e avançados (advanced) da exportação do modelo geométrico para a plataforma de análise de desempenho.

Figura 33 - Opções de configuração no plug-in DesignBuilder Revit



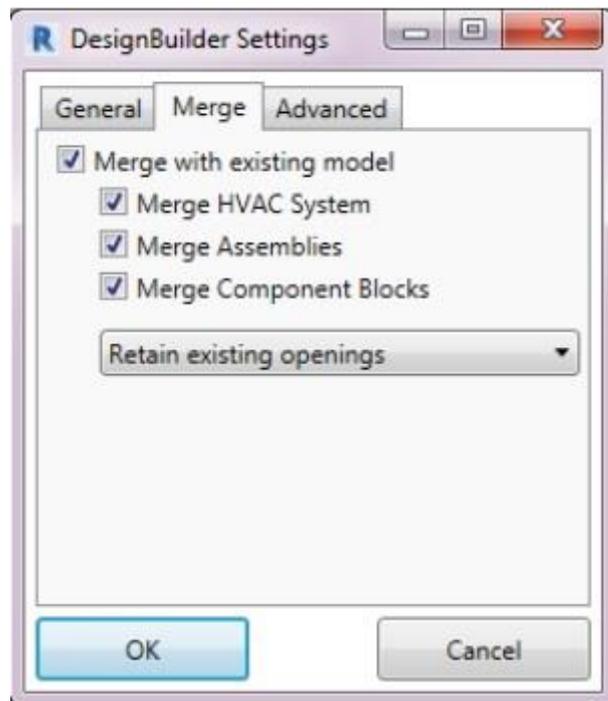
Fonte: DesignBuilder (2015)

Nas configurações gerais, é possível customizar os principais parâmetros de exportação, como a inclusão das propriedades térmicas dos materiais configurados diretamente no Revit, a utilização da orientação original da edificação para análise do sombreamento, entre outros critérios de tolerância de exportação da geometria da edificação.

Os parâmetros de combinação são utilizados para atualizar o modelo então exportado para a ferramenta de análise de desempenho, após possíveis alterações no *software* de modelagem geométrica, como inserção de novos componentes, novos parâmetros dos sistemas de aquecimento, resfriamento e ventilação da edificação, demonstrado na Figura 34.

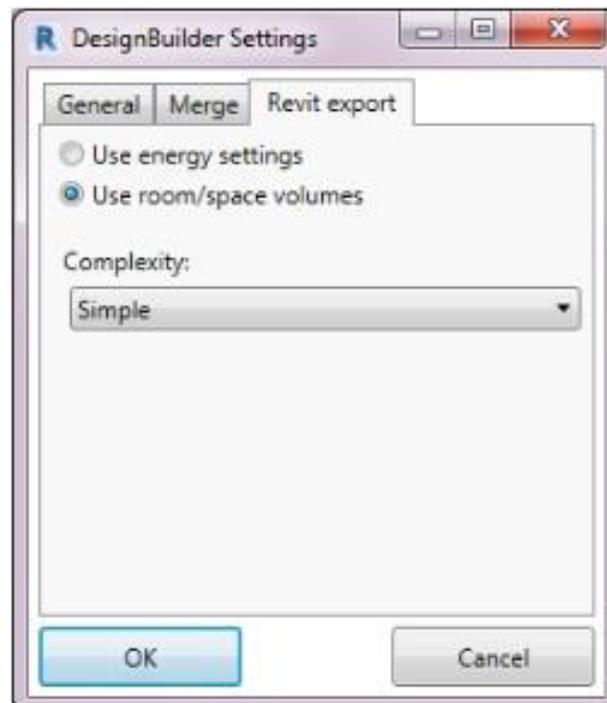
Nos parâmetros avançados é possível configurar se serão utilizadas as configurações do modelo energético do Revit, como uso dos espaços e zonas térmicas, e a complexidade de exportação do modelo geométrico de maneira similar ao IES-VE, dividido em *Simple*, *Simple with shading surfaces*, *Complex*, *Complex with shading surfaces* e *Complex with Mullions and shading surfaces*, conforme Figura 35.

Figura 34 - Configurações de combinação do Modelo Geométrico do Revit para o DesignBuilder



Fonte: DesignBuilder (2015)

Figura 35 - Configurações avançadas do Modelo Geométrico do Revit para o DesignBuilder

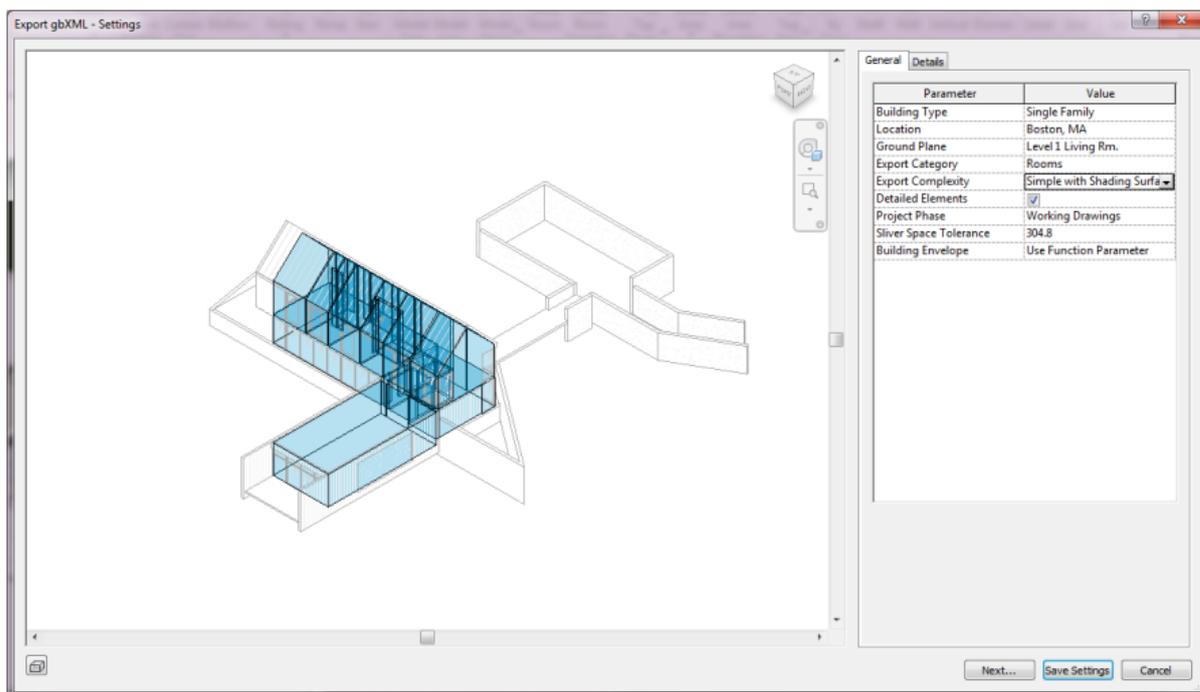


Fonte: DesignBuilder (2015)

Outra possibilidade de interoperabilidade do DesignBuilder com o Revit é através de importação de um arquivo gbxml configurado no programa BIM, conforme

Figura 36, permitindo a pré-configuração de parâmetros que serão utilizados na análise de desempenho a ser realizada na interface do programa de simulação.

Figura 36 - Configuração de arquivo gbxml no Revit para importação no DesignBuilder



Fonte: DesignBuilder (2015)

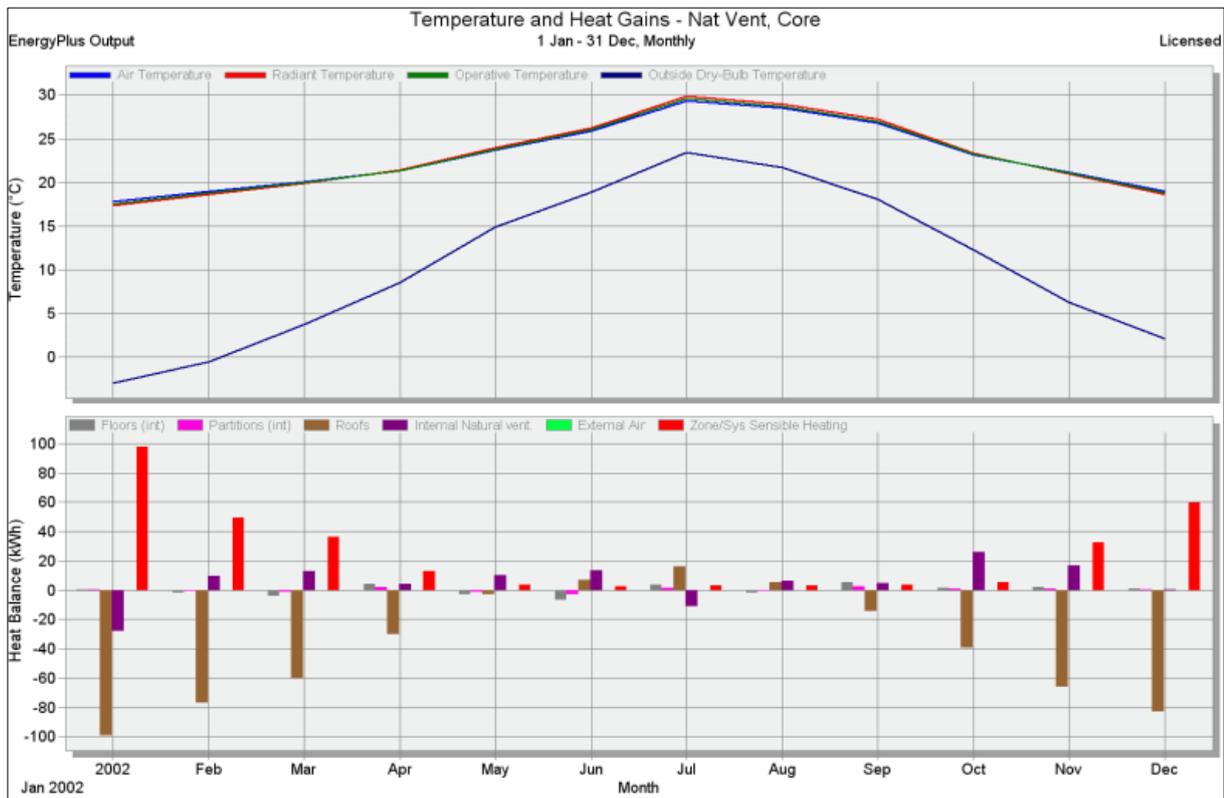
Dessa forma, o plug-in do DesignBuilder opera de maneira diferente ao GBS e IES-VE, pois não permite a apresentação dos resultados da simulação de desempenho dentro da interface do programa BIM, sendo necessária instalação do programa de análise de desempenho para realização das simulações e apresentação dos resultados.

Dentro da interface do programa, é possível realizar simulações das cargas de aquecimento e resfriamento, ventilação natural, iluminação natural, sistemas de ar-condicionado (HVAC) e simulações CFD (DESIGNBUILDER, 2019). O programa utiliza o mesmo motor de simulação do Energyplus, DOE-2, para realização das análises de desempenho (REINHART; IBARRA, 2009).

Os resultados das simulações são apresentados através de tabelas, gráficos, desenhos e relatórios de desempenho (REINHART; IBARRA, 2012a), como o gráfico de temperatura do ar, e dos ganhos de calor através dos elementos da edificação (cobertura, pisos, ventilação interna, entre outros), apresentado na Figura 37, o gráfico

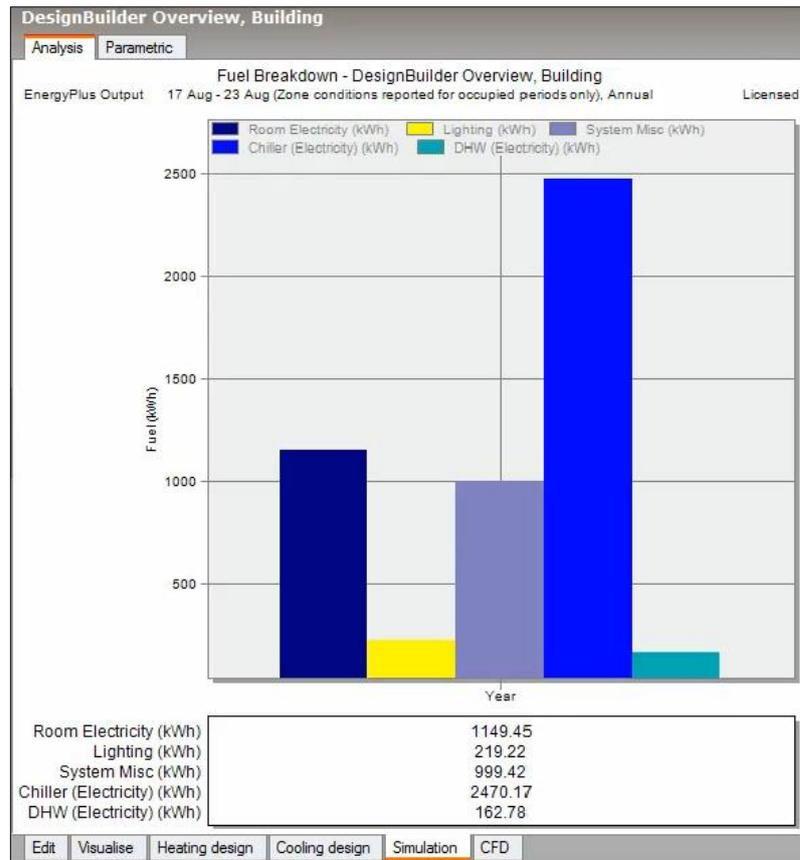
de consumo energético, na Figura 38, e do plano de manchas para análise da iluminação natural incidente na edificação, na Figura 39.

Figura 37 - Gráfico de Temperatura do Ar e Ganhos de Calor apresentado no DesignBuilder



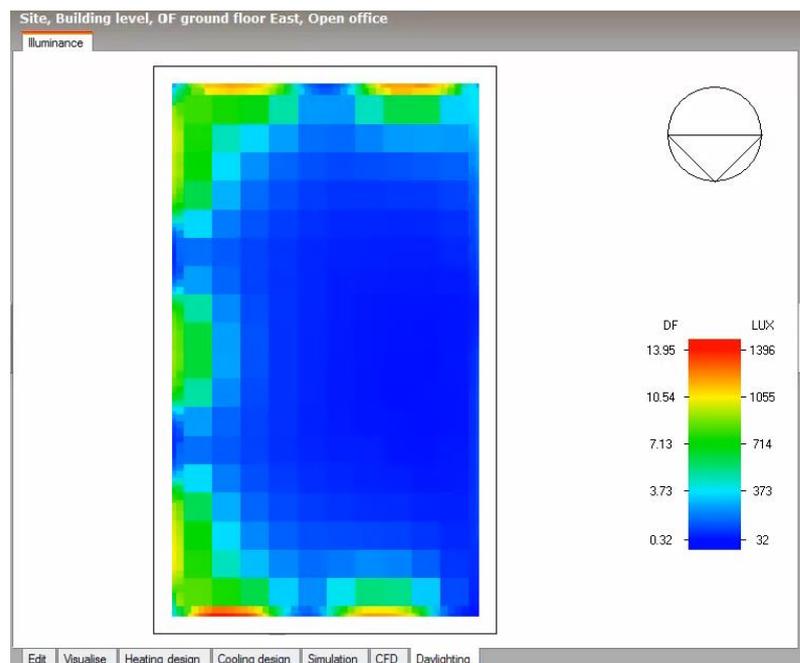
Fonte: HARVARD (2012b)

Figura 38 - Gráfico de consumo energético apresentado no DesignBuilder



Fonte: DESIGNBUILDER (2019)

Figura 39 - Plano de Manchas da incidência da iluminação natural na edificação no DesignBuilder



Fonte: DESIGNBUILDER (2019)

Apesar de não apresentar os relatórios de desempenho na interface do Revit, o DesignBuilder possui uma interface amigável de utilização, e permite facilmente o acesso a relatórios de consumo energético e das cargas de aquecimento e resfriamento da edificação (MAHMUD, K. et al., 2017). O programa possui validação através da ASHRAE 140, com relatório de simulação realizado em outubro de 2014 (DESIGNBUILDER, 2014), e da mesma forma que o IES-VE, para acesso à licença estudantil do DesignBuilder é necessário o pagamento de uma taxa anual de £50,00.

2.6.4 *Análise comparativa entre os programas de simulação de desempenho*

Após análise dos três principais programas integrados ao Revit para análise de desempenho (CHANG, et. al, 2017), foi possível verificar que apesar da possibilidade de interoperabilidade com a ferramenta de modelagem BIM, os plug-ins IES-VE e DesignBuilder necessitam do programa original instalado para prosseguimento das simulações de desempenho, sendo apenas um facilitador para inserção dos dados de entrada da simulação computacional, diferente do GBS que transmite as informações do Revit em tempo real através do sistema de nuvem, apresentado os relatórios da simulação na mesma interface de modelagem da edificação, ou na interface online do GBS.

Os três programas permitem a importação da geometria do modelo da edificação desenvolvido no Revit para desenvolvimento das simulações de desempenho, através do plug-in instalado na interface do programa BIM ou importação de arquivo gbxml, sendo observado que cada programa possui uma particularidade na leitura do arquivo geométrico, sendo necessário ajustes no modelo antes da perfeita leitura dos dados pelo programa de simulação de desempenho.

A orientação solar da edificação, propriedades térmicas dos materiais, e tipo de uso do edifício (residencial, comercial, entre outros), configurados inicialmente no Revit, são preservados na importação da geometria para os programas de simulação, além de configurações iniciais *default* de cargas internas de aquecimento e resfriamento, decorrentes do tipo de iluminação, ocupação, e equipamentos simulados na edificação.

A principal vantagem observada na utilização dos programas IES-VE e DesignBuilder em conjunto com o Revit, foi a possibilidade de inserir novos

parâmetros de desempenho após a importação do modelo da edificação para o programa de simulação, como a configuração da estação climática que fornecerá os principais dados climáticos do entorno da edificação, através do carregamento de arquivos climáticos do tipo *epw* e *try*, não disponíveis nas configurações iniciais do modelo realizado no Revit.

O Green Building Studio foi o programa que atendeu mais critérios no comparativo realizado por esse estudo, que apesar de apresentar limitações na configuração da estação climática, e na quantidade de parâmetros para simulação que são fornecidos, o programa apresenta melhor interoperabilidade com o Revit e um relatório de análise de desempenho que permite uma avaliação preliminar do comportamento térmico da edificação, e do seu entorno. A possibilidade de utilização da licença estudantil gratuita também foi um fator determinante para escolha do *software*, permitindo que o usuário explore todas as funcionalidades da ferramenta antes mesmo da sua aquisição formal.

2.7 Interoperabilidade entre modelos BIM e programas de análise de desempenho

Apesar de proporcionar simulações de desempenho durante a elaboração de modelos em programas BIM, a interoperabilidade entre o *software* de modelagem e os de análise de desempenho ainda permeia discussões e dúvidas sobre a maneira correta como as informações devem ser inseridas no modelo virtual para que ocorra a correta leitura do modelo durante a simulação computacional, não sendo necessária a repetição de informações já inseridas previamente.

Além da modelagem da informação da construção, existe o *Building Energy Modelling* (BEM) que consiste em um modelo digital configurado exclusivamente para análises de desempenho termo-energética, com o principal objetivo de análise do desempenho térmico do envelope construtivo da edificação, sendo bastante utilizado para análise de desempenho de habitações e edificações comerciais (GARWOOD et al., 2017)

Entre as metodologias que resgatam informações de um modelo BIM e o transformam em um modelo para análise de desempenho, prática conhecida como *Building Performance Simulation (BPS)*, o *Object-Oriented Physical Modeling (OOPM)* é uma alternativa que identifica as informações físicas e geométricas dos elementos construtivos do modelo virtual, como paredes, janelas, pisos, entre outros, para que sejam importadas para o *software* de análise de desempenho, que irá realizar a simulação computacional (JEONG; KIM, 2016).

Outra metodologia apresentada é o ThermalOPT, que dispõe de diversos plugins utilizados em conjunto com o *software* de modelagem, para verificar a qualidade das informações que serão encaminhadas aos programas de análise de desempenho (WELLE; HAYMAKER; ROGERS, 2011).

A utilização do Revit® para aproveitamento das informações geométricas e características construtivas dos elementos da edificação por programas de simulação de desempenho térmico, no caso do EnergyPlus, ainda é bastante incipiente, sendo verificado que a interoperabilidade entre os programas possui imperfeições, como distorções na geometria do modelo e falta de dados necessários para a simulação (QUEIROZ et al., 2019).

Grande parte destas metodologias visa à interoperabilidade dos dados geométricos de um modelo virtual com as características físicas dos materiais e sistemas construtivos utilizados para posterior análise em programas de análise de desempenho. Esse processo bidirecional deve se repetir até o momento que a edificação atender aos critérios de desempenho, sempre ocorrendo a troca de informações do modelo com os programas de modelagem e simulação computacional.

Apesar das vantagens da utilização do BIM para análises de desempenho, a fragmentação do setor da construção civil e a falta de normativos que orientem os procedimentos de análise nas fases de concepção do projeto dificultam a definição dos parâmetros que devem ser alcançados nas simulações iniciais de desempenho, devendo ser estabelecidas padronizações de análise para facilitar e implementar a utilização da ferramenta pelos projetistas (GERRISH et al., 2017). A Tabela 2 apresenta os pontos principais dos trabalhos citados nesse capítulo.

A seguir, são apresentados os materiais e métodos utilizados para desenvolvimento da pesquisa, e que nortearam o desenvolvimento das simulações e

análise das potencialidades e limitações das ferramentas BIM na análise de desempenho térmico.

Tabela 2 - Pontos principais dos trabalhos citados sobre análise de desempenho térmico com uso de ferramentas BIM. (continua)

REFERÊNCIA	FERRAMENTA BIM UTILIZADA	PARÂMETROS DE DESEMPENHO ANALISADOS	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES
Abanda; Byers (2016)	<ul style="list-style-type: none"> - Autodesk® Revit - Autodesk® Green Building Studio - Autodesk® Ecotect 	<ul style="list-style-type: none"> - Trajetória Solar - Consumo energético - Sombreamento da Edificação 	<ul style="list-style-type: none"> - Potencialidade da ferramenta BIM nas análises de desempenho no início do projeto - A economia de 5% do custo energético da edificação com a mudança da sua orientação - Investigar o impacto da orientação da edificação no seu consumo energético durante as fases preliminares do projeto
Beazley; Heffernan; McCarthy, (2017)	<ul style="list-style-type: none"> - Autodesk® Revit 	<ul style="list-style-type: none"> - Troca de temperatura entre zonas térmicas e o ambiente externo - Análise dos dados termo-físicos dos materiais 	<ul style="list-style-type: none"> - A utilização de normas e IDMs auxilia o projetista no desenvolvimento das simulações de desempenho térmico durante a fases iniciais do projeto - A incorporação de parâmetros para o desenvolvimento de simulações termoenergéticas pode gerar grandes benefícios no processo de projeto e na coordenação de falhas

Tabela 2 - Pontos principais dos trabalhos citados sobre análise de desempenho térmico com uso de ferramentas BIM. (continuação)

REFERÊNCIA	FERRAMENTA BIM UTILIZADA	PARÂMETROS DE DESEMPENHO ANALISADOS	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES
GSA (2009)	<ul style="list-style-type: none"> - Manual técnico, Information Delivery Manual (IDM), que aborda os principais parâmetros a serem levantados pelas ferramentas BIM para a análise de desempenho termoenergético nas fases preliminares do projeto 	<p>O manual orienta a análise dos seguintes parâmetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Atendimento de critérios de normas de desempenho termoenergético; - O consumo energético da edificação; - Cargas de aquecimento e resfriamento durante os picos de temperatura. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mapear o processo de simulação de desempenho termoenergético, a ser executado na fase conceitual do projeto e nas fases mais detalhadas, de forma a organizar as informações que devem ser inseridas no modelo BIM e os parâmetros de desempenho que devem ser analisados em cada etapa.
Chang et al. (2017)	<ul style="list-style-type: none"> - Autodesk® Green Building Studio - IES® VE - Bentley Hevacomp - AECOSim - EnergyPlus - HEED - DesignBuilder Simulation - eQUEST - DOE2 - FloVENT - ODEON e TRNSYS 	<ul style="list-style-type: none"> - Análise Energética; - Emissões de Carbono; - Ventilação Natural; - Iluminação Natural; - Desempenho Acústico; - Consumo de Água. 	<ul style="list-style-type: none"> - Levantamento das principais ferramentas BIM para análise de desempenho termoenergético, apresentados os parâmetros de desempenho que cada uma permite analisar; - A Taxonomia Triangular de Edificações Sustentáveis com o uso do BIM permite o melhor entendimento de como as 03 dimensões do processo de desenvolvimento da edificação se inter-relacionam, e quais as principais potencialidades da análise durante as fases iniciais de projeto.

Tabela 2 - Pontos principais dos trabalhos citados sobre análise de desempenho térmico com uso de ferramentas BIM. (conclusão)

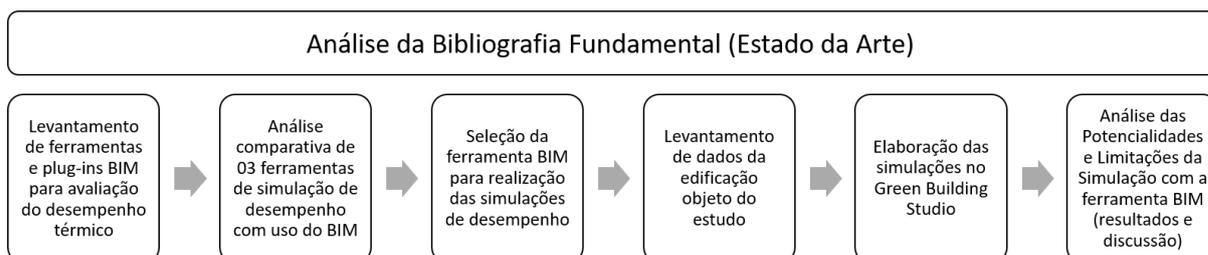
REFERÊNCIA	FERRAMENTA BIM UTILIZADA	PARÂMETROS DE DESEMPENHO ANALISADOS	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES
Mahmud et al. (2018)	- MC4Suite	<ul style="list-style-type: none"> - Trajetória solar da edificação; - Dimensionamento de sistema fotovoltaico; - O consumo energético da edificação; - Cargas de aquecimento e resfriamento durante os picos de temperatura. 	- A utilização de ferramentas BIM para as análises preliminares de desempenho dos projetos de edificações.
Gerrish et al. (2017)	<ul style="list-style-type: none"> - IES® VE - Autodesk® Dynamo - Autodesk® Revit 	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura interna e externa; - Umidade do ar; - Ventilação e Iluminação Natural; - Emissão de Carbono; - Consumo Energético. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sem uma normatização ou estruturação, o tempo utilizado para organizar os dados para serem utilizados na simulação de desempenho termoenergético é muito longo e caro para viabilizar a sua aplicação; - A falta de normativos e manuais técnicos se constitui como uma dificuldade de proceder as simulações de desempenho termoenergético nas fases preliminares do projeto.

Fonte: O autor (2019)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento da pesquisa foi dividido em 05 etapas, além da análise da bibliografia fundamental para compreensão do estado da arte do tema que se estendeu durante toda a elaboração do trabalho, conforme demonstrado na Figura 40.

Figura 40 - Etapas metodológicas do desenvolvimento do trabalho



Fonte: O Autor (2019).

A Figura 41 apresenta os passos metodológicos para atendimento dos objetivos específicos da pesquisa, de forma a exemplificar as fontes de coleta e o produto resultante de cada etapa.

Figura 41 - Passos metodológicos para atendimento dos objetivos específicos

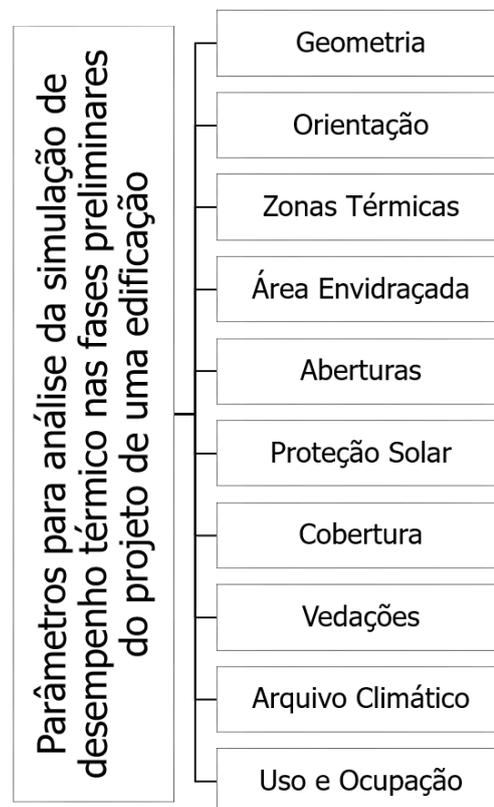
Objetivos Específicos	Fontes de Coleta	Produto
1) Levantamento de ferramentas/plug-ins BIM para avaliação do desempenho térmico de edificações habitacionais	Revisão Bibliográfica em artigos de revistas científicas, e anais de congressos	Levantamento e caracterização das 3 principais ferramentas/plug-ins BIM
2) Análise geral das 3 ferramentas/plug-ins BIM selecionadas (documentação e métodos de análise de desempenho térmico)	Revisão Bibliográfica em artigos de revistas científicas, foruns de usuários, anais de congressos, e páginas de suporte ao usuário dos softwares.	Escolha da ferramenta/plugin BIM que será utilizada para uma análise da simulação de desempenho térmico nas fases iniciais do projeto
3) Realização da simulação de uma edificação habitacional com o uso da ferramenta BIM selecionada	Dados construtivos e do entorno de uma edificação habitacional a ser implantada na cidade de São Luis-MA	Análise dos principais parâmetros verificados durante a simulação de desempenho com o uso da ferramenta BIM
4) Verificar as potencialidades e limitações da análise de desempenho térmico com o uso da ferramenta BIM, e sua aplicabilidade junto aos parâmetros de desempenho térmico nas fases iniciais do projeto	Análise da simulação de desempenho térmico com a ferramenta BIM	Relatório descritivo com identificação das potencialidades e dificuldades da simulação computacional com software BIM

Fonte: O Autor (2019).

3.1 Seleção da ferramenta BIM para análise de desempenho térmico

Para seleção da ferramenta BIM que foi utilizada neste estudo, foi realizado um estudo comparativo com as 03 principais ferramentas que utilizam esta metodologia para análise de desempenho térmico de edificações, conforme trabalho de Chang et al. (2017), observando a forma como as ferramentas desempenham as principais funcionalidades para a análise de projetos de edificações durante suas fases preliminares, conforme descrito por Rodrigues e Pedrini (2017) e exemplificado na Figura 42.

Figura 42 - Parâmetros para análise preliminar de desempenho térmico de edificações



Fonte: Adaptado de Rodrigues; Pedrini (2017).

Para análise da geometria da edificação, foi verificado como as ferramentas permitem a modelagem dos elementos e sistemas construtivos, quais as principais informações geométricas que são inseridas e como essas informações são utilizadas para a análise de desempenho, sendo observada a forma que é realizada a modelagem das aberturas, áreas envidraçadas, protetores solares, coberturas,

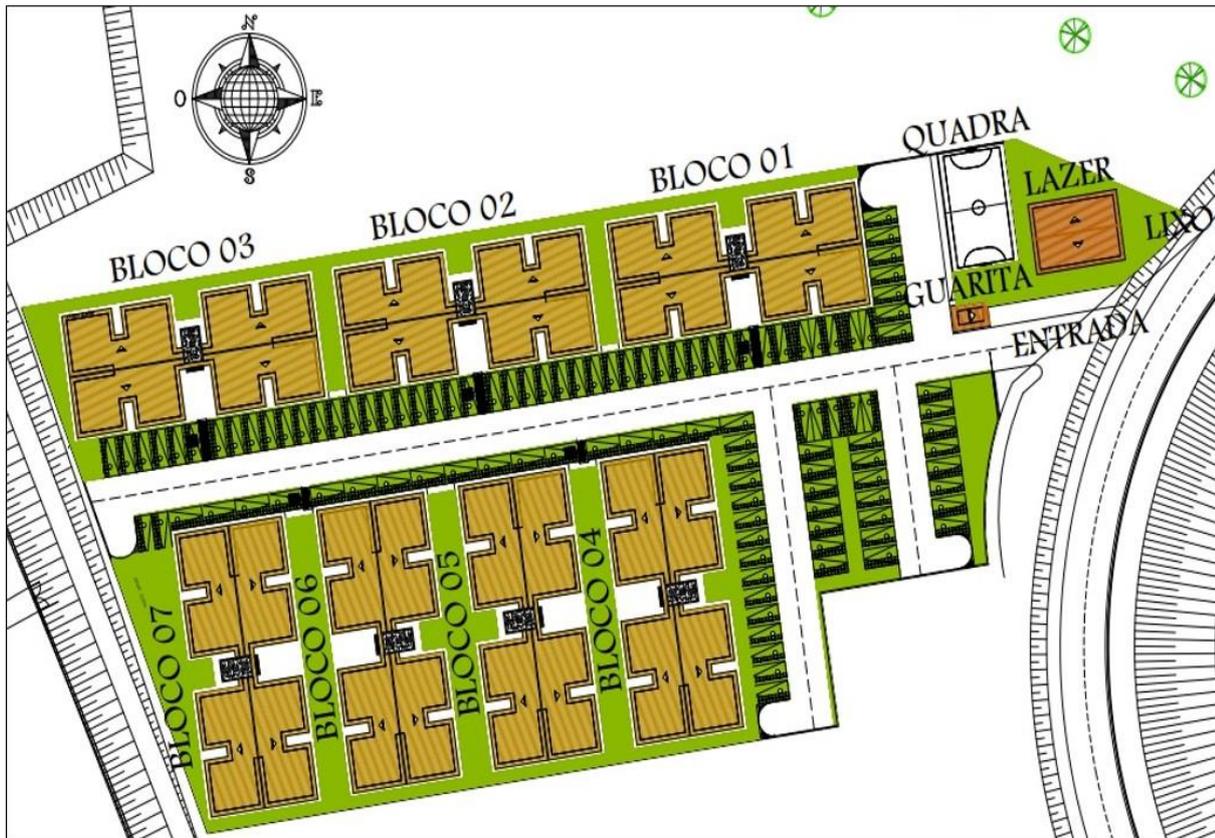
vedações e demais elementos construtivos, e de que forma são inseridos os dados térmicos dos materiais ou componentes construtivos.

A configuração da orientação é verificada através da possibilidade de inserir as coordenadas geográficas, latitude e longitude, a definição do norte de projeto onde também devem ser verificados como são inseridos os dados da estação climática e/ou arquivo climático que servirão de base para a análise de desempenho. Para finalizar a análise das ferramentas, estudou-se como é realizada a inserção de dados do tipo de uso e ocupação da edificação (residencial, comercial, entre outros), e a forma que são definidas as zonas térmicas para realização das simulações de desempenho.

3.2 Edificação objeto do estudo

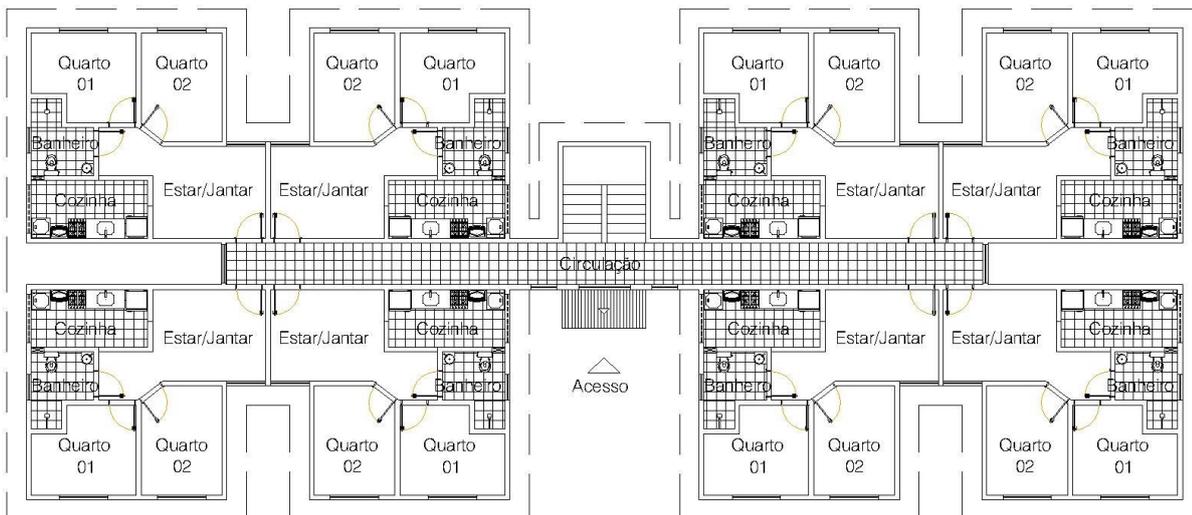
A edificação objeto deste estudo consiste de um Condomínio Residencial, apresentado na Figura 43, implantado na cidade de São Luis, Maranhão, e composto por 07 Blocos Residenciais, com 04 pavimentos cada e 32 unidades habitacionais em cada bloco, totalizando 224 unidades. As unidades habitacionais possuem tipologia única, com 02 quartos, sala de estar/jantar, banheiro e cozinha/área de serviço, totalizando 45,30m² de área construída, conforme Figura 44.

Figura 43 - Implantação do empreendimento residencial objeto de estudo.



Fonte: Construtora A (2016).

Figura 44 - Planta Baixa do Pavimento Tipo com 08 unidades habitacionais



Fonte: Construtora A (2016).

A escolha da edificação levou em conta a participação do autor deste trabalho no processo projetual e construtivo de toda a edificação, permitindo acesso a informações como projetos, acompanhamento da execução da obra, fotos da

execução e contato direto com os responsáveis técnicos pela elaboração do empreendimento, além de ser uma edificação de interesse social, voltada para habitação de baixa renda, onde a aplicação de soluções projetuais que visam o condicionamento passivo da edificação são essenciais para o conforto térmico do usuário final.

Apesar de ser uma edificação que já se encontra construída, a simulação do comportamento térmico servirá para verificação do desempenho final da edificação e levantamento dos principais pontos de melhoria que poderiam ser alcançados caso fosse procedida a análise de desempenho nas fases iniciais de projeto.

3.2.1 Características do Sistema Construtivo

A Edificação foi construída com alvenaria de bloco estrutural cerâmico, conforme apresentando na Figura 45, composta pelas seguintes camadas de revestimento:

- Chapisco, reboco e textura acrílica lisa, cor marfim com detalhes na cor camurça, nas faces externas (conforme Figura 46 e Figura 47);
- Chapisco, reboco e pintura PVA Látex nas faces internas das áreas secas (nas unidades do térreo);
- Chapisco, argamassa de gesso e pintura PVA Látex nas faces internas das áreas secas (nas unidades do 1º ao último pavimento);
- Chapisco, emboço e revestimento cerâmico na face interna das áreas molhadas (cozinha e banheiro).

As vedações verticais possuem espessura aproximada de 20 cm, e as vedações horizontais das áreas secas são compostas de laje maciça de concreto armado, com espessura de 10 cm, e forro com placas de gesso nas áreas molhadas, inseridas a 20 cm abaixo da laje e com uma espessura aproximada de 3 cm.

Figura 45 - Vedação da edificação em alvenaria estrutural de bloco cerâmico



Fonte: Construtora A (2016).

Figura 46 - Revestimento argamassado (Chapisco e Reboco) da fachada



Fonte: Construtora A (2016).

Figura 47 - Pintura acrílica na fachada nas cores Marfim e Camurça.



Fonte: Construtora A (2016).

A cobertura, conforme apresentado na Figura 48 e Figura 49, é composta por telhas cerâmicas do tipo colonial, estruturadas em peças de madeira apoiadas sobre a laje de cobertura do último pavimento.

Figura 48 - Laje maciça de concreto armado



Fonte: Construtora A (2016).

Figura 49 - Cobertura em telhas cerâmicas coloniais



Fonte: Construtora A (2016).

Os pisos são em placas cerâmicas, nas dimensões de 30x30cm, na cor Branco. As esquadrias são de alumínio natural, conforme Figura 50 , com vidro liso de 3 mm nas áreas secas, e com vidro canelado de 4 mm nas áreas molhadas. As portas internas das unidades habitacionais são de madeira semi-oca, pintadas com verniz fosco, e a porta externa de acesso ao bloco é constituída de alumínio natural e vidro liso 3 mm.

Figura 50 - Envelope construtivo com portas e janelas de alumínio e vidro liso incolor

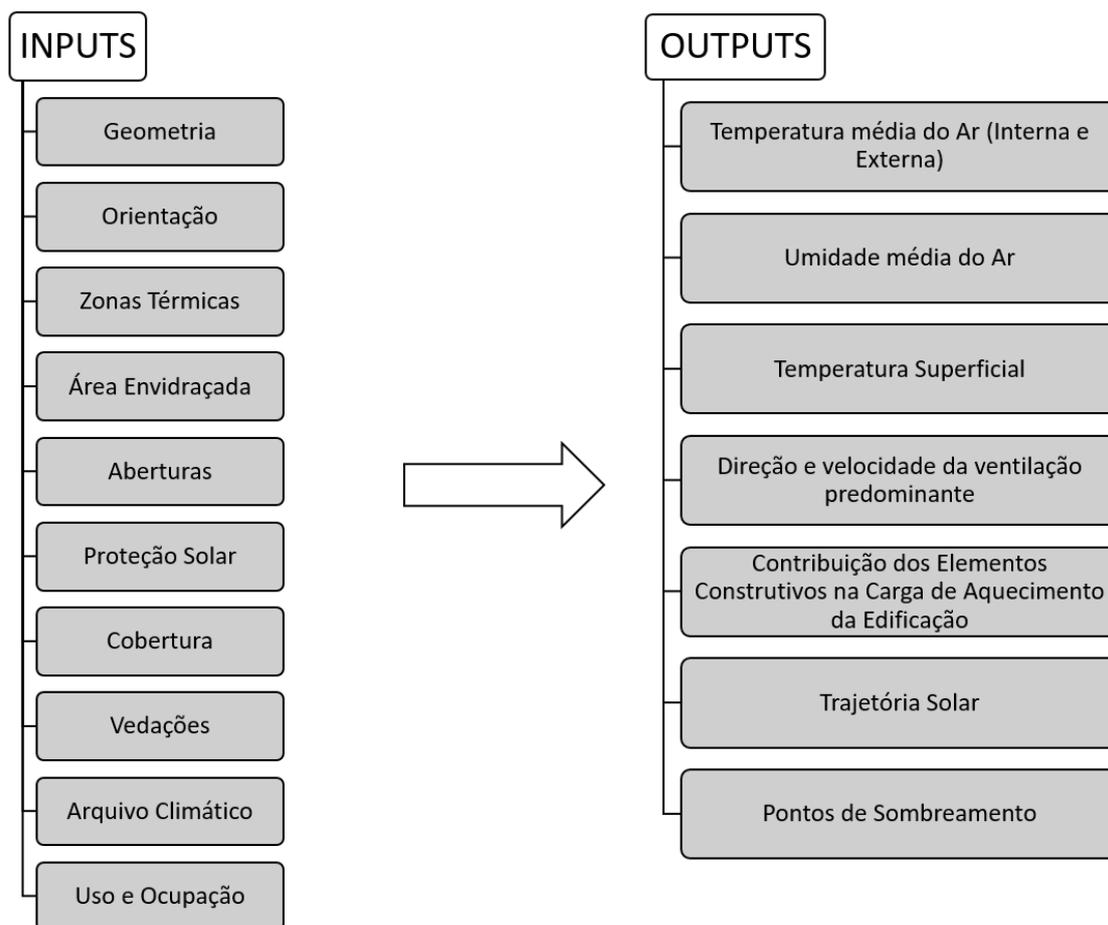


Fonte: Construtora A (2016).

3.3 Simulação de Desempenho Térmico

A simulação de desempenho térmico da edificação foi realizada no *software* Autodesk GreenBuilding Studio, e no desenvolvimento das simulações, foi analisada a forma como são inseridos os dados de entrada (*inputs*) para análises preliminares de desempenho, conforme descrito por Rodrigues e Pedrini (2017) e os dados de saída (*outputs*) em comum, conforme exemplificado na Figura 51.

Figura 51 - Fluxograma para realização das simulações de desempenho térmico.



Fonte: O Autor (2019).

Apesar de a simulação nas fases iniciais do projeto dispor apenas de informações preliminares para a realização da análise de desempenho, é nessa etapa que as decisões arquitetônicas são mais importantes para o desempenho térmico final da edificação, sendo possível verificar ainda que preliminarmente, a exposição à radiação solar e ao fluxo dos ventos, parâmetros de grande importância para o desempenho de edificação em clima tropical (RODRIGUES; PEDRINI, 2017).

Para escolha das zonas térmicas da edificação em que foram realizadas as simulações de desempenho térmico, foram obedecidos parte dos procedimentos de simulação computacional da NBR 15575 (ABNT, 2013) que poderiam ser aplicáveis com a ferramenta BIM, conforme destacado abaixo:

- A avaliação deve ser feita para um dia típico de projeto, de verão ou inverno;
- Para edificações multipiso, selecionar uma unidade do último andar, com cobertura exposta;
- Simular todos os recintos da unidade habitacional, considerando as trocas térmicas entre os seus ambientes e avaliar os resultados dos recintos, dormitórios e salas;
- Na entrada de dados, considerar que os recintos adjacentes, de outras unidades habitacionais, separados por paredes de geminação ou entrepisos, apresentem a mesma condição térmica do ambiente que está sendo simulado;
- A edificação deve ser orientada conforme a implantação;
- Considerar que as paredes expostas e as janelas estão desobstruídas, sem a presença de edificações ou vegetações nas proximidades que modifiquem a incidência de sol e vento;
- Dispositivos de sombreamento, se existirem, devem ser considerados na simulação;
- A absorvância à radiação solar das superfícies expostas deve ser definida conforme a cor e as características das superfícies externas da cobertura e das paredes expostas;
- A unidade habitacional escolhida para simulação deve ser a mais crítica do ponto de vista térmico;

Dessa forma, levando em conta que a cidade de São Luis está inserida na Zona Bioclimática 8 (ABNT, 2013), não necessitando de simulações de inverno, a orientação mais crítica para o verão é a unidade habitacional com a janela do dormitório ou da sala voltada para oeste e a outra parede exposta voltada para norte (ABNT, 2013). Atendendo aos procedimentos da norma, foi escolhido o bloco 07 da implantação do condomínio, conforme Figura 52, e a unidade habitacional 308, conforme Figura 53.

Figura 52 - Escolha da unidade 308 do bloco 07, de acordo com a orientação mais crítica do ponto de vista térmico para o verão (ABNT, 2013)



Fonte: O Autor (2019).

Figura 53 - Escolha da unidade habitacional 308, do bloco 07, conforme procedimento de simulação da NBR 15575 (ABNT, 2013)



Fonte: O Autor (2019).

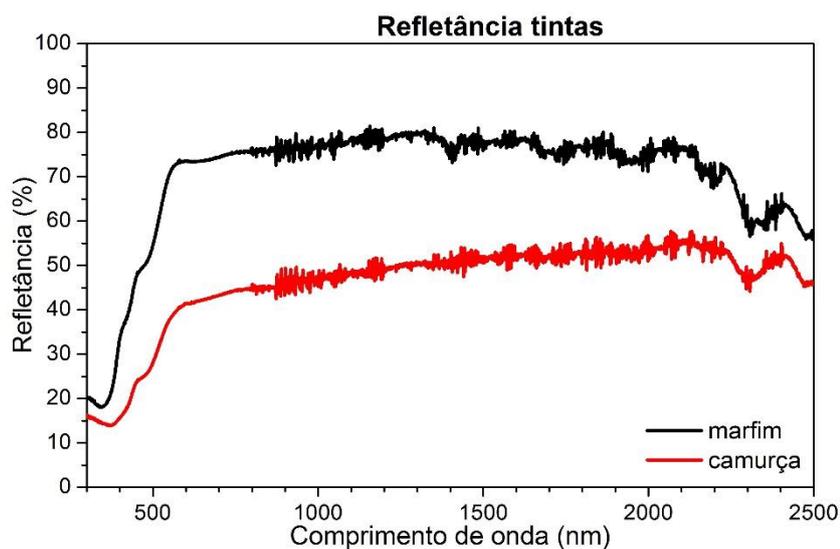
Para definição das absorptâncias das tintas utilizadas no envelope construtivo da edificação, foram utilizados os valores medidos por Almeida e Dornelles (2017), utilizando amostras das tintas aplicadas nas paredes externas, conforme Figura 54, chegando aos valores aproximados de 0,69 de refletância e 0,31 de absorptância para a cor marfim, e 0,41 de refletância e 0,59 de absorptância para a cor camurça, conforme demonstrado na Figura 55.

Figura 54 - Amostra das tintas utilizadas no envelope construtivo da edificação objeto do estudo



Fonte: Almeida e Dornelles (2017).

Figura 55 - Refletância espectral das tintas medidas em laboratório



Fonte: Almeida e Dornelles (2017).

Partindo do levantamento desses parâmetros, a proposta desta pesquisa foi realizar a simulação computacional de desempenho térmico em um único *software*

BIM, neste caso o Autodesk® Revit® 2017, de forma a minimizar a repetição de informações durante a intercomunicação do modelo digital entre outros programas, verificando as principais vantagens e dificuldades utilizando esta abordagem metodológica, tendo como premissa que a utilização de uma solução que integra ferramentas de cálculo com as informações geométricas de modelo numa mesma interface facilita o procedimento de simulação do desempenho das edificações (NEGENDAHL, 2015).

4 RESULTADOS

Nessa etapa do trabalho, serão apresentados os principais resultados e reflexões da pesquisa acerca das Ferramentas BIM e a análise de desempenho térmico de edificações, onde será demonstrada uma simulação de desempenho térmico obedecendo parâmetros das fases iniciais do projeto com o GBS e apresentação das principais potencialidades e limitações da ferramenta BIM para a simulação de desempenho térmico de edificações habitacionais nas fases iniciais do projeto.

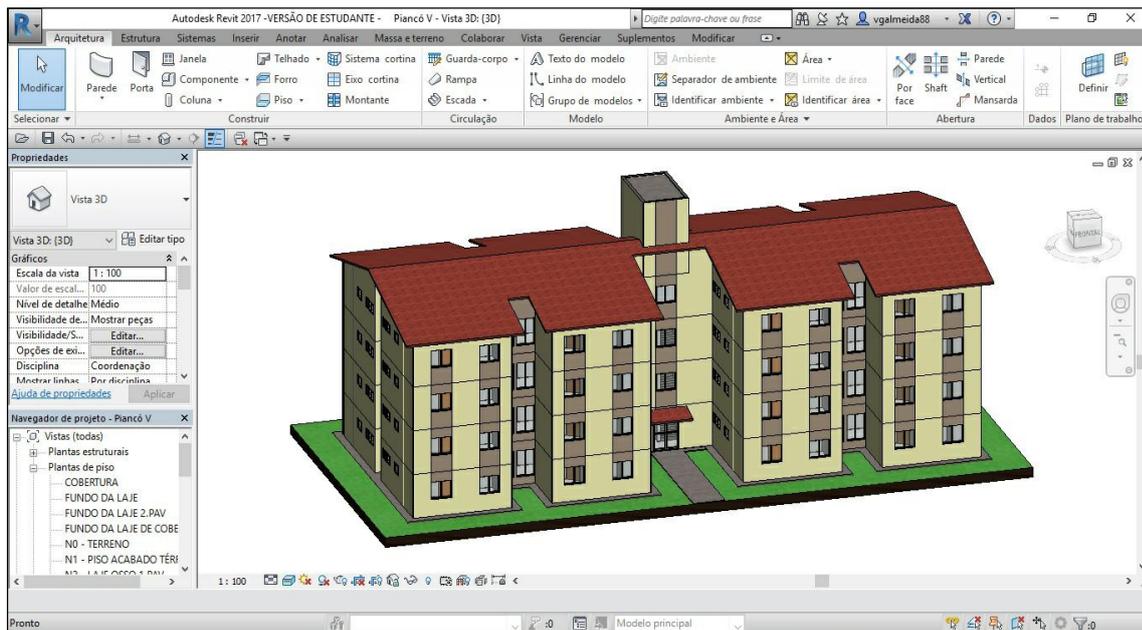
4.1 Simulação de desempenho térmico com uso do Green Building Studio

Nessa etapa do trabalho serão apresentados os procedimentos para realização de uma simulação de desempenho térmico com o uso do GBS, partindo da modelagem da edificação no Autodesk Revit 2017, a configuração do modelo de construção, elaboração do modelo de energia, e emissão dos dados de saída da simulação.

4.1.1 Modelagem da edificação no Autodesk® Revit 2017

O primeiro passo para realização da simulação de desempenho térmico, é a modelagem da edificação objeto desse estudo, desenvolvida no Autodesk® Revit 2017. Nesta etapa foram modeladas as paredes, pisos, janelas, portas, elementos estruturais e de cobertura, conforme apresentado na Figura 56, e que serão utilizados posteriormente para inserção dos dados térmicos dos materiais, e realização das simulações computacionais

Figura 56 - Modelo digital da edificação elaborado no Revit



Fonte: O Autor (2019)

A modelagem das paredes externas, um dos principais elementos do envelope construtivo da edificação e de grande impacto no desempenho térmico, consistiu na configuração das paredes conforme os dados e medidas obtidos, como espessura e materiais do substrato das alvenarias, apresentado na Tabela 3, todas as paredes da edificação são compostas em seu núcleo por blocos estruturais cerâmicos.

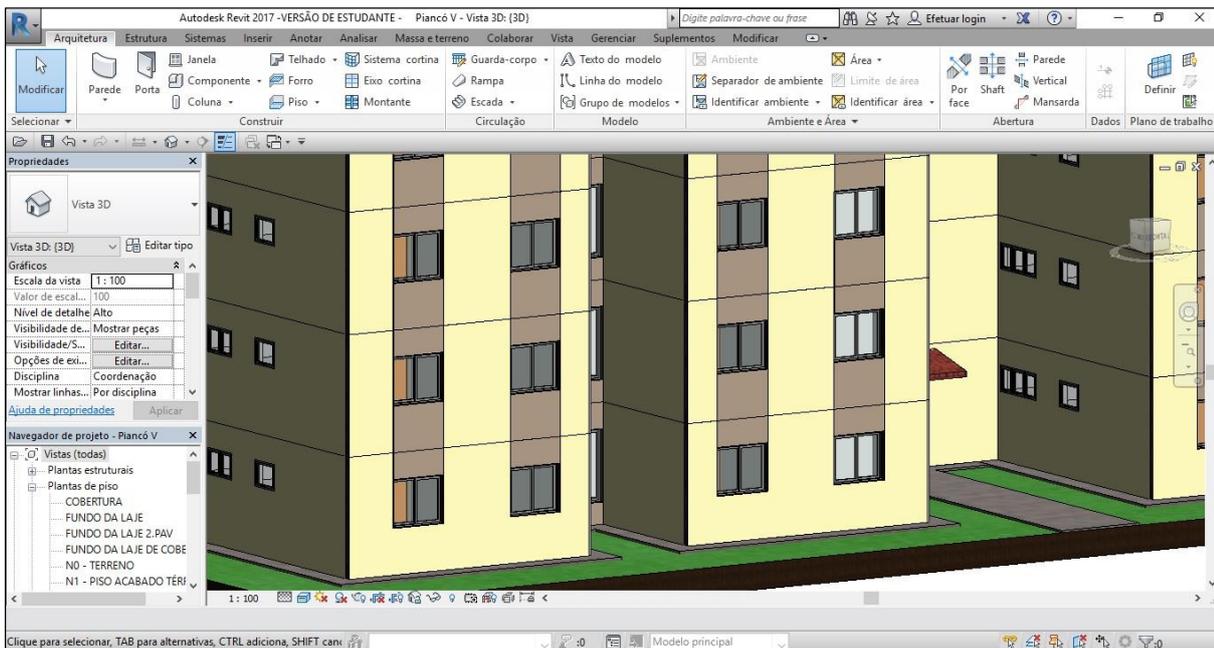
Tabela 3 - Configuração das paredes externas da edificação

Nomenclatura da alvenaria	Substrato	Espessura das camadas (m)	Espessura Final (m)
Alvenaria de bloco cerâmico – Reboco Ext. Camurça ou Marfim/Reboco Int.	Textura Acrílica – Cor: Camurça ou Marfim	0,00	0,185
	Chapisco/Reboco Externo	0,03	
	Bloco Estrutural Cerâmico	0,14	
	Chapisco/Reboco Interno	0,015	
	Pintura PVA Látex – Cor: Branco Neve	0,00	
Alvenaria de bloco cerâmico – Reboco Ext. Camurça ou Marfim/Reboco Int. e Cerâmica	Textura Acrílica – Cor: Camurça ou Marfim	0,00	0,195
	Chapisco/Reboco Externo	0,03	
	Bloco Estrutural Cerâmico	0,14	
	Chapisco/Reboco Interno	0,015	
	Revestimento Cerâmico 30x30 cm (até h=1,50m)	0,010	
Pintura PVA Látex – Cor: Branco Neve (acima da h=1,50m)	0,00		
Alvenaria de bloco cerâmico – Reboco Ext. Camurça ou Marfim/Reboco de Gesso e Pintura PVA Látex	Textura Acrílica – Cor: Camurça ou Marfim	0,00	0,185
	Chapisco/Reboco Externo	0,03	
	Bloco Estrutural Cerâmico	0,14	
	Chapisco/Reboco Interno	0,015	
	Reboco de gesso – Paredes internas	0,0150	
Pintura PVA Látex – Cor: Branco Neve (acima da h=1,50m)	0,00		

Fonte: O Autor (2019)

Ao final foram modeladas 6 paredes externas, alterando apenas os revestimentos internos, e a cor da pintura nas fachadas, sendo aplicado na maior parte do envelope construtivo a cor Marfim com alguns detalhes na fachada na cor Camurça, conforme demonstrado na Figura 57. As paredes com chapisco e reboco interno em argamassa de concreto e pintura PVA látex branco neve são referentes aos quartos e salas do pavimento térreo, as com revestimento cerâmico são referentes aos banheiros e cozinhas de todos os pavimentos, e as paredes com reboco interno de gesso são referentes aos quartos e salas do 1º ao 3º pavimento.

Figura 57 - Paredes externas na cor marfim e camurça



Fonte: O Autor (2019)

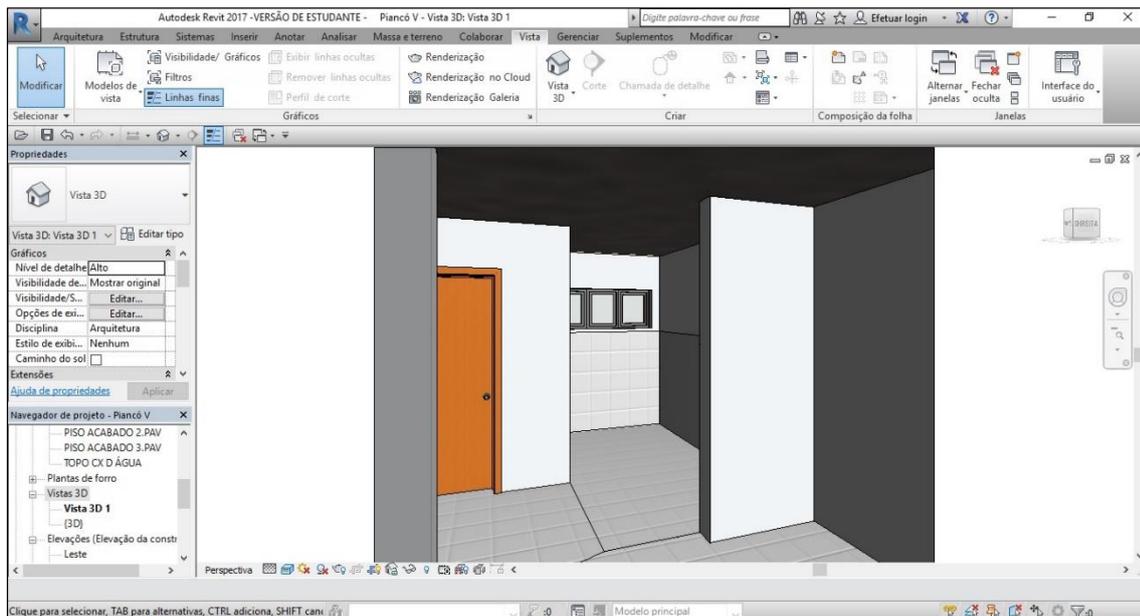
As paredes internas, destacadas nas Figura 58 e Figura 59, também foram modeladas conforme levantamento dos projetos e da edificação em campo, totalizando 04 elementos com espessura final inferior as alvenarias externas, conforme apresentado na Tabela 4, destacando as paredes das áreas molhadas, como banheiros e cozinhas, apresentando chapisco e reboco interno, pintura PVA latéx, e revestimento cerâmico até a altura de 1,50m, dos ambientes de áreas secas, como quartos, salas e circulação, apresentando paredes com chapisco, reboco e pintura PVA latéx em ambas as faces quando se tratarem do pavimento térreo, e com reboco de gesso e pintura PVA látex quando se tratarem dos 1º ao 3º pavimento.

Tabela 4 - Configuração das paredes internas da edificação

Nomenclatura da alvenaria	Substrato	Espessura das camadas (m)	Espessura Final (m)
Alvenaria de bloco cerâmico – Reboco Int. Pintura PVA/Reboco Int. Pintura PVA	Pintura PVA Látex– Cor: Branco Neve	0,00	
	Chapisco/Reboco Interno	0,015	
	Bloco Estrutural Cerâmico	0,14	0,17
	Chapisco/Reboco Interno	0,015	
	Pintura PVA Látex – Cor: Branco Neve	0,00	
Alvenaria de bloco cerâmico – Reboco Int. Pintura PVA/Reboco Int. e Cerâmica	Pintura PVA Látex – Cor: Branco Neve	0,00	
	Chapisco/Reboco Interno	0,015	
	Bloco Estrutural Cerâmico	0,14	
	Chapisco/Reboco Interno	0,015	0,18
	Revestimento Cerâmico 30x30 cm (até h=1,50m)	0,010	
	Pintura PVA Látex – Cor: Branco Neve (acima da h=1,50m)	0,00	
Alvenaria de bloco cerâmico – Reboco Int. e Cerâmica/Reboco Int. e Cerâmica	Pintura PVA Látex – Cor: Branco Neve (acima da h=1,50m)	0,00	
	Revestimento Cerâmico 30x30 cm (até h=1,50m)	0,010	
	Chapisco/Reboco Interno	0,015	
	Bloco Estrutural Cerâmico	0,14	0,19
	Chapisco/Reboco Interno	0,015	
	Revestimento Cerâmico 30x30 cm (até h=1,50m)	0,010	
	Pintura PVA Látex – Cor: Branco Neve (acima da h=1,50m)	0,00	
Alvenaria de bloco cerâmico – Reboco de Gesso e Pintura PVA/ Reboco de Gesso e Pintura PVA	Pintura PVA Látex – Cor: Branco Neve (acima da h=1,50m)	0,00	
	Reboco de Gesso	0,015	
	Bloco Estrutural Cerâmico	0,14	0,17
	Chapisco/Reboco Interno	0,015	
	Pintura PVA Látex – Cor: Branco Neve (acima da h=1,50m)	0,00	

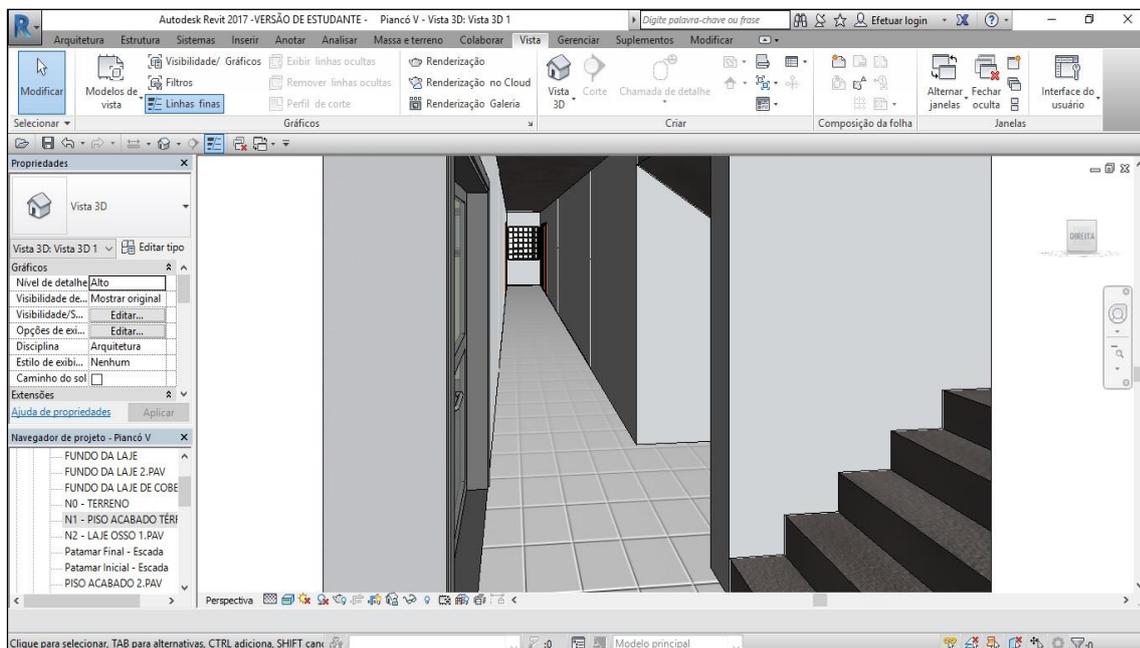
Fonte: O Autor (2019)

Figura 58 - Modelagem das paredes internas da Sala e Cozinha



Fonte: O Autor (2019)

Figura 59 - Modelagem das paredes internas da circulação comum



Fonte: O Autor (2019)

A modelagem das esquadrias, conforme apresentado na Figura 60, Figura 61, Figura 62 e Figura 63, compostas por janelas, portas, e o painel de elemento vazado, foi desenvolvida com medidas e materiais conforme projeto arquitetônico, demonstrado na Tabela 5, e elaboradas com ND (Nível de Desenvolvimento) 200 (ABDI, 2017a), de forma a retratar da melhor forma possível a geometria dos

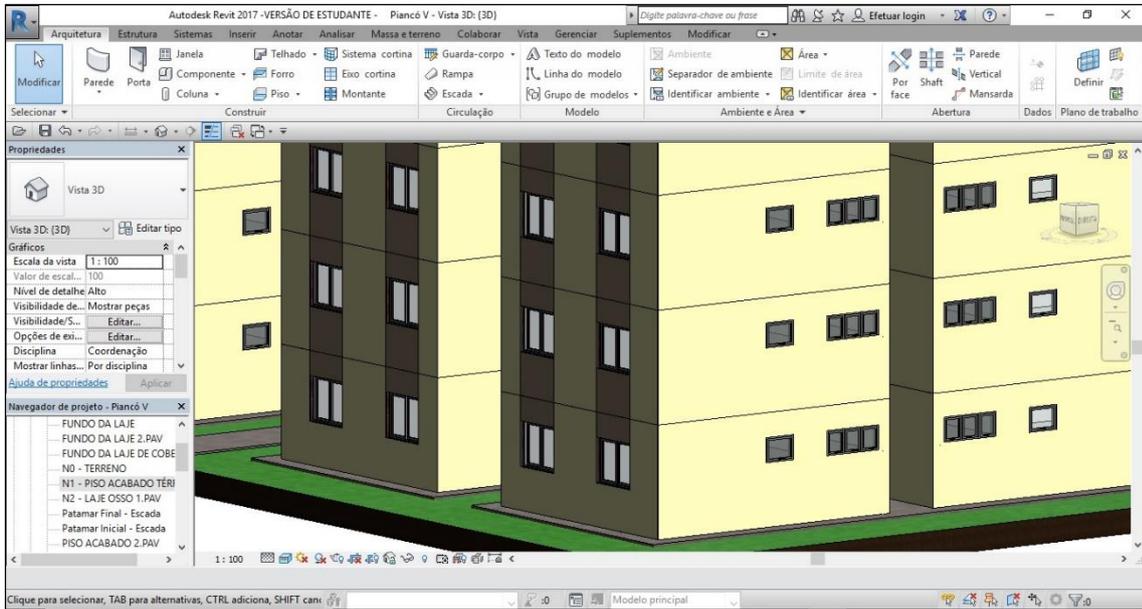
elementos, porém sem apresentar detalhes como dobradiças, fechos, e demais partes que não contribuem significativamente no desempenho térmico da esquadria.

Tabela 5 - Configuração das esquadrias da edificação

Nomenclatura da esquadria (largura x altura)	Composição da esquadria	Material	Ambientes
Janela de Alumínio e vidro – abertura maxim-ar – 80x60cm	Perfis e Contramarcos Fechamento Translúcido	Alumínio natural Vidro Liso Comum, esp. 3mm	Banheiro
Janela de Alumínio e vidro – abertura maxim-ar – 150x60cm	Perfis e Contramarcos Fechamento Translúcido	Alumínio natural Vidro Liso Comum, esp. 3mm	Cozinha
Janela de Alumínio e vidro – abertura deslizante – 115x165cm	Perfis e Contramarcos Fechamento Transparente	Alumínio natural Vidro Liso Comum, esp. 3mm	Estar/Jantar
Janela de Alumínio e vidro – abertura deslizante – 130x110cm	Perfis e Contramarcos Fechamento Transparente	Alumínio natural Vidro Liso Comum, esp. 3mm	Quartos
Elemento Vazado de Concreto – 120x120cm	Blocos vazados	Concreto pré-moldado	Circulação
Porta Interna de madeira lisa – 80x210 cm	Painel, molduras e acabamentos	Madeira lisa semi-oca	Quartos, banheiro, estar/jantar
Portão de Alumínio e Vidro – 160x210 cm	Perfis e Contramarcos Fechamento Transparente	Alumínio natural Vidro Liso Comum, esp. 3mm	Entrada do bloco

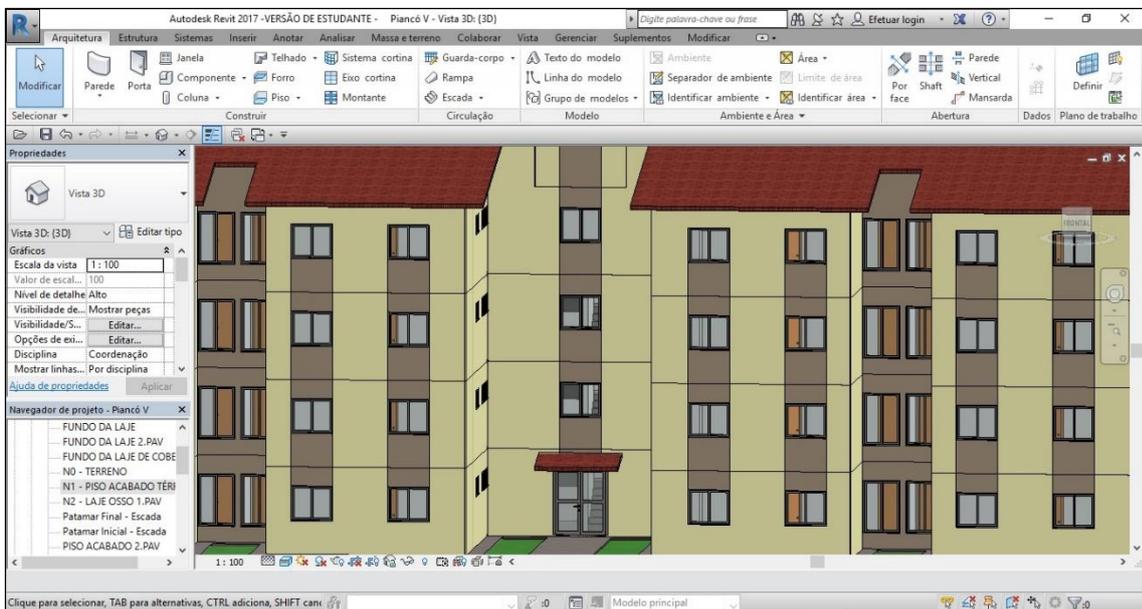
Fonte: O Autor (2019)

Figura 60 – Modelagem das esquadrias dos quartos, banheiros e cozinhas



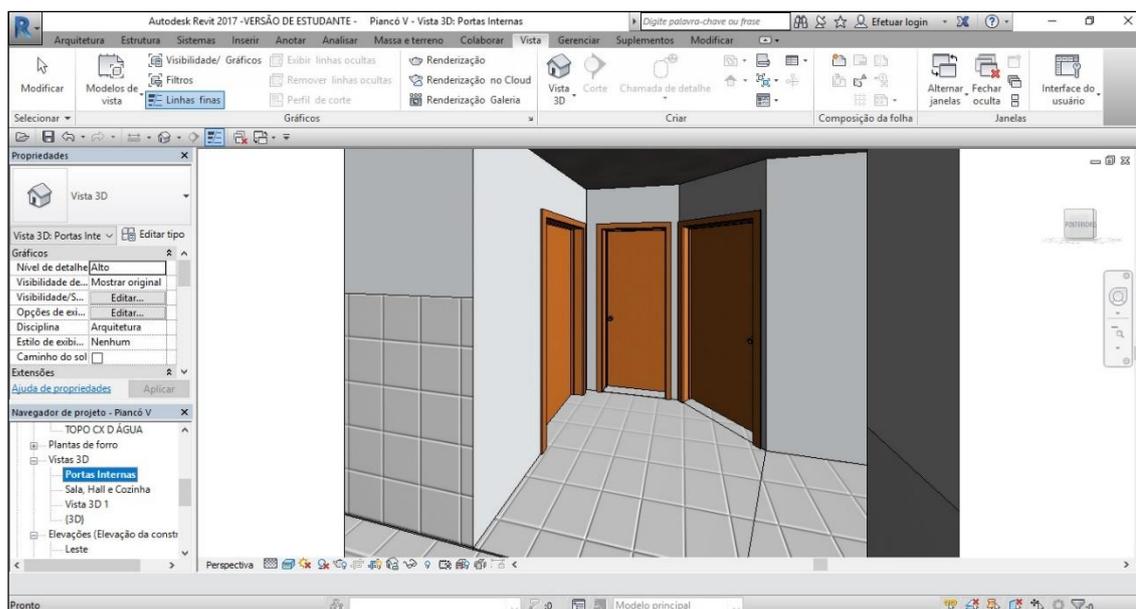
Fonte: O Autor (2019)

Figura 61 - Modelagem da porta de entrada e janela da circulação comum



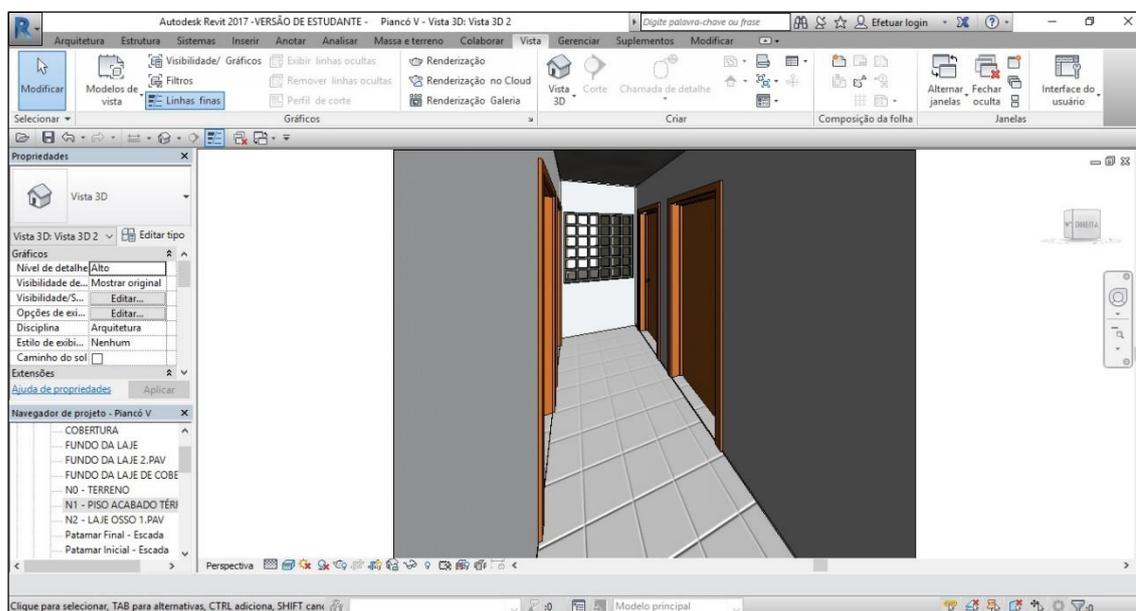
Fonte: O Autor (2019)

Figura 62 - Modelagem das portas internas das unidades habitacionais



Fonte: O Autor (2019)

Figura 63 - Modelagem das portas de entrada das unidades habitacionais, e do painel de elementos vazados



Fonte: O Autor (2019)

Para configuração dos pisos, conforme apresentado na Tabela 6, desenvolveu-se a modelagem do piso cerâmico esmaltado 30x30 cm, cor branco, com espessura aproximada de 0,015m, sobre contrapiso de argamassa de concreto, com espessura

conforme o tipo de utilização do ambiente (área seca ou molhada). Nesta etapa também foram modeladas a laje radier, que constitui na fundação da edificação, as lajes dos pavimentos, e o terreno natural onde foi implantado o bloco habitacional.

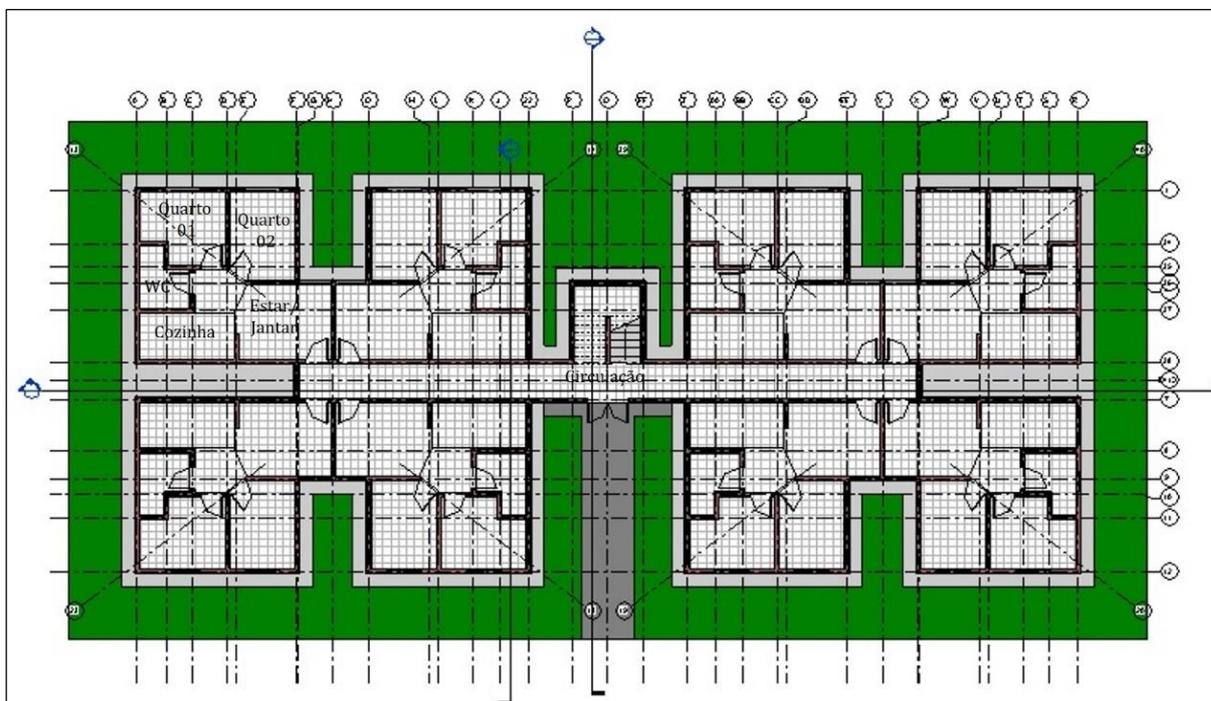
Tabela 6 - Configuração dos pisos da edificação

Nomenclatura do piso	Substrato	Espessura das camadas (m)	Espessura Final (m)
Piso Cerâmico 30x30cm, Áreas Secas	Revestimento Cerâmico 30x30cm	0,015	0,05
	Contrapiso em argamassa de concreto com impermeabilizante	0,025	
Piso Cerâmico 30x30cm, Áreas Molhadas	Revestimento Cerâmico 30x30cm	0,015	0,03
	Contrapiso em argamassa de concreto	0,015	
Piso Cerâmico 30x30cm, Circulação comum	Revestimento Cerâmico 30x30cm	0,015	0,035
	Contrapiso em argamassa de concreto	0,02	
Radier de Concreto Armado	Concreto, Moldado in loco	0,15	0,15
Laje de Concreto Maciço	Concreto, Moldado in loco	0,07	0,07
Terreno Natural	Gramma Verde	0,02	0,60
	Terra batida	0,58	

Fonte: O Autor (2019)

Conforme apresentado na Figura 64, o piso cerâmico é encontrado nas áreas molhadas (banheiros e cozinhas), áreas secas (quartos, sala de estar e jantar, circulação comum) e na escada. O Radier e as calçadas de contorno possuem a mesma espessura e composição de piso, e escada foi modelada em concreto moldado in loco, com espessura aproximada de 0,10m. Para composição do terreno natural, foi modelada uma camada de grama verde, com espessura de 0,02m, sobre uma camada de terra batida de 0,58 m, totalizando uma espessura de 0,60m.

Figura 64 - Pisos implantados no modelo digital



Fonte: O Autor (2019)

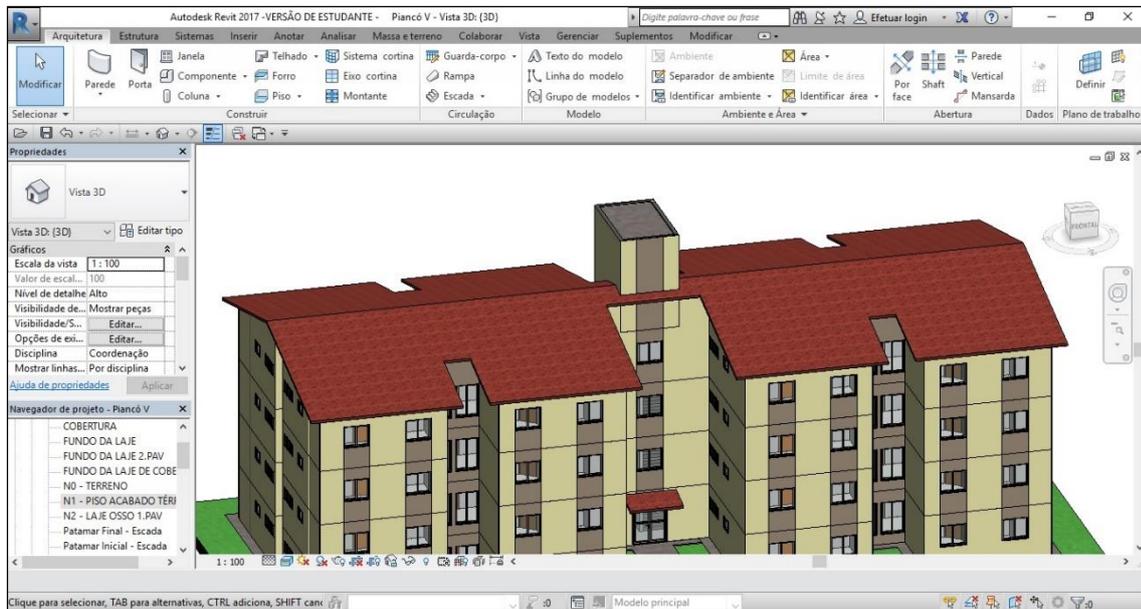
Finalizando a etapa de modelagem, foi elaborado o último elemento do envelope construtivo, que se caracteriza pela cobertura da edificação, conforme características apresentadas na Tabela 7. Para modelagem da cobertura, também foi utilizado ND 200, de forma a representar apenas a geometria da cobertura, sua espessura aproximada, a inclinação do telhado, e o espaçamento entre a laje de cobertura e o telhado, conforme demonstrado na Figura 65 e Figura 66.

Tabela 7 - Características da cobertura da edificação

Nomenclatura do Telhado	Substrato	Espessura das camadas (m)	Espessura Final (m)
Cobertura Cerâmica	Telhado Cerâmico	0,0125	0,0125

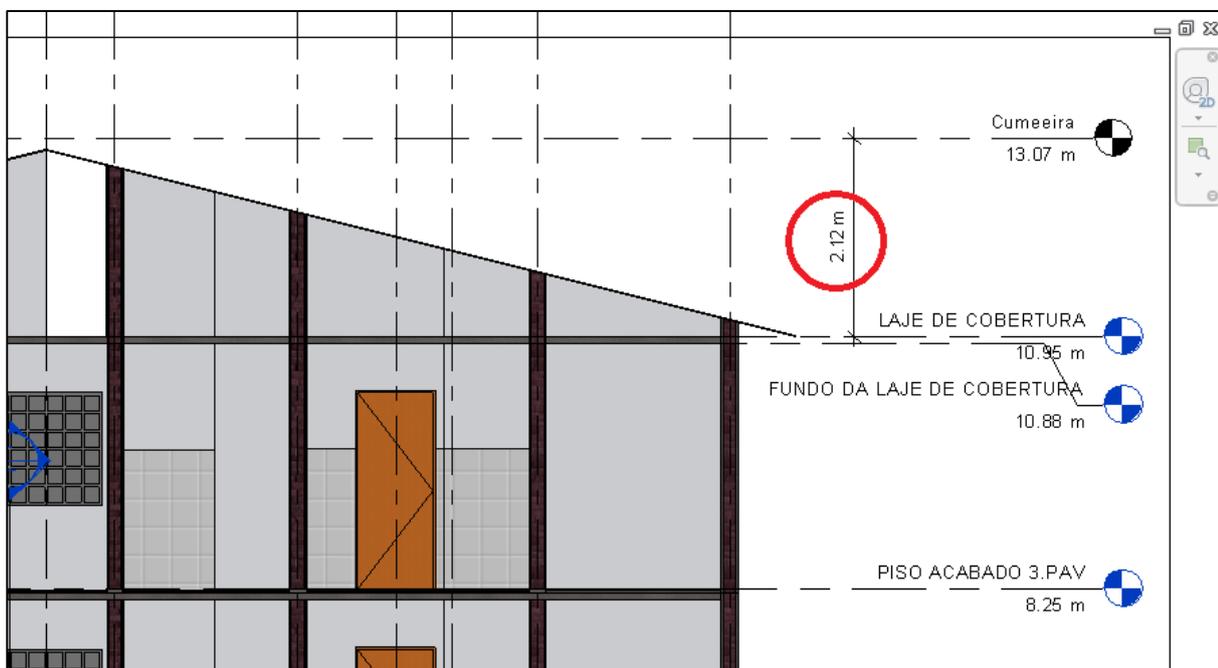
Fonte: O Autor (2019)

Figura 65 - Modelagem final da cobertura da edificação



Fonte: O Autor (2019)

Figura 66 - Modelagem do espaçamento entre a laje de cobertura e o telhado



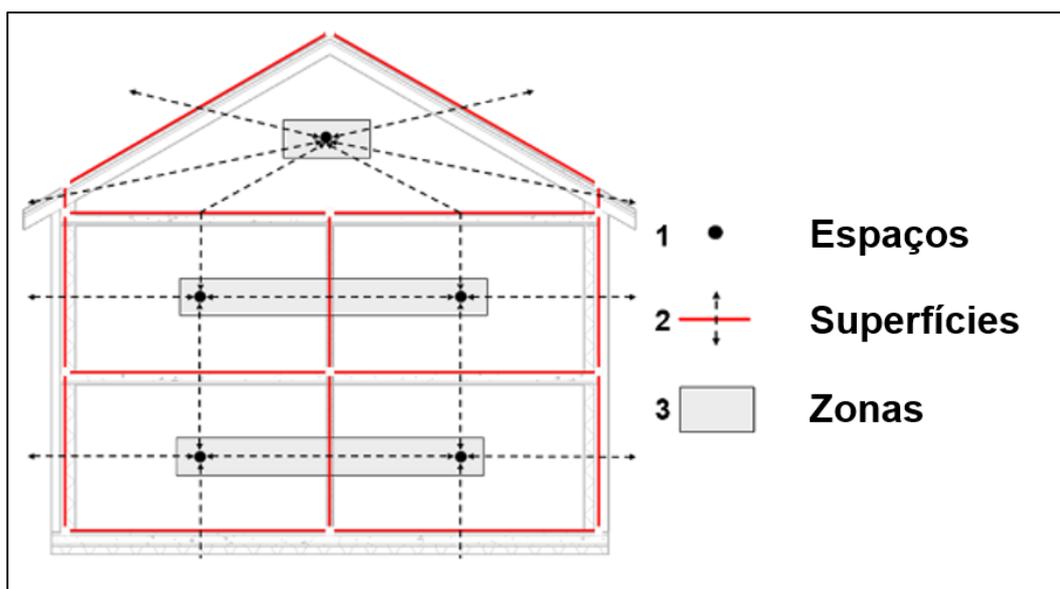
Fonte: O Autor (2019)

Na próxima etapa, será demonstrado a forma que são configurados os materiais da edificação dentro da interface do Revit, além de outros parâmetros necessários para realização das simulações de desempenho pelo GBS.

4.1.2 Configuração do modelo de construção para simulação computacional

Nesta etapa serão apresentados os procedimentos para configuração do modelo de construção, e sua transformação no modelo de energia, que será utilizado para as simulações de desempenho térmico. O modelo de construção é a representação geométrica dos elementos da edificação, com suas áreas, volumes, espessuras e demais propriedades termo-físicas dos materiais, o modelo de energia, destacado na Figura 67, é uma representação esquemática da geometria da edificação usado por mecanismos de simulação de energia, como DOE 2.2 e Energyplus, sendo uma abstração da forma geral e layout da construção, dividido em espaços, superfícies e zonas, capturando todos os caminhos principais e os processos de transferência de calor através da edificação (AUTODESK, 2017).

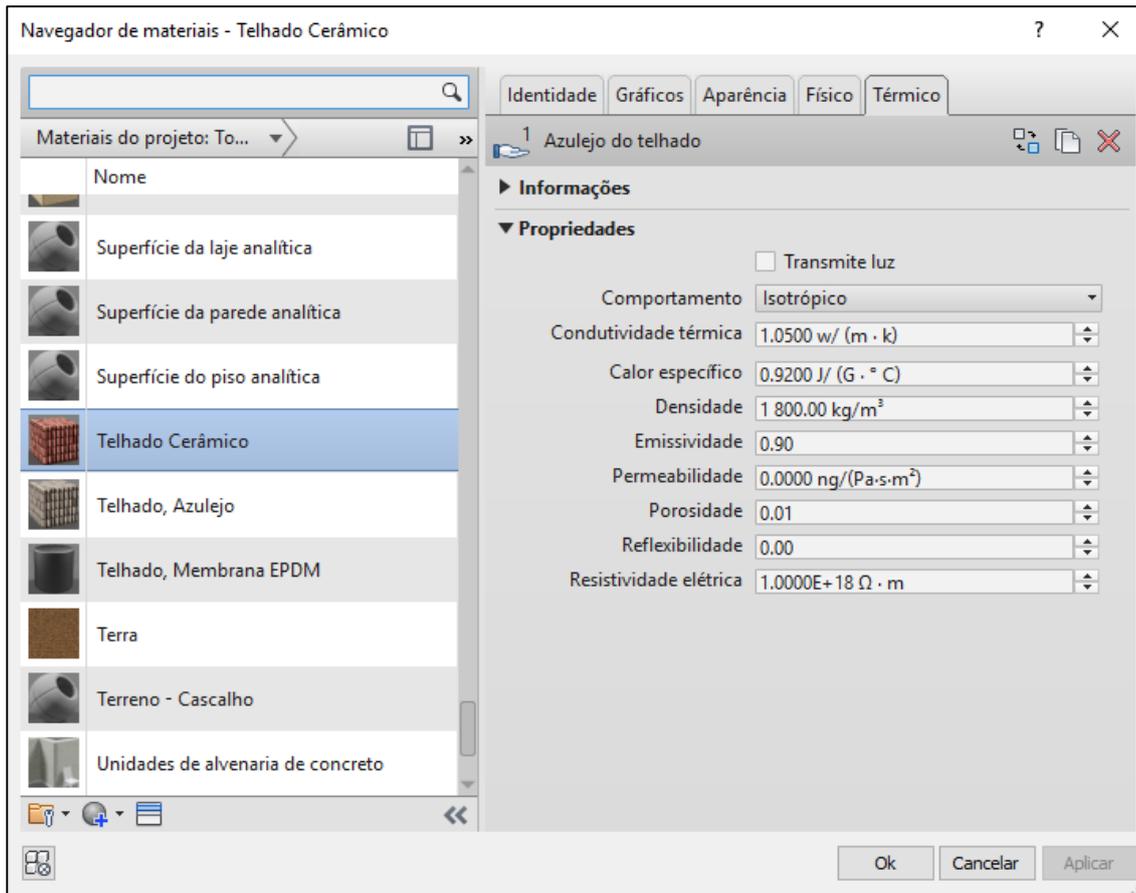
Figura 67 - Conceito do modelo de energia elaborado no Revit



Fonte: Adaptado de AUTODESK (2017)

Os parâmetros térmicos dos materiais são configurados na aba Navegador de Materiais, conforme Figura 68, sendo que para configuração de algumas propriedades térmicas, como Densidade de massa aparente (ρ), Condutividade térmica (λ) e Calor Específico (C) foram considerados os valores da NBR 15220, conforme Tabela 8, os demais valores foram mantidos como padrão com todos os materiais com comportamento isotrópico.

Figura 68 - Aba Navegador de materiais para configuração das propriedades térmicas dos materiais no Revit



Fonte: O Autor (2019)

Tabela 8 - Densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (C) de materiais

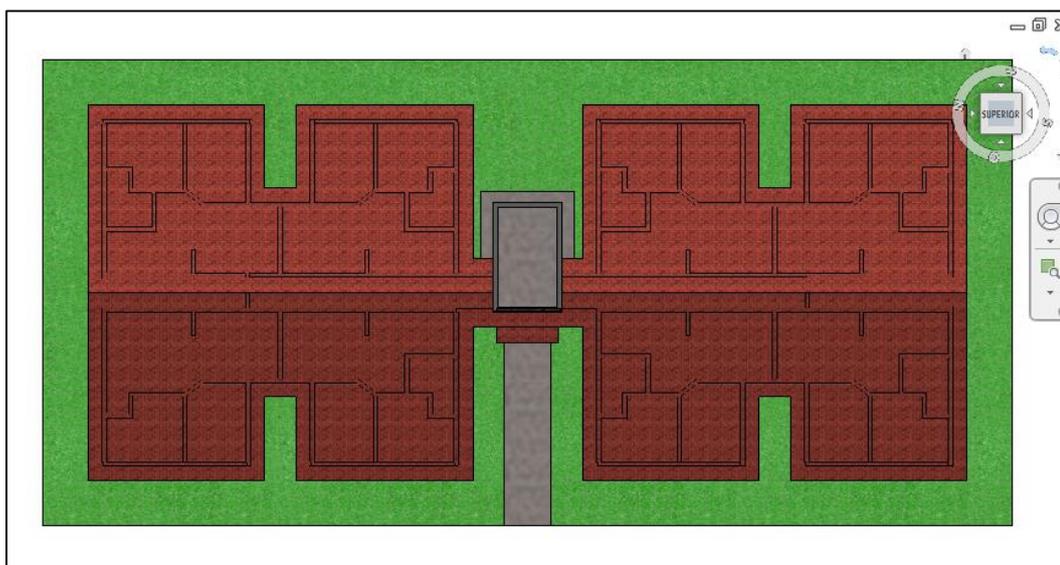
Material	ρ (kg/m ³)	λ (W/(m.k))	C (KJ/(Kg.K))
Concreto	2200 - 2400	1,75	1,00
Tijolos e telha de barro	1800 - 2000	1,05	0,92
Argamassa comum	1800 - 2100	1,15	1,00
Argamassa de gesso	1200	0,70	0,84
Revestimento Cerâmico	1600	0,90	0,92
Alumínio natural	2700	230	0,88
Vidro comum	2500	1,00	0,84
Madeira (Aglomerado de fibras leves)	200-250	0,058	2,30

Fonte: Adaptado da tabela B.3 da NBR 15.220-2, ABNT (2005a)

O próximo passo para a configuração do modelo de energia, é a definição da localização do modelo digital, onde são definidos os nortes verdadeiros, a localização

geográfica da edificação, e a estação climática mais próxima. A configuração do norte verdadeiro assegura a correta incidência da luz solar na edificação, sendo o norte do projeto rotacionado, conforme Figura 69, para que esteja adequado ao norte da edificação implantada, apresentado na Figura 70.

Figura 69 - Modelo digital com norte do projeto configurado conforme edificação em campo



Fonte: O Autor (2019)

Figura 70 - Implantação original da edificação no Google Earth, com destaque para o bloco 07, objeto da simulação de desempenho



Fonte: O Autor (2019)

Na aba localização do clima e terreno, foram inseridas as coordenadas geográficas do ponto de implantação, com a latitude aproximada de -2.567161° e longitude de -44.299148° , obtidos através do programa Google Earth Pro. Ao inserir as coordenadas o Revit já identifica a estação climática mais próxima da edificação, conforme Figura 71, nesse caso utilizando a estação SÃO LUIS/MARECHAL, possível referência a estação meteorológica do Aeroporto Marechal Cunha Machado.

A estação climática fornece um histórico mensal das temperaturas de bulbo seco, que se caracteriza como a temperatura máxima do ar medida por um termômetro exposto ao ar, mas protegido da radiação solar direta, da temperatura de bulbo molhado, ou bulbo úmido, que é a temperatura máxima à qual o ar pode ser resfriado com a evaporação de água no mesmo, e as faixas diárias médias, que demonstra a diferença entre as temperaturas máximas e mínimas diárias (AUTODESK, 2017).

A temperatura de projeto de aquecimento se constitui na temperatura externa que é excedida durante pelo menos 99% das horas num ano de clima típico, e o número de visibilidade é um valor de acordo com a *ASHRAE Handbook 2007 – HVAC Applications, Section 33.4* para definição do grau de visibilidade do céu, sendo considerado limpo e seco com valores maiores que 1.2, médio com valor de 1.0 e nebuloso e úmido com valores menores de 0.8 (AUTODESK, 2017), esses parâmetros foram fornecidos automaticamente pela estação climática, e não foram customizados para a realização da simulação de desempenho.

Figura 71 - Configuração da localização do clima e terreno

Localização do clima e terreno

Localização Tempo Terreno

Utilizar a estação climática mais próxima (SAO LUIS/MARECHAL)

Temperaturas do projeto de refrigeração

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Bulbo seco	33 °C	33 °C	32 °C	33 °C	33 °C	33 °C	33 °C	34 °C				
Bulbo molhado	27 °C											
Faixa média diária	7 °C	8 °C	8 °C	8 °C	8 °C	7 °C	7 °C					

Temperatura de projeto de aquecimento: 23 °C

Número de visibilidade: 1.0

OK Cancelar Ajuda

Fonte: O Autor (2019)

Dessa forma, o modelo de construção encontra-se devidamente localizado e inserido nas condições climáticas aproximadas da edificação, para configuração do modelo de energia.

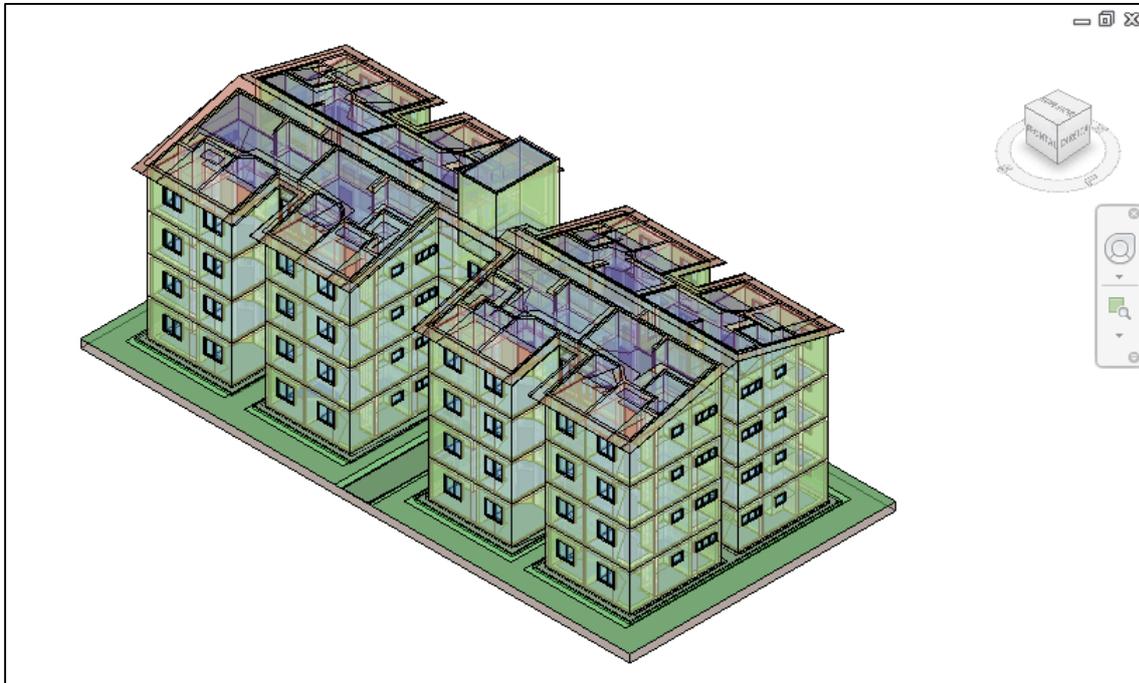
4.1.3 Elaboração do modelo de energia

O Revit apresenta 03 formas de elaboração do modelo de energia, o modelo de massa, mais indicado nos estágios iniciais do projeto e nas suas fases conceituais, o modelo de projeto misto, que seria uma combinação do modelo de massa com alguns elementos de arquitetura detalhados, mais indicado para avaliações intermediárias, na medida que são avançadas mais definições no projeto, e por último o modelo de arquitetura detalhado, com maior quantidade de detalhes da edificação, aproximando a simulação da edificação ao que será executado em campo (AUTODESK, 2017).

De forma a verificar a maior quantidade possível de parâmetros do modelo de construção durante a realização da simulação de desempenho, foi desenvolvido um

modelo de arquitetura detalhado para elaboração do modelo de energia, exposto na Figura 72.

Figura 72 - Modelo de energia elaborado a partir de modelo de arquitetura detalhado



Fonte: O Autor (2019)

Na opção configuração de energia, destacado na Figura 73, é possível definir parâmetros básicos e avançados da criação do modelo de energia, como a localização da edificação, o modo que será importado os elementos do modelo construtivo, utilizando massas conceituais ou elementos da construção, o nível de referência, que consiste no nível em que a edificação troca calor com o solo, a fase do projeto, a resolução do espaço analítico e da superfície analítica, que apresenta valores que definem a precisão da criação dos espaços e superfícies analíticas do modelo de energia, sendo utilizados os valores pré-configurados, e a profundidade da zona do perímetro, que consiste na distância a partir do perímetro da edificação que será considerado pelo modelo de energia para troca de calor com o ambiente externo (AUTODESK, 2017).

Figura 73 - Aba de configuração de energia do Revit

Parâmetro	Valor
Essencial	
Localização	Definido pelo usuário
Modelo analítico de energia	
Modo	Utilizar massas conceituais e elementos de construção
Nível de referência	N1 - PISO ACABADO TERREO
Fase do projeto	Construção nova
Resolução do espaço analítico	0.4572 m
Resolução da superfície analítica	0.3048 m
Profundidade da zona do perímetro	4.5720 m
Divisão de zonas do perímetro	<input checked="" type="checkbox"/>
Avançado	
Outras opções	Editar...

[Como estas configurações afetam a análise de energia?](#)

OK Cancelar

Fonte: O Autor (2019)

Na janela de configurações avançadas de energia, demonstrado na Figura 74, é possível definir parâmetros como o percentual de destino da vidraça, podendo ser considerado como o percentual de abertura de fachada (PAF), e o percentual de destino de claraboias (vidraças na cobertura), que se aplica somente para as massas conceituais com pisos de massas ativados (AUTODESK,2017), diferente do caso a ser simulado, de uma elemento de construção.

Nos dados de construção são inseridos parâmetros como o tipo de construção, relacionado ao tipo de uso da edificação (multifamiliar, escritório, entre outros), a tabela de operação da construção, que simula a ocupação da edificação durante um período diário, o sistema AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado) utilizado para simulação, além de informações sobre o ar exterior, utilização de ambientes/espaço de dados e a forma como as propriedades térmicas dos materiais serão consideradas (AUTODESK, 2017).

Figura 74 - Janela do Revit de configurações avançadas de energia

Parâmetro	Valor
Modelo detalhado	
Percentual de destino da vidraça	0%
Altura de destino do parapeito	0.7500 m
A vidraça está sombreada	<input type="checkbox"/>
Profundidade da sombra	0.4572 m
Percentual de destino da clarabóia	0%
Largura e profundidade da clarabóia	0.9144 m
Dados de construção	
Tipo de construção	Quarto
Tabela de operações de construção	Padrão
Sistema AVAC	Ventilação/Ar-condicionado central, Aquecimento HW, Resfriador 5,96 COP, caldeiras efic. 84,5
Informações sobre o ar exterior	Editar...
Ambiente/Espaço de dados	
Exportar categoria	Ambientes
Propriedades térmicas do material	
Tipos conceituais	Editar...
Tipos esquemáticos	<Construção>
Elementos detalhados	<input type="checkbox"/>
Como estas configurações afetam a análise de energia?	
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancelar"/>	

Fonte: O Autor (2019)

Após a configuração do modelo de energia, será executada a análise de desempenho com os parâmetros pré-configurados, sendo necessário estabelecer uma conexão com a internet para prosseguimento das simulações, que é executada pelo sistema de nuvem do Green Building Studio, e serão apresentados na próxima etapa desse trabalho.

4.1.4 Dados de saída da Simulação de desempenho no Green Building Studio

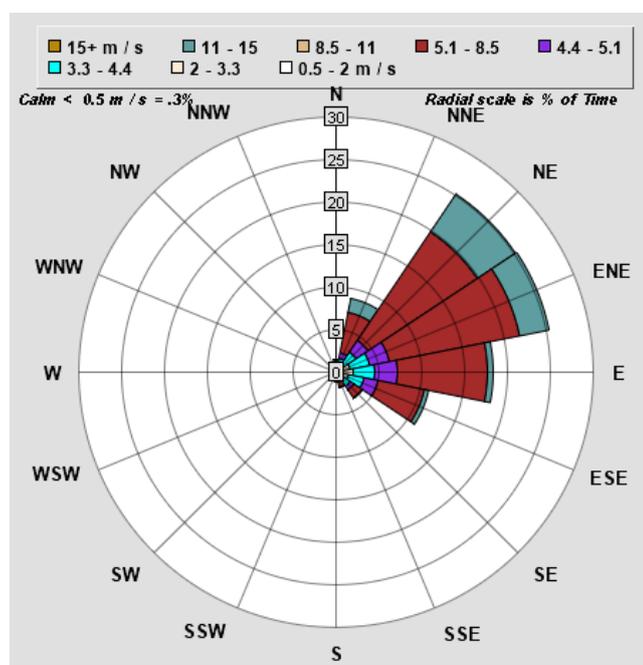
Dentre os dados de saída apresentados na interface online do GBS, em parte extraídos da estação climática definida no Revit, podem ser destacados os seguintes:

- Direção e velocidade da ventilação predominante;
- Temperatura média do ar externa (Bulbo-seco);

- Umidade média do ar;
- Trajetória solar e análise de sombreamento;
- Temperatura interna do ar;
- Contribuição dos elementos construtivos no aquecimento da edificação.

A rosa dos ventos anual, apresentada na Figura 75, indica a orientação do vento predominante e a sua velocidade em m/s, sendo destacado a orientação predominante em nordeste (NE) e a velocidade entre 11 e 15 m/s em aproximadamente 25% do período de medição.

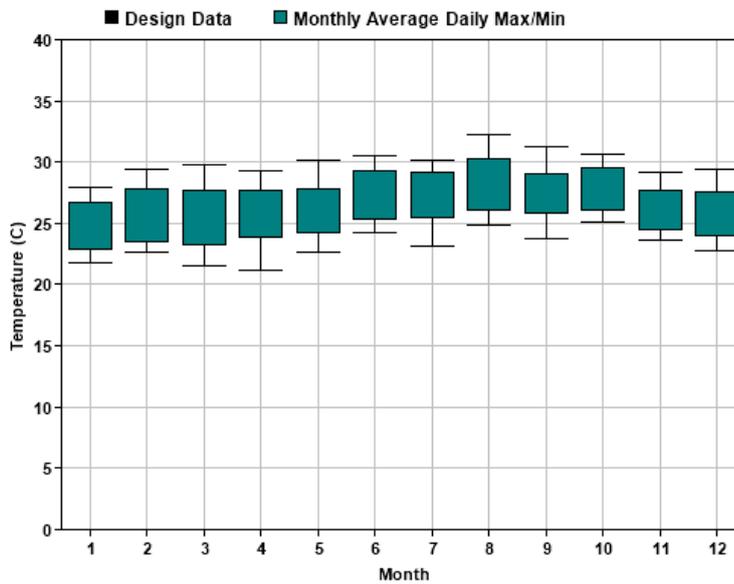
Figura 75 - Rosa dos ventos anual apresentada no relatório de desempenho termo-energético do GBS



Fonte: O Autor (2019)

O gráfico das temperaturas externas médias mensais de bulbo seco, destacado na Figura 76, demonstra as temperaturas máximas e mínimas ao longo dos meses, sendo possível verificar no mês 8 (Agosto), a medição da maior temperatura, de 33,2°C, e a mínima de 23,9°C no mês 4 (Maio).

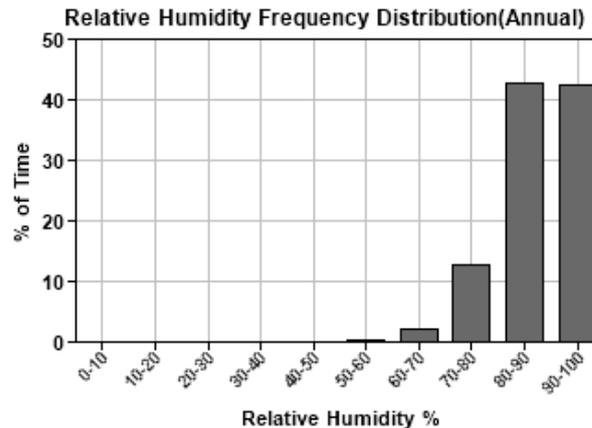
Figura 76 - Gráfico da temperatura média mensal para projeto (Bulbo-seco)



Fonte: O Autor (2019)

Os dados da umidade do ar são apresentados em um gráfico com a frequência do percentual de umidade ao longo do ano, conforme Figura 77, sendo possível verificar a maior ocorrência entre 80 e 100 %, característica das cidades litorâneas, e com proximidade da mata amazônica.

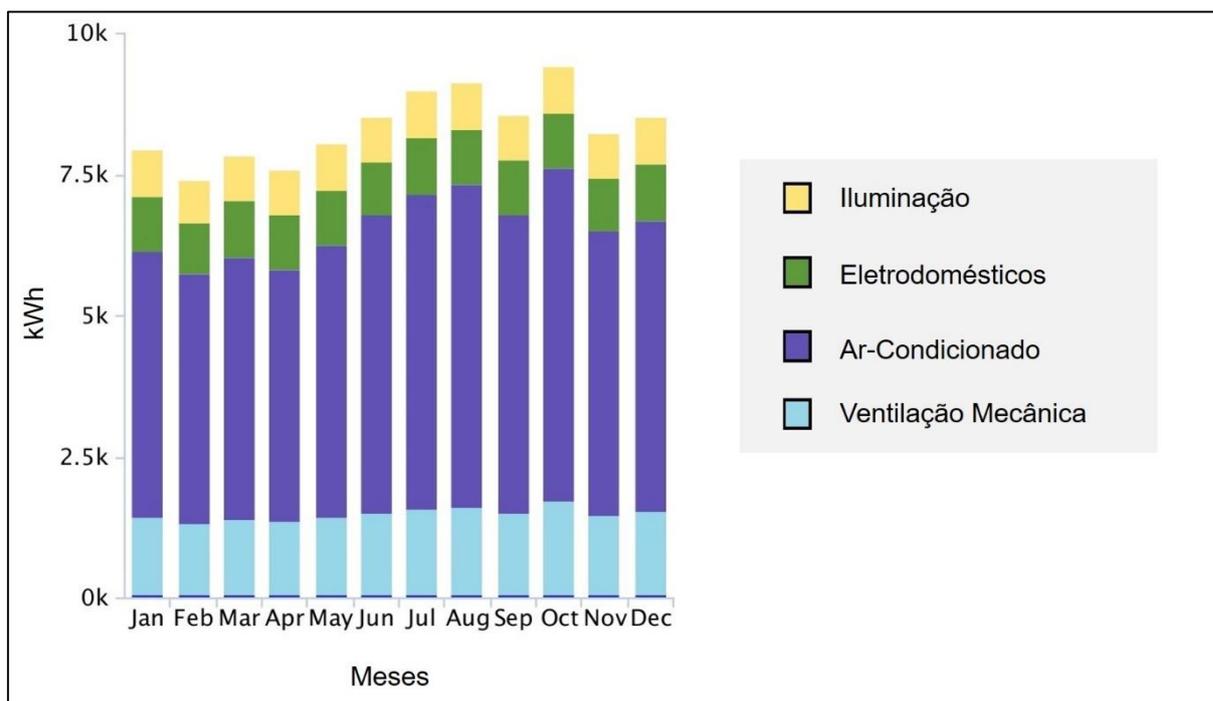
Figura 77 - Gráfico da frequência da umidade relativa do ar ao longo do ano



Fonte: O Autor (2019)

Além dos gráficos fornecidos pela estação climática, o GBS também fornece o consumo energético da edificação ao longo do ano, demonstrado na Figura 78, sendo possível verificar uma grande contribuição da climatização artificial do edifício, tanto por equipamentos de ar-condicionado como de ventilação mecânica (artificial) para compensar o calor dentro da edificação.

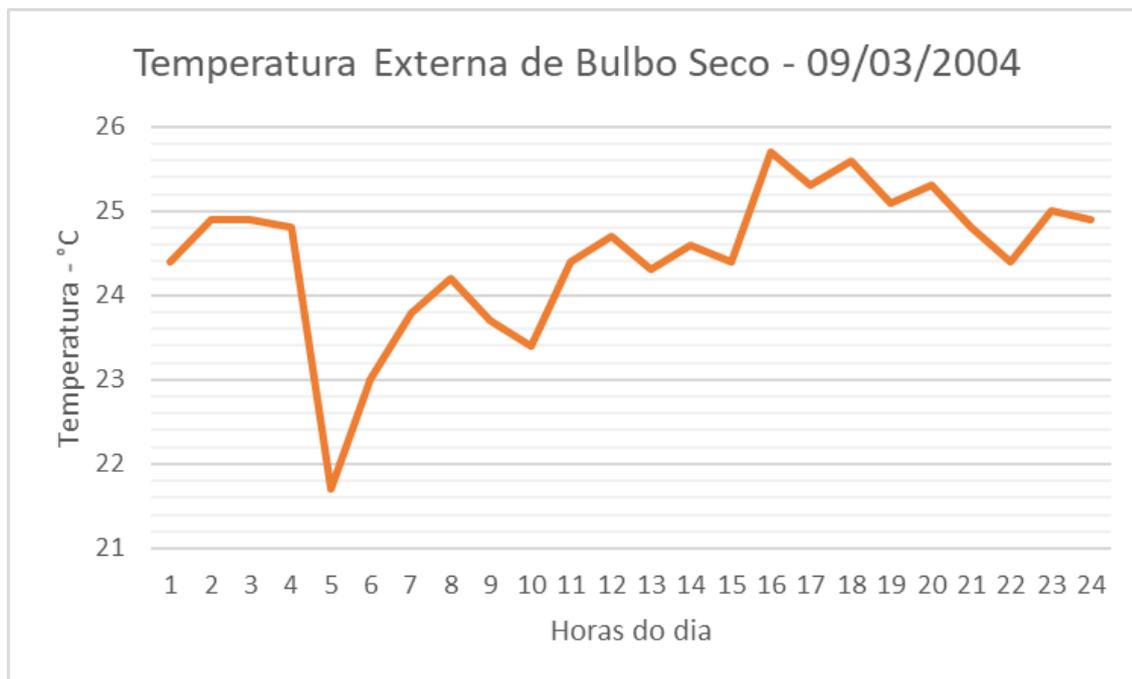
Figura 78 - Gráfico do consumo energético mensal da edificação em kWh



Fonte: O Autor (2019)

O GBS também permite que sejam exportados os principais dados da estação climática para o formato .csv, como temperatura de bulbo seco, umidade do ar, direção e velocidade do vento, entre outros, permitindo a elaboração de gráficos com as temperaturas externas ao longo dos dias do ano, sendo possível verificar a variação da temperatura diária apresentada na estação climática para um dia típico de verão, neste caso para o dia 03 de março de 2004, demonstrado na Figura 79.

Figura 79 - Gráfico de variação da temperatura externa de bulbo seco emitido através de arquivos .csv do GBS



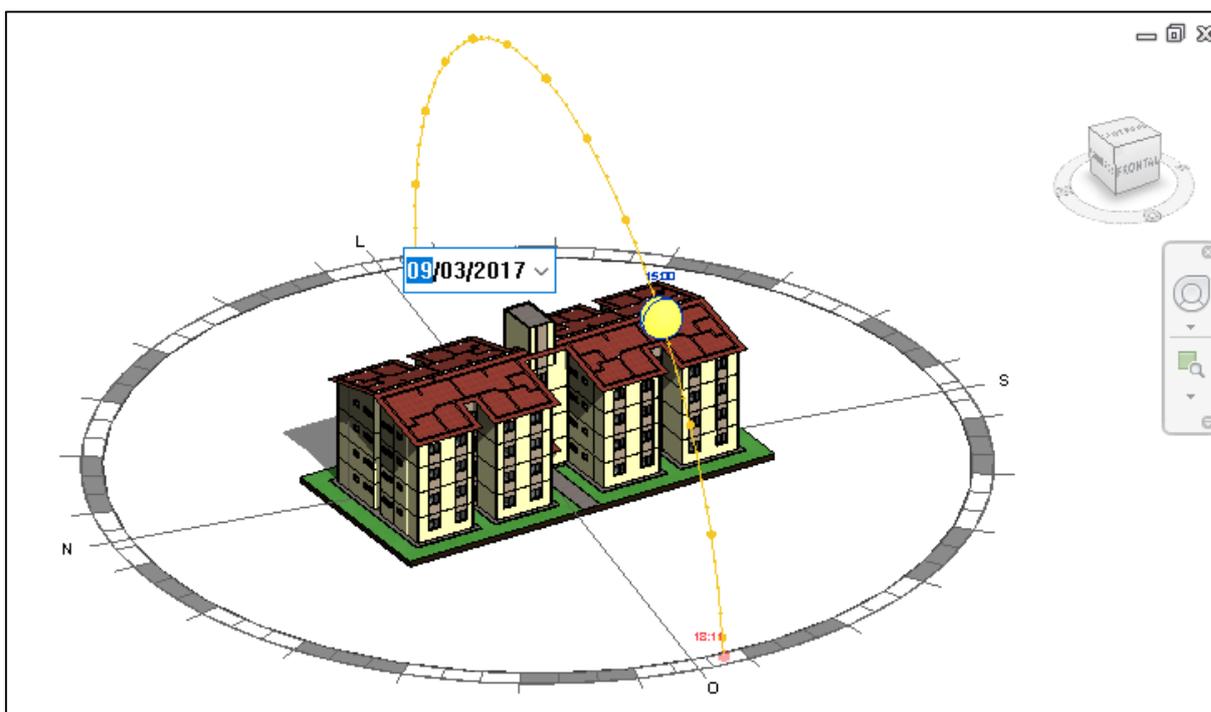
Fonte: O Autor (2019)

Apesar da diferença entre as temperaturas máximas e mínimas das duas medições, é possível verificar que a variação de temperatura ao longo do dia se comporta de maneira similar, com a temperatura mínima sendo verificada no período entre as 5 e 6 horas, e a máxima próximo das 14 horas.

De forma a complementar os dados de saída fornecidos pelo GBS, o Revit também possui outras ferramentas para análise de desempenho térmico, como a análise da trajetória solar e dos pontos de sombreamento, e as cargas de aquecimento e resfriamento da edificação.

Dentro da interface do Revit, é possível ativar o caminho do sol, demonstrado na Figura 80, que permite simular a trajetória solar e o sombreamento das fachadas ao longo do ano, de forma bem intuitiva e didática, diretamente da análise do modelo de construção, sendo inserido para análise a data de 09 de março de 2017. Esse tipo de análise pode ser útil para o dimensionamento de protetores solares, como beirais, marquises, aletas e outros dispositivos de sombreamento que diminuem a incidência de radiação direta no envelope construtivo.

Figura 80 - Análise do Caminho do sol e pontos de sombreamento na fachada

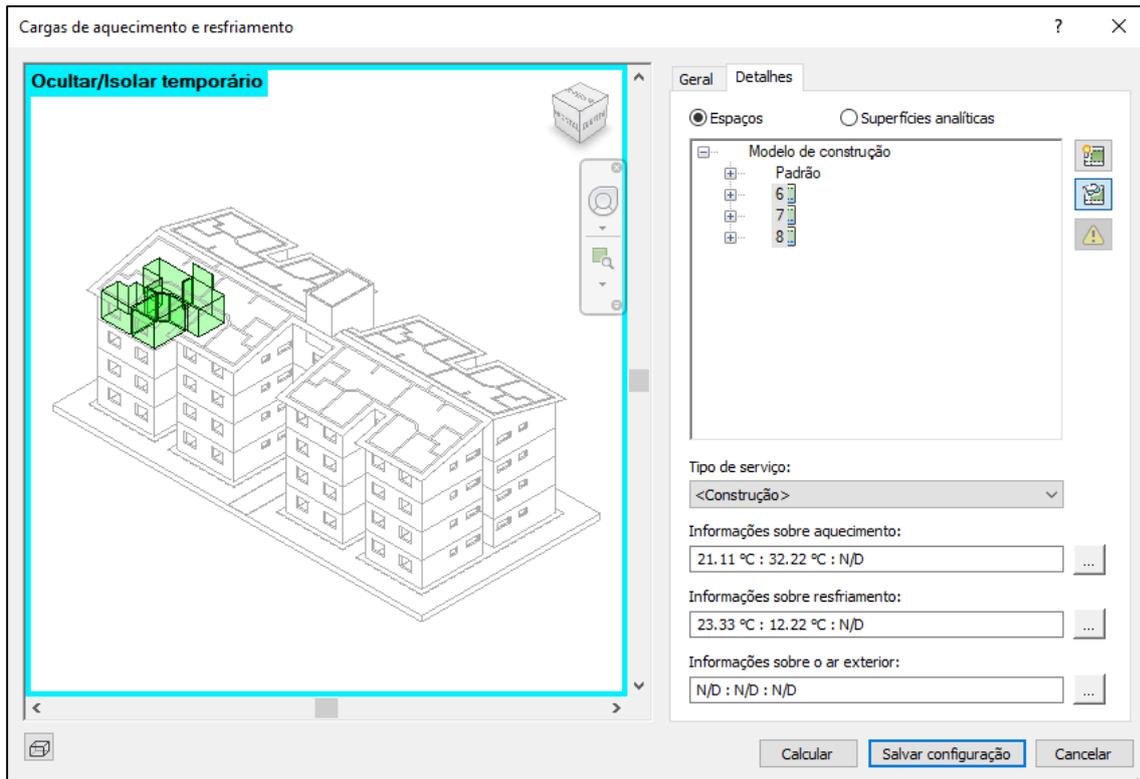


Fonte: O Autor (2019)

Para análise das cargas de aquecimento e resfriamento da edificação, é possível definir as zonas para análise das cargas, conforme Figura 81, nesse caso sendo escolhido os dormitórios e a sala com a orientação mais vulnerável do ponto de vista térmico, a janela do dormitório ou da sala voltada para oeste e a outra parede exposta voltada para norte (ABNT, 2013). Para efeito da simulação de desempenho, as zonas térmicas dos ambientes foram definidas da seguinte forma:

- Zona 06: Quarto 01 com parede com janela voltada para oeste, e parede sem janela voltada para o norte, e parede geminada voltada para o sul;
- Zona 07: Quarto 02 com parede com janela voltado para oeste, parede geminada voltada para o norte, e parede sem janela voltada para o sul;
- Zona 08: Estar Jantar/Cozinha com parede com janela voltada para o oeste, parede com janela (basculante) para o norte, e parede de geminação para o sul.

Figura 81 - Janela de configuração das cargas de aquecimento e resfriamento da edificação



Fonte: O Autor (2019)

Dentre os relatórios apresentados após a análise das cargas de aquecimento e resfriamento, podem ser destacados os dados de localização e clima da edificação, com indicação da temperatura máxima de bulbo seco e bulbo molhado (úmido) de verão, e mínima de bulbo seco no inverno, conforme Figura 82.

Figura 82 - Relatório com resumo dos dados de Localização e clima da edificação

Localização e clima	
Projeto	Nome do projeto
Endereço	Enter address here
Tempo de cálculo	terça-feira, 16 de julho de 2019 23:45
Tipo de relatório	Detalhado
Latitude	-2.57°
Longitude	-44.30°
Bulbo seco de verão	33 °C
Bulbo molhado de verão	26 °C
Bulbo seco de inverno	20 °C
Faixa diária média	8 °C

Fonte: O Autor (2019)

Outro dado de saída do relatório que é gerado, é a contribuição dos elementos da edificação nas cargas de aquecimento e resfriamento, gerado para cada zona climática e apresentado na Figura 83, Figura 84 e Figura 85, sendo possível verificar

a maior contribuição das paredes externas e da cobertura no aquecimento e resfriamento da edificação, juntas somando mais de 80% da carga total.

Figura 83 - Relatório com a contribuição dos elementos da edificação nas cargas de aquecimento e resfriamento da Zona 06 – Dormitório 01

Cooling Components	Total (W)	Percentage	Norte (W)	Sul (W)	Leste (W)	Oeste (W)	Nordeste (W)	Suleste (W)	Noroeste (W)	Sudeste (W)
Parede	1,382	53.85%	239	476	7	660	0	0	0	0
Janela	134	5.20%	0	0	0	134	0	0	0	0
Porta	0	0.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
Telhado	921	35.91%	-	-	-	-	-	-	-	-
Clarabóia	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partição	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltração	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Iluminação	48	1.86%	-	-	-	-	-	-	-	-
Alimentação	68	2.66%	-	-	-	-	-	-	-	-
Pessoas	13	0.52%	-	-	-	-	-	-	-	-
Plenum	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	2,566	100%	239	476	7	794	0	0	0	0
Heating Components	Total (W)	Percentage	Norte (W)	Sul (W)	Leste (W)	Oeste (W)	Nordeste (W)	Suleste (W)	Noroeste (W)	Sudeste (W)
Parede	137	80.18%	15	82	1	40	0	0	0	0
Janela	5	3.12%	0	0	0	5	0	0	0	0
Porta	0	0.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
Telhado	29	16.70%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partição	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Clarabóia	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltração	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	171	100%	15	82	1	45	0	0	0	0

Fonte: O Autor (2019)

Figura 84 - Relatório com a contribuição dos elementos da edificação nas cargas de aquecimento e resfriamento da Zona 07 – Dormitório 02

Cooling Components	Total (W)	Percentage	Norte (W)	Sul (W)	Leste (W)	Oeste (W)	Nordeste (W)	Suleste (W)	Noroeste (W)	Sudeste (W)
Parede	1,864	63.34%	94	1,187	8	576	0	0	0	0
Janela	111	3.77%	0	0	0	111	0	0	0	0
Porta	0	0.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
Telhado	776	26.37%	-	-	-	-	-	-	-	-
Clarabóia	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partição	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltração	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Ventilação	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Iluminação	48	1.63%	-	-	-	-	-	-	-	-
Alimentação	68	2.32%	-	-	-	-	-	-	-	-
Pessoas	13	0.45%	-	-	-	-	-	-	-	-
Plenum	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Calor do ventilador	62	2.11%	-	-	-	-	-	-	-	-
Reaquecer	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	2,943	100%	94	1,187	8	687	0	0	0	0
Heating Components	Total (W)	Percentage	Norte (W)	Sul (W)	Leste (W)	Oeste (W)	Nordeste (W)	Suleste (W)	Noroeste (W)	Sudeste (W)
Parede	137	80.20%	15	82	1	40	0	0	0	0
Janela	5	3.11%	0	0	0	5	0	0	0	0
Porta	0	0.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
Telhado	29	16.68%	-	-	-	-	-	-	-	-
Clarabóia	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partição	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltração	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Ventilação	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	171	100%	15	82	1	45	0	0	0	0

Fonte: O Autor (2019)

Figura 85 - Relatório com a contribuição dos elementos da edificação nas cargas de aquecimento e resfriamento da Zona 08 – Estar Jantar/Cozinha

Cooling Components	Total (W)	Percentage	Norte (W)	Sul (W)	Leste (W)	Oeste (W)	Nordeste (W)	Suleste (W)	Noroeste (W)	Sudeste (W)
Parede	3,026	87.87%	170	0	2,635	220	0	0	0	1
Janela	61	1.77%	19	0	0	42	0	0	0	0
Porta	0	0.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
Telhado	30	0.88%	-	-	-	-	-	-	-	-
Clarabóia	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partição	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltração	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Ventilação	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Iluminação	98	2.85%	-	-	-	-	-	-	-	-
Alimentação	140	4.07%	-	-	-	-	-	-	-	-
Pessoas	16	0.46%	-	-	-	-	-	-	-	-
Plenum	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Calor do ventilador	73	2.11%	-	-	-	-	-	-	-	-
Reaquecer	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	3,444	100%	188	0	2,635	263	0	0	0	1
Heating Components	Total (W)	Percentage	Norte (W)	Sul (W)	Leste (W)	Oeste (W)	Nordeste (W)	Suleste (W)	Noroeste (W)	Sudeste (W)
Parede	213	94.96%	29	0	141	43	0	0	0	0
Janela	10	4.65%	3	0	0	7	0	0	0	0
Porta	0	0.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
Telhado	1	0.40%	-	-	-	-	-	-	-	-
Clarabóia	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Partição	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltração	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Ventilação	0	0.00%	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	225	100%	33	0	141	50	0	0	0	0

Fonte: O Autor (2019)

Os dados de saída apresentados representam os principais relatórios e gráficos de análise de desempenho térmico fornecidos pelo Revit em conjunto com o Green Building Studio, sendo possível verificar que os resultados das simulações na ferramenta BIM são mais qualitativos do que quantitativos, de forma a permitir uma abordagem preliminar do comportamento térmico da edificação.

4.2 Potencialidades e limitações do Autodesk® GreenBuilding Studio para análises de desempenho térmico nas fases iniciais do projeto

Após a realização das simulações na ferramenta BIM e comparação dos resultados obtidos com uma ferramenta consolidada para a análise de desempenho térmico de edificações habitacionais, é possível avaliar as principais potencialidades e limitações do Revit para as simulações nas fases iniciais do projeto, conforme demonstrado na Figura 86, tomando como base o procedimento de simulação apresentado pela NBR 15.575, e os principais parâmetros para análise apresentados por Rodrigues e Pedrini (2017).

Figura 86 - Potencialidades e limitações no uso do Autodesk Revit 2017 para a simulação de desempenho térmico de edificações habitacionais

Potencialidades

- Interface Amigável;
- Modelagem;
- Interoperabilidade;
- Análise preliminar do consumo energético;
- Análise da ventilação predominante;
- Estudo da trajetória solar e pontos de sombreamento;
- Contribuição dos elementos construtivos nas cargas de aquecimento e resfriamento;
- Dados de saída de fácil leitura e interpretação;

Limitações

- Arquivos climáticos;
- Simulações horárias;
- Cálculo de temperaturas internas;
- Pouco difundido entre especialistas;
- Poucos trabalhos de referência;
- Conhecimentos preliminares do usuário;

Fonte: O Autor (2019)

Os pontos fortes da ferramenta BIM, se destacaram na interface amigável que o Revit apresenta em conjunto com o GBS, permitindo uma modelagem mais intuitiva dos elementos construtivos e dados termofísicos da edificação, na interoperabilidade com outros programas de análise de desempenho, que se constitui como uma das principais vantagens das ferramentas BIM (EASTMAN et al., 2012), na possibilidade de análise do consumo energético preliminar dos equipamentos e contribuição individual de cada sistema (iluminação, aquecimento, resfriamento, entre outros) no consumo total da edificação, na análise da ventilação predominante do entorno da edificação, fundamental para aplicação de estratégias bioclimáticas como a ventilação cruzada, o tamanho e direcionamento da orientação das aberturas na edificação

(ABNT, 2005b), na análise da trajetória solar na edificação, permitindo a análise de pontos de sombreamento e do impacto da aplicação de protetores solares, e finalmente na contribuição dos elementos construtivos nas cargas de aquecimento e resfriamento da edificação, sendo que grande parte dos dados de saída são apresentados de forma simples e intuitiva.

Dentre os pontos fracos da ferramenta, podem ser destacados a limitação na utilização e carregamento de arquivos climáticos, a impossibilidade de realização de simulações horárias, fundamentais para análise de desempenho térmico de edificações habitacionais (CBIC, 2013), e a pouca aceitabilidade na utilização da ferramenta por especialistas da área e de referências e trabalhos com o uso da ferramenta para análises de desempenho térmico, em decorrência do uso recente do BIM para análises de desempenho (HABIBI, 2017).

É importante destacar que apesar da ferramenta BIM apresentar recursos que automatizem e melhorem o desenvolvimento de simulações de desempenho térmico, é de grande importância que o usuário tenha o conhecimento interdisciplinar que envolve o processo digital, nesse caso a simulação de desempenho térmico e as principais estratégias bioclimáticas para desenvolvimento de uma edificação eficiente do ponto de vista térmico, para que seja possível explorar da melhor forma os recursos disponíveis do programa (ABDI, 2017a). Na próxima etapa desse trabalho, serão apresentadas as conclusões deste trabalho, com os principais resultados da pesquisa, discussões e propostas de trabalhos futuros.

5 CONCLUSÃO

Após a realização das simulações de desempenho térmico com o uso do programa BIM Autodesk® Revit 2017 em conjunto com o Green Building Studio, foi possível verificar que as ferramentas BIM conseguem suprir em parte a falta de ferramentas para análise de desempenho térmico nas fases iniciais do projeto, sendo de grande importância que o usuário tenha conhecimento dos principais conceitos e estratégias da arquitetura bioclimática e dos procedimentos da simulação de desempenho térmico das edificações.

Através da verificação das principais funcionalidades da ferramenta, foi possível evidenciar que é possível otimizar o desempenho final do edifício com a realização de análises preliminares do comportamento térmico da edificação frente ao entorno em que está inserido, como a análise da direção da ventilação predominante do entorno, a análise da trajetória solar e pontos de sombreamento na edificação, além da contribuição de cada elemento construtivo (cobertura, paredes, janelas, entre outros) nas cargas de aquecimento e resfriamento da edificação.

As principais limitações da ferramenta, se embasam na falta da configuração de parâmetros mais avançados para a simulação de desempenho térmico, e na grande definição de configurações *default*, característica de simulações preliminares, que apesar de serem interessantes para análises iniciais, não são atrativas para profissionais que desenvolvem simulações mais avançadas, e com maior configuração de parâmetros.

A tendência de utilização de programas com interfaces mais amigáveis para as análises de desempenho das edificações, além de direcionar essas análises para as fases preliminares do projeto, permite que os profissionais que mais contribuem na concepção inicial da edificação, nesse caso os Arquitetos, tenham rápido acesso à informações que colaboram no desempenho final do ambiente construído.

A constante busca por otimização de recursos, redução de desperdício, de retrabalhos, e alcance de requisitos de sustentabilidade, fomenta a utilização de novas tecnologias projetuais, e da avaliação dos impactos econômicos-ambientais em etapas da cada vez mais preliminares do processo de desenvolvimento de uma edificação.

Ao final dessa pesquisa, pretendeu-se contribuir com o panorama de trabalhos na área de análise de desempenho térmico com o uso de ferramentas BIM, uma tecnologia emergente que promete revolucionar a indústria da construção, e modificar a dinâmica na elaboração, coordenação de projetos, e execução de edificações, demonstrando aos profissionais e pesquisadores da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) um possível caminho para a melhoria do desempenho das edificações e otimização do processo projetual.

REFERÊNCIAS

ABANDA, F.H.; BYERS, L. An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling). **Energy**, n.97,p.517- 527,2016.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **Guia 1: Processo de Projeto BIM**. Brasília, DF: ABDI, 2017a.

_____. **Guia 5: Avaliação de desempenho energético em Projetos BIM**. Brasília, DF: ABDI, 2017b.

ALMEIDA, V. G.;DORNELLES, K. A. Avaliação do desempenho térmico de uma edificação habitacional em São Luís-MA, através de medição in loco. In: Encontro Nacional e Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2017, Balneário Camboriú - SC. XIV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e X Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído: habitat humano - em busca de conforto ambiental, eficiência energética e sustentabilidade no século XXI. Balneário Camboriú: Marketing Aumentado, 2017. **Anais...** p. 1026-1035

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **ASHRAE 140: standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs**. Atlanta, GA: ASHRAE, 2011

_____. **ASHRAE 90.1: Energy Standard for Building Except Low-Rise Residential Buildings**. Atlanta, GA: ASHRAE, 2011

AMORIM, L. L. A; LYRIO, A. M.; SOUZA, L. L. A. Impactos do uso do BIM em escritórios de Arquitetura: Oportunidades no mercado imobiliário. **Gestão & Tecnologia do Projeto**, São Paulo,v. 4, n. 2,p. 26-53, nov. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **ABNT 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, 2005a.

_____. **ABNT NBR 15220: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005b.

_____. **ABNT NBR 16636-2: Elaboração e desenvolvimento de serviços técnicos especializados de projetos arquitetônicos e urbanísticos Parte 2: Projeto Arquitetônico.** Rio de Janeiro, 2017.

AUTODESK. **Página inicial de ajuda Autodesk® Revit® 2017.** Disponível em: <<http://help.autodesk.com/view/RVT/2017/PTB/>> Acesso em 06 jul. 2017.

_____. **Green Building Studio.** Disponível em: <<https://gbs.autodesk.com/GBS/>> Acesso em 25 mar. 2019. **ok**

BEAZLEY, S.; HEFFERNAN, E.; MCCARTHY, T. J. Enhancing energy efficiency in residential buildings through the use of BIM: The case for embedding parameters during design. **Energy Procedia**, v. 121, p. 57–64, 2017.

BORGES, C. A. de M. **O Conceito de desempenho de edificações e sua importância para o setor da construção civil no Brasil.** 2008. 263p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil.

BRASIL. Lei nº 8.078 , de 11 set. 1990. **Dispõe a proteção do consumidor e dá outras providências.** Brasília: Ministério da Justiça, 2001.

_____. Ministério das Cidades. Portaria no 345, de 3 de agosto de 2007. Regimento geral do Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT) de produtos inovadores. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Seção 1, n. 155, 13 de agosto de 2007.

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS (CAMBRIDGE). **Cambridge Dictionary.** 2019. Disponível em: <<https://dictionary.cambridge.org/pt/dicionario/ingles/plugin/>> Acesso em: 03 jul. 2019

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Desempenho de edificações habitacionais: Guia Orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013.** Fortaleza: Gadiolli Cipolla Comunicação, 2013. 308p.

_____. **O Brasil adota novos Padrões de Qualidade para Construção de Casa e Apartamentos.** 2014. Disponível em: <<http://www.cbic.org.br/sites/default/files/Lan%C3%A7amento%20do%20Guia%20Orientativo%20da%20Norma%20de%20Desempenho.pdf> > Acesso em: 01 Jun. 2015 **ok**

CERBRAS. **Novos padrões de qualidade para a construção civil em 2013.** 2013. Disponível em <<http://blog.cerbras.com.br/index.php/novos-padroes-de-qualidade-para-a-construcao-civil-em-2013/>> Acesso em: 22 jul. 2019

CHANG, R.; et. al. Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions. **Automation in Construction**, n.83,p.134-148,2017.

CHVATAL, K. M. S. Avaliação do procedimento simplificado da NBR 15575 para determinação do nível de desempenho térmico de habitações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 119-134, out./dez. 2014.

CONSTRUTORA A. Banco de dados da construtora. Acesso em: 09 mar. 2017

DASSAULT SYSTEMES. **Ajuda do Solidworks**. 2012. Disponível em: <http://help.solidworks.com/2012/portuguese-brazilian/solidworks/cworks/Isotropic_and_Orthotropic_Materials.htm> Acesso em 08 jun. 2019

DELBIN, S. **Inserção de simulação computacional de conforto ambiental de edifícios em ensino de projeto arquitetônico**: proposta de metodologia. 2008. 242p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

DESIGNBUILDER. **ANSI/ASHRAE Standard 140-2011 Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests**. 2014. Disponível em: <http://files.designbuilder.cl/200000036-348f735887/DesignBuilder_v4.2_ASHRAE140_2.pdf> Acesso em: 31 mar. 2019.

_____. **DesignBuilder Revit – gbXML Tutorial for DesignBuilder v5.5**. 2015. Disponível em: <<http://www.batisim.net/telechargement/documentation-logiciel/444-designbuilder-revit-gbxml-tutorial-v2/file.html>> Acesso em: 31 mar. 2019.

_____. **Training Resources**. 2019. Disponível em: <<https://designbuilder.co.uk/training/tutorials>> Acesso em: 10 jul. 2019.

DE SOUZA, R. **O Conceito de Desempenho Aplicado às Edificações**. 1. ed. São Paulo: 2015

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas**: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA. 2008. 160p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

DURANTE, F. K.; MENDES JR, R.; SCHEER, S.; GARRIDO, M. C.; Avaliação de aspectos fundamentais para a gestão integrada do processo de projeto e planejamento com uso do BIM. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 7., 2015, Recife. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2015.

EASTMAN, C. et al. **Manual de BIM: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores**. Porto Alegre: Bookman, 2013. 500p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. Rio de Janeiro: EPE, 2017.

FABRICIO, M. M.; **Projeto Simultâneo na construção de edifícios**. 2002. 328p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

FABRICIO, M. M.; ONO, R.; (organizadores) **Avaliação de desempenho de tecnologias construtivas inovadoras: manutenção e percepção dos usuários**. Porto Alegre: ANTAC, 2015. Disponível em: < <https://bdpi.usp.br/item/002709629>> Acesso em 22 de jul. 19.

FERREIRA, S. L. Definição de propriedades e características de componentes BIM comuns a partir do Energyplus. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 61-70 , jul./dez. 2015.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Studio Nobel, 1995.

GARWOOD, T. L., et. al. A review of energy simulation tools for the manufacturing sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.81, p. 895–91, 2017.

GERRISH, T. et al. BIM application to building energy performance visualisation and management Challenges and potential. **Energy and Buildings**, v. 144, p. 218–228, 2017.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª edição. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

HABIBI, S. The promise of BIM for improving building performance. **Energy and Buildings**, n.153,p.525- 548,2017.

INTEGRATED ENVIRONMENT SOLUTIONS (IES). **Ve-Ware User Guide Revit Toolbar Integration <Virtual Environment 5.9>**. 2008. Disponível em: <http://www.iesve.com/software/images/ve-ware/related-docs/ve-ware_user_guide_revit.pdf> Acesso em: 30 jun. 2019

_____. **VE-Toolkits**. 2009. Disponível em: <http://www.iesve.com/software/flyers/ies_ve-toolkits_flyer__hr__2.pdf> Acesso em: 03 jul. 2019

_____. **IESVE for Architects**. 2010. Disponível em: <http://www.iesve.com/software/ve_architects/ve_architects_trial_support.pdf> Acesso em: 03 jul. 2019

_____. **BIM + Building Performance Analysis Using Revit 2014 and IES <Virtual Environment>**. 2014. Disponível em: <

<https://www.iesve.com/software/interoperability/revit#technical-detail>> Acesso em: 31 mar. 2019.

_____. **Revit Plug-in User guide IES Virtual Environment**. 2015a. Disponível em: <<https://www.iesve.com/support/userguides?page=6>> Acesso em: 31 mar. 2019.

INTEGRATED ENVIRONMENT SOLUTIONS (IES). **Sustainability Toolkits Early Stage Building Design**. 2015b. Disponível em: <www.iesve.com/content/download/asset_9237> Acesso em: 30 jun. 2019

INTEGRATED ENVIRONMENTAL SOLUTIONS (IES). **SOFTWARE VALIDATION AND APPROVAL**. 2019. Disponível em: <<https://www.iesve.com/software/software-validation>> Acesso em: 31 mar. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ -R)**. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012. Portaria n. 18.

JEONG, W. S.; KIM, K. H. A performance evaluation of the BIM-based object-oriented physical modeling technique for building thermal simulations: A comparative case study. **Sustainability (Switzerland)**, v. 8, n. 7, p. 1–27, 2016.

KOWALTOWSKI, D.; et al. **O processo de projeto em arquitetura: da teoria à tecnologia**. São Paulo: Oficina de Textos. 2011

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (LABEEE). **Arquivos Climáticos INMET 2018**. 2018. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018>> Acesso em: 22 jul. 2019

LAMBERTS, R.; et al. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2014. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf>, Acesso em 05 Out. 2016

LIMA, C. C. N. A. de. **Autodesk Revit Architecture® 2013: Conceitos e Aplicações**. São Paulo: Érica, 2012.

_____. **Building Information Modeling**. 2015. Disponível em: <<https://claudiacamposlima.wordpress.com/2011/09/14/curso-de-bim-building-information-modeling/>> Acesso em: 25 de Jul. de 2015.

MENDES, A. et al. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.5, n.4,p. 47-68, out./dez. 2005.

MAHMUD, K. et al. Computational tools for design, analysis, and management of residential energy systems. **Applied Energy**, v. 221, n. November 2017, p. 535–556, 2018.

NEGENDAHL, K. Building Performance Simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models. **Automation in Construction**, [S.l.], n.54, p.39- 53, 2015.

NÓBREGA JUNIOR, C. L.; MELHADO, S. B. Coordenador de projetos de edificações: estudo e proposta para perfil, atividades e autonomia. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 69-89, jan.-jun. 2013.

PEDRINI, A.; SZOLKOLAY, S. Recomendações para o desenvolvimento de uma ferramenta de suporte as primeiras decisões projetuais visando ao desempenho energético de edificações de escritório em clima quente. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.5, n.1,p. 39-54, jan./mar. 2005.

QUEIRÓZ, G.; SANTOS, J.; GRIGOLETTI, G. Estudo das exportações de modelos digitais produzidos no Autodesk Revit para simulações de edificações no Energy Plus. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais ...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

QUEIRÓZ, G.; GRIGOLETTI, G.; SANTOS, J. Interoperabilidade entre os programas AutoDesk Revit e EnergyPlus para simulação térmica de edificações. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 10, p. e019005, jan. 2019. ISSN 1980-6809. Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8652852>>. Acesso em: 02 jan. 2019.

REINHART, C; IBARRA, D. **Harvard University – Graduate School of Design - DesignBuilder//EnergyPlus “Tutorial#1” Getting Started**. 2009. Disponível em: <http://web.mit.edu/sustainabledesignlab/projects/TeachingResources/EnergyModelling_GettingStarted.pdf> Acesso em: 10 jul. 2019

_____. **Harvard University – Graduate School of Design - DesignBuilder//EnergyPlus “Tutorial#2” Load Schedules**. 2012a. Disponível em: <http://web.mit.edu/sustainabledesignlab/projects/TeachingResources/EnergyModelling_LoadSchedules.pdf> Acesso em: 10 jul. 2019

_____. **Harvard University – Graduate School of Design - DesignBuilder//EnergyPlus “Tutorial#3” Construction Assemblies, Load Reduction & Shading**. 2012b. Disponível em: <http://web.mit.edu/sustainabledesignlab/projects/TeachingResources/EnergyModelling_ConstructionAssembliesLoadReductionAndShading.pdf> Acesso em: 10 jul. 2019

RODRIGUES, C. O. de M.; PEDRINI, A. Integração da simulação termoenergética nas primeiras fases do processo projetual: o estudo de seis casos. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 245–266, 2017.

SUCCAR, B. Building Information Modelling Framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. **Automation in Construction**, n.18, p.357-375, 2009.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Análise comparativa dos resultados do desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial pelos métodos de simulação do RTQ-R e da NBR 15575-1. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 213-230, jan./mar. 2014.

US GENERAL SERVICES ADMINISTRATION (GSA). **Information Delivery Manual (IDM) for BIM Based Energy Analysis**. 2009. Disponível em: <http://www.blis-project.org/IAI-MVD/IDM/BSA-002/PM_BSA-002.pdf> Acesso em: 17 mar. 2019.

WEN, L.; HIYAMA, K. A Review: Simple Tools for Evaluating the Energy Performance in Early Design Stages. **Procedia Engineering**, v. 146, p. 32–39, 2016.

WELLE, B.; HAYMAKER, J.; ROGERS, Z. ThermalOpt: A methodology for automated BIM-based multidisciplinary thermal simulation for use in optimization environments. **Building Simulation**, v. 4, n. 4, p. 293–313, 2011.