UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

TIAGO TAMANINI JUNIOR

**Modelagem paramétrica para análise termoenergética de edificações nas fases
iniciais de projeto**

São Paulo
2019

TIAGO TAMANINI JUNIOR

**Modelagem paramétrica para análise termoenergética de edificações nas fases
iniciais de projeto**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Inovação na Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Leal Ferreira

São Paulo
2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 23 de AGOSTO de 2019

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

Catálogo-na-publicação

Tamanini Jr, Tiago

Modelagem paramétrica para análise termoenergética de edificações nas fases iniciais de projeto / T. Tamanini Jr -- versão corr. -- São Paulo, 2019. 108 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Modelagem Paramétrica 2.Simulação Termoenergética Computacional 3.Design Computacional 4.BIM 5.Interoperabilidade I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

Nome: TAMANINI JR., Tiago

Título: Modelagem paramétrica para análise termoeenergética de edificações nas fases iniciais de projeto

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Dedicatória

*A todos que depositaram confiança
na minha formação e estudos.*

*Em especial, aos meus professores pelos
incondicionais ensinamentos a mim oferecidos,
do colégio ao ensino superior.*

*Sem professores,
nem o mais básico conhecimento eu teria tomado.*

Agradecimentos

Em especial, ao meu orientador Sérgio Leal Ferreira, pela oportunidade de realização deste trabalho e confiança depositada ao longo desse tempo.

Aos meus familiares, minha mãe Frida Lange e meu pai Tiago Tamanini (*in memoriam*), por me propiciarem incondicional apoio aos meus estudos desde cedo para conseguir chegar até a realização dessa pesquisa; à minha amiga Fernanda Sasse, por me estimular sempre a procurar fontes mais distantes e apoiar pessoalmente em diversos momentos; ao meu primo Dimas Tamanini Junior e minha amiga Dariele Moreira por me acolherem em São Paulo durante minhas viagens vindas de Santa Catarina.

Sempre corremos o risco de cometer injustiças ao relacionar nominalmente as pessoas que de alguma forma colaboraram com um trabalho, mas o que é a vida de um pesquisador senão um caminho em meio a riscos. A todos os seguintes meu apreço e amizade pela ajuda em qualquer nível ou momento. Aos ausentes minhas sinceras desculpas.

Eliany Funari

Gustavo Aparecido de Oliveira

Leonardo Mazzaferro

Lucas Francisco Martins

Luciana Bechara Sanchez

Luís Fernando Moreira Machado

Marcelo Micali Ros

Mariana Lopes Juliao

Marina Lessa

Raimundo Nonato Borges Júnior

Renata De Vecchi

“O lápis e o computador são, se deixados por conta própria, tão estúpidos e tão inteligentes quanto as pessoas que os guiam.”

Norman Foster

Resumo

TAMANINI JR., Tiago. **Modelagem paramétrica para análise termoenergética de edificações nas fases iniciais de projeto**. 2019. 108p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

O trabalho na arquitetura sempre se baseou em processos e raciocínios lógicos, seguindo um fluxo de informações para solucionar questões referentes ao habitat humano. A partir da década de 1960 iniciou-se o desenvolvimento de métodos de incorporação da computação no trabalho do arquiteto, buscando tornar o processo de projeto mais eficiente. Entretanto, a influência do uso de ferramentas computacionais nas fases iniciais de projeto ainda é pouco explorada. A grande maioria dos arquitetos continua utilizando métodos tradicionais para a geração da forma, utilizando o computador simplesmente como suporte, sem aproveitar seu grande potencial para a realização de tarefas repetitivas na geração de alternativas. Os novos sistemas de modelagem paramétrica têm revolucionado essa fase do trabalho, mas ainda obrigam o arquiteto a se adaptar aos métodos e metáforas escolhidos por seus programadores, reduzindo sua liberdade de criação. Somado a esse fator, o surgimento de certificações ambientais e etiquetas de eficiência energética tem envolvido esforços para o desenvolvimento de métodos quantitativos para análise de projetos de edificações. Desse modo, projetar um edifício sustentável é sinônimo de quantificar seu impacto. A simulação computacional permite avaliar a quantidade desses impactos nas edificações, tornando possível analisar esses danos ainda em fase de projeto. Em atenção à necessidade do uso de simuladores nas etapas iniciais de projeto e à integração destes aos programas de modelagem paramétrica, desenvolvedores vêm realizando esforços para suprir essa lacuna. O progresso nesse campo de estudo tem sido realizado em integrar os motores de simulação termoenergética computacional existentes aos programas BIM (*Building Information Modeling*). Portanto, o objetivo deste trabalho é desenvolver um fluxo de trabalho para geração de um modelo paramétrico a partir de design algorítmico em estudos de viabilidade de edificações para análise termoenergética. O trabalho utiliza o Dynamo do Revit como ferramenta de design algorítmico para gerar a volumetria 3D automatizada para edifícios de escritórios e compara esse modelo à interoperabilidade BIM-CAD-BEM e BIM-BEM. O primeiro processo testa arquivos STL e DWG do sistema CAD exportados ao SketchUp e convertidos no Euclid para simulação computacional, sendo verificados posteriormente no EnergyPlus. O segundo processo exporta o modelo BIM gerado por massa conceitual e por elementos construtivos gerados no Dynamo e Revit diretamente para o Insight 360 e depois os exporta para o EnergyPlus. É realizada então uma análise comparativa aos modelos gerados em CAD e BIM. Os resultados validam para uma interoperabilidade mais confiável na proposta entre os modelos BIM e BEM, pois os arquivos CAD não suportam configurações de energia. A proposta de automatização de design algorítmico para geração de volumes 3D para o BIM e simulação se mostra viável, mas ainda é limitada pela integração entre os *softwares*.

Palavras-chave: Modelagem Paramétrica, Simulação Termoenergética Computacional, Design Computacional, BIM, Interoperabilidade.

Abstract

TAMANINI JR., Tiago. **Parametric modeling for thermoenergetic analysis in early design stages of buildings**. 2019. 108p. Dissertation (Master of Science) – Polytechnic School, University of São Paulo, São Paulo, 2019.

The work in architecture has always been based on processes and logical thinking, following a flow of information to solve questions concerning human habitat. From the 1960s onwards, the development of methods of incorporating computing into the architect's work began, making the design process more efficient. However, the influence of the use of computational tools in the early design stages is still little explored. The vast majority of architects continue to use traditional methods for form generation, using the computer only as support, without taking advantage of their great potential for performing repetitive tasks in the generation of alternatives. The new parametric modeling systems have revolutionized this stage of the work, but still compel the architect to adapt to the methods and metaphors chosen by their programmers, reducing their freedom of design. Added to this factor, the emergence of environmental certifications and energy efficiency labels has involved efforts to develop quantitative methods for analysis of building projects. In this way, designing a sustainable building is synonymous of quantifying its impact. The computational simulation allows to evaluate the amount of these impacts in the buildings, making it possible to analyze these damages still in the design stage. Due to the need to use simulators in the early design stages and to the integration of these to parametric modeling programs, developers have been making efforts to fill this gap. The progress in this field of study has been realized in integrating the existent computational thermos-energetic simulation engines to the BIM (Building Information Modeling) programs. Therefore, the objective of this work is to develop a workflow for generating a parametric model from algorithmic design in feasibility studies for thermoenergetic analysis of buildings. The work uses Revit Dynamo as an algorithmic design tool to generate automated 3D volumetry for office buildings and compares this model between BIM-CAD-BEM and BIM-BEM interoperability. The first process tests CAD system with STL and DWG files exported to SketchUp and converted to Euclid for energy computer simulation and later verified in EnergyPlus. The second process exports the BIM model generated by conceptual mass and building elements generated in Dynamo and Revit directly to Insight 360 and then exports them to EnergyPlus. A comparative analysis is then made to the models generated in CAD and BIM. The results validate for a more accurate interoperability in the proposal between the BIM and BEM models, because CAD files do not support energy settings. The proposed algorithm design automation for 3D volume generation for BIM and simulation is feasible, but it is still limited by the integration between the programs.

Keywords: Parametric Modeling, Computational Thermo-Energetic Simulation, Computational Design, BIM, Interoperability.

Lista de figuras

Figura 1 – Árvore de decisões para um projeto a partir de critérios.	17
Figura 2 – Influência das decisões sobre os custos de uma edificação.	23
Figura 3 - a) Croqui, b) modelo paramétrico no software CATIA, c) construção e d) operação do Museu Guggenheim de Bilbao.	27
Figura 4 – Curva de MacLeamy.	28
Figura 5 - Pontos de Adoção e Maturidade BIM.....	30
Figura 6 – Panorama histórico da eficiência energética em edificações no Brasil. ...	32
Figura 7 - Visualização do Insight 360.	36
Figura 8 - Processo de otimização baseada em simulação.	38
Figura 9 - Programas de simulação utilizados em OBS.	39
Figura 10 – Diagrama-resumo do método da pesquisa.	44
Figura 11– Localização do lote urbano para modelagem.....	46
Figura 12 – Imagem do Dynamo sendo utilizado simultaneamente ao Revit.	48
Figura 13 - Processos organizados na programação computacional via design algorítmico.....	49
Figura 14 – Fluxograma de modelagem entre BIM e simulação computacional.	50
Figura 15 – Configuração do modelo para análise energética.	51
Figura 16 – Configurações avançadas do modelo de massa conceitual para análise energética.	52
Figura 17 – Horários de operação da edificação do modelo 12/5 Facility do Revit. ...	54
Figura 18 – Exportação do Dynamo para o formato STL.	58
Figura 19 – Formatos de arquivo de importação no SketchUp.	58
Figura 20 – Configurações de importação de arquivo STL no SketchUp.....	59
Figura 21 – Modelo BEM no Euclid.	60
Figura 22 – Modelo BEM preparado para simulação.	63
Figura 23 – Exportação do Insight para o EnergyPlus.	63
Figura 24 – Modelo BEM de exportação por massa conceitual (a) e exportação por elementos construtivos (b).	65
Figura 25 – Caixa de diálogo <i>Location</i> com o endereço do lote estudado.	68
Figura 26 – Conversão de elemento topográfico em elementos geométricos e criação de índices urbanísticos.....	69
Figura 27 – Árvore de nós final do Dynamo.	70

Figura 29 – Modelo representado em Revit, porém invisível à edição.	71
Figura 29 – Erro do arquivo SAT na tentativa de ser utilizado como modelo de massa conceitual no Revit.	72
Figura 30 – Volume de massa conceitual gerado manualmente sobre o modelo referencial CAD 3D.	72
Figura 31 – Volume de elementos construtivos gerados de forma automatizada.	73
Figura 33 – Caracterização de paredes no Revit após geração pelo Dynamo com centro de parede no eixo das linhas de referência (azul).	74
Figura 33 – Famílias de paredes no Revit (a) e opções de paredes na janela suspensa do Dynamo (b).	75
Figura 34 – Distorções de dimensões da geometria do a) Dynamo (visualização em Revit) para o b) Sketchup via exportação em STL.	76
Figura 35 – Modelo em processo de ajustes após abertura de arquivo salvo.	77
Figura 36 – Ajuste de geolocalização do modelo em SketchUp.	77
Figura 37 – Ajuste de cargas térmicas no modelo.	78
Figura 38 – Erro de informação em <i>Site:Location</i> do EnergyPlus após o arquivo IDF ser gerado.	79
Figura 39 – Resultado da simulação do modelo STL.	80
Figura 40 – Modelo DWG importado no SketchUp sem janelas.	81
Figura 41 – Propriedades dos materiais utilizados no Revit.	83
Figura 43 – Conversão da versão 8.5.0 para 8.7.0 do arquivo do EnergyPlus.	84
Figura 44 – Temperatura das zonas do modelo por massa conceitual.	85
Figura 44 – Modelo por elementos construtivos aberto no Euclid.	86
Figura 45 – Detalhe das faces de aberturas do modelo BEM no Euclid.	87
Figura 46 – Diferença do resultado de geometrias em modelo BEM a partir dos modelos de massa conceitual (a) e de elementos construtivos (b).	89
Figura 47 – Fluxograma das alternativas pesquisadas entre design algorítmico, BIM, CAD e BEM.	96

Lista de tabelas

Tabela 1 - Comparação entre programas de simulação computacional.	34
Tabela 2 – <i>Hardware</i> utilizado para o desenvolvimento da pesquisa.....	42
Tabela 3 – <i>Softwares</i> utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.	43
Tabela 4 – Informações do empreendimento para modelagem.	46
Tabela 5 – Forma de ocupação em edifícios de escritório segundo padrões da ASHRAE 140.....	52
Tabela 6 – Materiais utilizados nas simulações.	56
Tabela 7 – Elementos construtivos utilizados nas simulações.....	56
Tabela 8 – Propriedades das janelas.	57
Tabela 9 – Resumo dos modelos geométricos.	91
Tabela 10 – Resumo de modelagem para configurações de simulação.	94

Lista de algoritmos

Algoritmo 1– Proposta de inserção de propriedades térmicas para janelas no arquivo <i>Constructions.xml</i> no diretório de instalação do Revit.....	95
---	----

Lista de abreviaturas e siglas

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
3DS	3D Studio Max (formato de arquivo)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AECO	Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação
AQUA-HQE	Alta Qualidade Ambiental
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BEM	<i>Building Energy Modeling</i>
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
DAE	<i>Digital Asset Exchange</i> (formato de arquivo)
DDF	Data Definition Format (formato de arquivo)
DEM	<i>Digital Elevation Model</i> (formato de arquivo)
DWG	Abreviação de <i>Drawing</i> (formato de arquivo)
DXF	<i>Drawing Exchange Format</i> (formato de arquivo)
DOE	<i>United States Department Of Energy</i>
DYN	Dynamo (formato de arquivo)
ENCAC	Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
ENTAC	Encontro Nacional da Tecnologia no Ambiente Construído
EPW	<i>EnergyPlus Weather</i> (formato de arquivo)
HVAC	<i>Heat, Ventilation and Air Conditionair</i>
IBPSA	<i>International Building Performance Simulation Association</i>
IDF	<i>Energy Plus Input Data File</i> (formato de arquivo)
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i> (formato de arquivo)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
OBS	Otimização Baseada em Simulação
PAF	Percentual de Abertura na Fachada
PBD	Projeto Baseado em Desempenho

PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RTQ-C	RTQ-C - Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
RVT	Revit (formato de arquivo)
SAT	<i>Standard ACIS Text</i> (formato de arquivo)
STL	<i>Stereolithography</i> (formato de arquivo)
XML	<i>eXtensible Markup Language</i> (formato de arquivo)

Sumário

1	Introdução	16
1.1	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>20</i>
1.1.1	Objetivos específicos	20
1.2	<i>Estrutura do trabalho</i>	<i>20</i>
2	Revisão Bibliográfica	22
2.1	<i>A computação no projeto de edificações.....</i>	<i>22</i>
2.1.1	Design computacional nas etapas iniciais de projeto	23
2.1.2	Modelagem paramétrica e BIM	26
2.2	<i>Eficiência energética em edificações.....</i>	<i>31</i>
2.2.1	Simulação termoenergética computacional.....	33
2.2.2	Otimização baseada em simulação (OBS).....	37
2.3	<i>Considerações finais da revisão bibliográfica.....</i>	<i>40</i>
3	Método	42
3.1	<i>Fluxo de processos para geração automatizada do modelo 3D</i>	<i>43</i>
3.2	<i>Informações de entrada para a edificação.....</i>	<i>45</i>
3.2.1	Estudo de caso – edificação na Av. Faria Lima.....	45
3.3	<i>Aplicação de design algorítmico</i>	<i>47</i>
3.3.1	Revit Dynamo	48
3.4	<i>Simulação computacional</i>	<i>49</i>
3.4.1	Simulação pelo Euclid.....	57
3.4.2	Simulação pelo Insight.....	61
3.5	<i>Comparativo entre os modelos</i>	<i>65</i>
3.5.1	Geometria	66
3.5.2	Configuração de simulação.....	66
4	Resultados	67
4.1	<i>Modelo 3D automatizado via design algorítmico.....</i>	<i>67</i>
4.1.1	Modelo por massa conceitual	70
4.1.2	Modelo por elementos construtivos	73
4.2	<i>Análise dos modelos pelo Euclid</i>	<i>75</i>
4.2.1	Modelo STL.....	75

4.2.2	Modelo DWG	80
4.2.3	Considerações finais da modelagem STL e DWG.....	81
4.3	<i>Análise dos modelos pelo Insight</i>	82
4.3.1	Modelo por massa conceitual	83
4.3.2	Modelo por elementos construtivos	85
4.3.3	Considerações finais da modelagem por massa conceitual e por elementos construtivos.....	88
4.4	<i>Comparativo entre os modelos</i>	90
4.4.1	Geometria	90
4.4.2	Configurações de simulação.....	92
4.5	<i>Análises gerais</i>	94
5	Conclusões	97
5.1	<i>Sugestões para trabalhos futuros</i>	98
	Referências	100

1 Introdução

O trabalho na arquitetura sempre se baseou em processos e raciocínios lógicos, seguindo um fluxo de informações para solucionar questões referentes ao habitat humano. Desde sempre, planejar uma construção foi sinônimo de desenhar, raciocinar, formar um prospecto cognitivo entre o imaginário da obra e a sua realização.

Com o decorrer do tempo, o ofício do arquiteto buscou aptidão em ferramentas e métodos que lhe oferecessem mais precisão e eficiência para elaboração dos imaginários de suas obras. Esses imaginários, representados por desenhos, diagramas, cálculos e textos, foram evoluindo até a idade moderna, sendo realizados através da experiência, intuição e conhecimento acumulados pela história da civilização humana. Na revolução industrial, máquinas foram desenvolvidas para dar suporte ao trabalho de projetistas, inicialmente para produzir ferramentas para representação gráfica manual e fotocopiadoras de documentos e, posteriormente, computadores, para desenvolver cálculos matemáticos avançados e programas como auxílio para desenhos de projetos.

A partir da década de 1960 iniciou-se o desenvolvimento de métodos de incorporação da computação no trabalho do arquiteto, buscando tornar o processo de projeto mais eficiente. Os computadores passaram a ser utilizados em quase todas as fases do processo de projeto em arquitetura, engenharia civil e desenho industrial, tornando o setor extremamente dependente dos sistemas CAD (*Computer Aided Design*). Entretanto, a influência do uso desses programas nas fases iniciais de projeto, especialmente na arquitetura, ainda é pouco explorada. A grande maioria dos arquitetos continua utilizando métodos tradicionais para a geração da forma, partindo em geral de fluxogramas, e utilizando o computador simplesmente como suporte, sem aproveitar seu grande potencial para a realização de tarefas repetitivas na geração de alternativas. Os novos sistemas de modelagem paramétrica têm revolucionado essa fase do trabalho, mas ainda obrigam o arquiteto a se adaptar aos métodos e metáforas escolhidos por seus programadores, reduzindo sua liberdade de criação (CELANI; MITCHELL, 2008).

São nas fases iniciais de projetos de edificações que arquitetos exploram diversos métodos para concepção de desenho. Na grande maioria dos casos, o desenho a mão livre é a principal forma de criação. Através de lapiseiras, lápis e

canetas, desenvolvem-se croquis de plantas e perspectivas sobre um papel a partir de um espaço físico-territorial conhecido, muitas vezes representado por curvas de nível topográficas e linhas limítrofes do terreno já impressos em uma folha como base para criação. Alguns escritórios também elaboram maquetes físicas conceituais de forma manual, normalmente a partir de materiais simples como isopor, madeira e derivados do papel. Quando se discute criação a partir do computador, é comum o uso de programas CAD em duas ou três dimensões e ferramentas de modelagem BIM (*Building Information Modeling*), porém o método de concepção de projeto é praticamente igual: iterações entre modelos e análises de forma manual até o aperfeiçoamento da proposta arquitetônica.

No entanto, as soluções encontradas para os desafios em cada projeto são infinitas, havendo um profundo trabalho intelectual nas diversas – porém limitadas – propostas de desenho. A tomada de decisão para cada diferente traço do projeto abre possibilidade para mais infinitas formas no caminho escolhido. Esse trajeto escolhido a cada decisão, forma um fluxo de informações que poderia ser totalmente distinto caso qualquer decisão anterior tivesse sido diferente. Possivelmente, entre tantas variáveis, alguma decisão distinta em alguma etapa poderia ter sido melhor para o resultado global do projeto, seja qual for seu principal objetivo a ser atendido (Figura 1).

Figura 1 – Árvore de decisões para um projeto a partir de critérios.

Fonte: elaborado pelo autor.

Dessa forma, o projetista perde a oportunidade na escolha por desenhos mais eficientes, pois mesmo com grande experiência e alto grau de intuição, ainda existiriam infinitas possibilidades distintas frente à decisão tomada. Mas abrir o leque de possibilidades para cada decisão levaria muito tempo, a ponto de poder trabalhar uma vida inteira sobre um mesmo projeto. Esse método de trabalho seria inviável tanto se fosse realizado através do desenho à mão livre como pelos métodos tradicionais por desenho assistido por computador, pois a apresentação de inúmeras propostas com a tomada de decisão entre inúmeras variáveis ainda estaria limitada a tarefas numéricas repetitivas e exaustivas por parte de um ser humano.

A discussão, logo, está na utilização da computação para trabalhar essas inúmeras possibilidades de concepção de projeto. Independente da experiência do projetista, ter o domínio de uma ferramenta que lhe apresente a visão das diversas soluções sobre um mesmo desafio de projeto é de grande valia, pois torna o profissional responsável mais próspero ao principal critério estabelecido no projeto.

Paralelamente, com a necessidade cada vez maior de projetar edificações de alto desempenho, a precisão sobre estratégias de eficiência energética tem ganhado destaque no processo de projeto. Uma das barreiras para esse desenvolvimento está na dificuldade devida à complexidade de atender diversos critérios em um mesmo projeto. Ao otimizar um critério, reduz-se a eficiência de outro, formando um cenário de múltiplas soluções, porém de limitadas escolhas satisfatórias. As ferramentas computacionais surgem como meio de auxiliar nessa resolução de conflitos, entretanto, exigem domínio por parte de seus usuários.

Os arquitetos, por sua vez, têm recebido orientação para solucionarem esses desafios como atores das etapas iniciais na concepção da forma junto ao atendimento das funções das edificações. Eles são, portanto, agentes do processo de concepção de edificações e devem ter domínio de ferramentas computacionais para atender esses objetivos. Contudo, essas ferramentas utilizadas para quantificar o impacto das edificações costumam não ter interfaces amigáveis e os métodos para concepção de soluções arquitetônicas satisfatórias se tornam complexos, dificultando o profissional de realizar essas tarefas.

As companhias de *software*, ao enxergarem as necessidades dos arquitetos, têm desenvolvido ferramentas de modelagem paramétrica para desenho e análise intuitiva de projetos. A Autodesk vem realizando esforços com o desenvolvimento do Formit, Insight 360 e Dynamo, ferramentas de auxílio à modelagem BIM do Revit

(AUTODESK INC., 2018a, 2018b). A Graphisoft, através de parcerias com outras companhias, vem utilizando o Rhino 3D, o Grasshopper e o Diva for Rhino, além de desenvolver o EcoDesigner Star. A Trimble, desenvolvedora do SketchUp, também tem realizado estudos na elaboração do Sefaira. Estas ferramentas, de forma geral, têm sido criadas para auxiliar arquitetos de forma intuitiva no projeto de edificações sustentáveis.

A lógica da arquitetura, desse modo, torna-se mais eficaz. O uso da computação como ferramenta de fluxos de informações – as decisões e seus conteúdos – tem grande potencial como libertação de criação de formas e funções a serem atingidas. Nas fases iniciais de projeto de edificações, o arquiteto pode instituir objetivos definidos no modelo computacional a partir de um espaço físico-territorial conhecido, gerando inúmeras possibilidades de formas dentro do escopo estabelecido.

As certificações e etiquetas podem ser, desse modo, mais acessíveis e propensas a serem utilizadas no setor da construção civil. Aliado a isso, com a sofisticação das ferramentas computacionais de uso intuitivo, em especial as de modelagem paramétrica, pode-se explorar mais soluções de desenho e de modo mais eficiente em comparação à forma convencional, integrando a otimização da forma e dos componentes de edificações (FLORIO, 2012; OXMAN, 2008).

O uso de ferramentas computacionais mais eficientes e intuitivas deve, no entanto, estar acompanhado de formas de análise integrados às certificações e etiquetas. No Brasil, esses processos vêm ganhando relevância, mas na maioria das vezes ainda se diluem em meios fragmentados e de organização complexa, reduzindo, por outro lado, o potencial de uso dos *softwares* de modelagem paramétrica. Urge, desse modo, desenvolver formas de adaptação dessas ferramentas computacionais de modelagem paramétrica às necessidades das certificações e etiquetas locais.

Esta pesquisa propõe, portanto, desenvolver um fluxo de trabalho para gerar modelos paramétricos automatizados que integrem estudos de massa à simulação termoenergética computacional ainda em fases iniciais de projetos. O modelo contempla informações construtivas em BIM aliado ao desempenho termoenergético. Essa implantação pode facilitar a adoção de estratégias de eficiência energética no processo de certificação e etiquetas em edificações.

1.1 *Objetivo geral*

Desenvolver um fluxo de trabalho para geração de um modelo paramétrico a partir de design algorítmico para análise termoenergética de edificações durante a etapa de estudo de viabilidade.

1.1.1 *Objetivos específicos*

- Comparar a simulação termoenergética computacional realizada por modelagem paramétrica à forma em CAD;
- Validar o uso do design algorítmico como ferramenta de produção de volumetrias automatizadas para estudos de empreendimentos em fases iniciais;
- Integrar o design algorítmico à modelagem BEM.

1.2 *Estrutura do trabalho*

O presente trabalho está estruturado com o seguinte roteiro:

O capítulo 1 apresenta a contextualização da pesquisa, seus fundamentos, justificativas e hipóteses a fim de elucidar ao leitor a importância do tema e de seus potenciais resultados para o desenvolvimento de projetos na construção civil. O conceito de BIM e a integração com os preceitos da eficiência energética em edificações são introduzidos, mostrando pontos a serem amadurecidos na modelagem paramétrica como ferramenta de estudos para viabilidade de empreendimentos.

O capítulo 2 – Revisão Bibliográfica – levanta o estado da arte da modelagem paramétrica relacionada à eficiência energética nas etapas iniciais de projetos de edificações.

O capítulo 3 – Método – apresenta a forma desenvolvida para se montar o modelo paramétrico a fim de atender o objetivo principal da pesquisa. Os programas utilizados, o fluxograma dos processos a serem seguidos e as diretrizes para análise de modelos BEM são apresentados. Logo após subcapítulos são desenvolvidos para explicar os fluxos de trabalho que atendem os objetivos específicos da pesquisa.

O capítulo 4 – Resultados – esclarece com detalhes os frutos decorridos da pesquisa e as implicações surgidas na aplicação do método.

O capítulo 5 – Considerações finais – avalia o percurso do trabalho realizado, relacionando os objetivos aos resultados. Comenta-se ao final as oportunidades de pesquisas futuras que podem ser executadas.

2 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica deste trabalho analisou o estado da arte da temática de design computacional aplicado à eficiência energética em edificações. A pesquisa para a revisão explorou referências nacionais e internacionais, sendo a grande maioria desenvolvida nos últimos dez anos.

A revisão se inicia com a introdução do uso da computação nos processos de projeto de edificações, apresentando suas aplicações e as lacunas apontadas por pesquisas. A relevância do design computacional é apresentada como forte potencial de uso para arquitetos nas etapas iniciais de projeto, onde tarefas repetitivas e exaustivas ainda são realizadas manualmente, seja à mão livre ou com o computador como ferramenta de representação gráfica.

A seguir, a revisão explica o conceito de modelagem paramétrica e BIM e suas diferenças com relação ao conceito de CAD. A evolução dos processos computacionais através da parametrização de informações é esclarecida para a compreensão posterior do uso dessas ferramentas nesta pesquisa.

Na análise de desempenho termoenergético, são revisados estudos referentes à eficiência energética em edificações, simulação computacional e otimização baseada em simulação. Esses temas são fundamentais como ferramentas para o método a ser instituído no capítulo seguinte.

2.1 A computação no projeto de edificações

O campo da construção civil sofreu grandes alterações durante o século XX com técnicas modernas de construção, utilizando o concreto armado, o aço e o vidro. Mas, além do canteiro de obras, os ambientes de projeção de edificações também mudaram seus rumos, especialmente a partir da segunda metade do século XX com o surgimento da computação aplicada a esse setor.

Nos projetos de edificações, o uso do computador como ferramenta de desenho surgiu durante a década de 1960 com o termo *computational design*. Esse termo, em português design computacional, é a aplicação de estratégias computacionais ao processo de projeto. Enquanto projetistas tradicionalmente resolvem problemas lógicos de desenho através da intuição e experiência, o design computacional procura

melhorar esses processos pela codificação de decisões de desenho usando uma linguagem computacional (CELANI; MITCHELL, 2008; KILKELLY, 2016).

2.1.1 Design computacional nas etapas iniciais de projeto

Os custos de empreendimentos imobiliários aumentam à medida que as etapas do seu escopo avançam assim como as decisões sobre a forma final do empreendimento diminuem em ritmo parecido. Isso indica que são nas decisões iniciais que se preveem a maior parte dos custos da obra (Figura 2). Logo, é no traço da arquitetura que se define o grande peso orçamentário de um empreendimento ou, como simplifica Mascaró (2010), “a cada traço um custo”.

Figura 2 – Influência das decisões sobre os custos de uma edificação.

Fonte: Melhado et al (2005).

Dentro da composição dos custos para produção de edificações, em torno de 70% se destina aos planos horizontais e verticais, 25% às instalações prediais e 5% ao canteiro de obras. Dos 70% de planos horizontais e verticais – paredes, esquadrias e estrutura – 25% representam planos horizontais, onde arquitetos e engenheiros têm pouca influência sobre os custos, que são formados basicamente pelas lajes em concreto armado, contrapisos e acabamentos, com exceção da cobertura que possui maior custo e mais possibilidades de interferências. Os 45% restantes são dedicados

aos planos verticais onde, ao contrário, apresentam inúmeras alternativas tanto para desenho quanto para especificação de materiais. Nesses planos verticais, os custos se dividem próximo de 30% a 50% nos planos externos e 50% a 70% nos planos internos (CSTB, 1970 apud MASCARÓ, 2010). Essa lógica conduz à conclusão de que são nos esboços iniciais do envoltório do edifício (fachadas e cobertura) que se definem em torno de 30% do custo total de produção de um empreendimento. Se ainda forem consideradas as divisões internas através de estudos de layout, o custo acumulado por responsabilidade de quem desenha o envoltório e as plantas da edificação fica em torno de 45%.

É também no envoltório que se destina grande parte da participação do desempenho termoenergético nas edificações. Contudo, existe um contrassenso entre a tentativa de reduzir o consumo energético das edificações enquanto os materiais comumente utilizados para melhor desempenho custam mais. Apesar dos benefícios de um desempenho otimizado no custo de operação de edifícios a longo prazo, é comum empreendedores buscarem a redução da qualidade dos materiais para alcançarem um determinado valor máximo de custos. Poucos se voltam para os custos que o desenho da edificação representa, principalmente na relação das formas geométricas dos edifícios, definidas logo no início da etapa conceitual de projeto – estudo de viabilidade e estudo preliminar.

Entre projetistas, é amplamente aceito que as decisões de projeto durante as etapas iniciais têm grande impacto final no desempenho das edificações. Em uma pesquisa de Guillemín e Morel (2001), foram realizados questionários em 67 edifícios e descobriu-se que 57% das decisões tecnológicas foram feitas na fase de projeto conceitual, em comparação com apenas 13% no estágio de projeto detalhado.

Desse modo, diversos objetivos quantitativos se conflitam simultaneamente ao longo do desenvolvimento de projetos. No início, a simples decisão de desenhar a forma de um edifício de base retangular para um edifício de base quadrada altera significativamente os custos de construção e operação, de forma que de uma proposta para outra pode haver uma relação totalmente diferente de pesos entre variáveis de análise. Realizar essas análises através de modelos computacionais não parametrizados é limitante e exaustivo. Por isso, é fundamental buscar o inter-relacionamento entre as variáveis de modo eficiente e com poucos limitantes no processo de criação que dificultem o encontro de uma solução satisfatória aos objetivos propostos.

A busca cada vez maior de edificações de alto desempenho termoenergético para sustentabilidade e a precisão dos custos relacionados a estas variáveis e outras já acumuladas da construção civil tem feito com que a computação ganhe mais relevância nas etapas iniciais de projeto. Arquitetos, que possuem grande responsabilidade pelo desempenho termoenergético devido ao desenho do envoltório das edificações, têm recebido mais exigências para o desenvolvimento de meios que os auxiliem de forma mais precisa sobre os resultados de projetos. Essas novas formas de projeto baseado em desempenho por meio do design computacional sofrem resistência por parte da categoria profissional. Ainda se enxerga a concepção de formas através de desenhos à mão livre e por desenhos assistidos por computador (CAD) sem parametrização como forma mais aplicável à realidade da construção civil, inclusive em projetos de alta complexidade.

Por ora, muitos arquitetos permanecem comprometidos com a forma convencional de projeto baseado em desempenho que é, em essência, uma abordagem envolvendo alguns princípios, baseados principalmente na forma e na função. A direção a que se foca o arquiteto é a combinação entre racionalidade e sensibilidade. Quando os critérios de desempenho são conhecidos, este modo de projeto enfrenta desafios sem precedentes, encontrando os três enunciados a seguir (SHI; YANG, 2013):

1. O modelo computacional do projeto arquitetônico é desenvolvido em um programa enquanto o modelo para simulação de desempenho é analisado em outro;
2. Muitos parâmetros não geométricos do modelo do projeto arquitetônico têm que ser novamente definidos no simulador;
3. Os modelos computacionais para simulação de desempenho simplificam a forma arquitetônica e resultam por empobrecer detalhes e a estética do projeto.

Esses problemas são complexos, pois envolvem transferências de informações computacionais entre diferentes programas, acarretando num esforço exaustivo quando realizados manualmente. Entretanto, nos últimos anos, novas abordagens têm mudado a realidade desses meios que utilizam o esforço manual para uma integração inteligente entre os programas, onde arquitetos possam utilizar efetivamente o design computacional como ferramenta de criação de inúmeras

propostas, desenhando e analisando através de algoritmos as variáveis das edificações.

A decisão continua sendo tomada pelo profissional projetista assim como a ideia da concepção. A computação, nesse caso, apenas amplia de forma mais rápida e eficiente as diversas propostas iniciais de projeto, incluindo resultados de desempenho automatizados a cada versão desenhada.

2.1.2 Modelagem paramétrica e BIM

A plataforma de desenho assistido por computador (*Computer Aided Design – CAD*) surgiu durante a década de 1960 junto às primeiras pesquisas de design computacional. O desenvolvimento de representações 3D tinha muito potencial para aplicação em filmes, projetos de arquitetura e engenharia e jogos (EASTMAN et al., 2011).

Como definição, o CAD é o uso de sistemas computacionais para auxiliar na criação, modificação, análise ou otimização de um desenho (NARAYAN; MALLIKARJUNA; SARCAR, 2008). Nas áreas de AECO, o CAD se tornou popular a partir da criação dos computadores pessoais (*Personal Computers – PC's*), fazendo com que do final dos anos de 1980 para a década de 1990 essa plataforma fosse utilizada em quase todos os projetos do setor.

Paralelamente, durante a década de 1980 as pesquisas em CAD trouxeram novos atributos aos desenhos além das coordenadas geométricas utilizadas até então. Na programação desses desenhos, foram atribuídas regras e parâmetros que determinavam a sua geometria assim como algumas propriedades e recursos não-geométricos, surgindo a modelagem paramétrica baseada em objetos (EASTMAN et al., 2011).

O conceito de modelagem paramétrica foi desenvolvido inicialmente para a indústria mecânica. Posteriormente, as ferramentas computacionais de desenvolvimento de modelos paramétricos foram adaptadas para a construção civil, surgindo a modelagem da informação da construção – *Building Information Modeling (BIM)*.

Um episódio bastante lembrado dessa transição da tecnologia CAD para o BIM ocorreu no início da década de 1990, quando na época o escritório do arquiteto Frank Gehry estava projetando o Museu Guggenheim de Bilbao. O início do processo criativo

ocorreu de maneira convencional, por meio de desenhos como plantas, cortes e elevações, e de um modelo físico que, inclusive, serviu de base para a digitalização do modelo desenvolvido no software CATIA (atualmente o Digital Project da Gehry Technologies, adquirida pela Trimble) uma ferramenta de modelagem paramétrica para construção civil. A partir do modelo digital, um protótipo físico foi gerado para validação com o modelo físico original e, após a verificação de que as informações digitais estavam precisas, o modelo digital passou a ser a referência para o desenvolvimento do projeto completo. Toda a estrutura da edificação, elaborada sob uma plataforma BIM, pôde ser construída 18% abaixo do orçado, sendo que nenhum dos elementos estruturais que sustentava o complexo de 24 mil metros quadrados eram iguais (LINDSEY, 2001). A partir do exemplo de Bilbao, pôde-se afirmar que o modelo central digital representativo era um elemento primordial na viabilização de projetos complexos, o que configurou um excelente exemplo da incorporação de plataformas BIM para uma nova prática construtiva (Figura 3).

Figura 3 - a) Croqui, b) modelo paramétrico no software CATIA, c) construção e d) operação do Museu Guggenheim de Bilbao.

Fonte: a) Guggenheim Bilbao Museoa (2018a); b) Zeballos (2012); c) Guggenheim Bilbao Museoa (2018b); d) Guggenheim Bilbao Museoa (2018).

Atualmente, o BIM é uma expressão relevante da indústria da construção civil, um conjunto de tecnologias, processos e políticas na AECO (SUCCAR; KASSEM, 2015). A principal diferença entre a plataforma BIM e CAD é que os desenhos em CAD

são apenas entidades gráficas, como linhas, arcos e círculos, com pouco ou nenhum suporte de dados integrados ao modelo e análise de projeto, em contraste com a semântica contextual inteligente dos modelos BIM, onde os objetos são definidos em termos de elementos de construção e sistemas como espaços, paredes, vigas e pilares (CRC CONSTRUCTION INNOVATION, 2017; EASTMAN et al., 2011).

No processo de projeto, as etapas avançadas de desenvolvimento de projeto – compatibilização, projeto executivo e detalhamentos – costumam ter peso maior no tempo e valor dos contratos de arquitetura e engenharia. Entretanto, devido à capacidade de automatizar formas padrão de detalhamento, o BIM reduz significativamente o tempo necessário para a produção de documentos para a construção. A Figura 4 ilustra a relação geral entre o esforço de projeto e o tempo, indicando como o esforço é tradicionalmente distribuído (linha 3) e como ele pode ser redigitado como resultado do BIM (linha 4). Esta revisão alinha o esforço mais estreitamente com o valor das decisões iniciais tomadas durante o processo de projeto (linha 1) e o crescimento no custo de fazer mudanças da construção ao longo da vida útil do projeto (linha 2). O gráfico enfatiza o impacto das decisões iniciais de projeto sobre a funcionalidade, os custos e os benefícios gerais de um empreendimento. A tendência é haver uma redução no esforço produzido para gerar as documentações finais para a execução da obra e aumentar a relevância das decisões tomadas nas etapas iniciais de projeto, o que traz alterações à forma de entrega e contratação (EASTMAN et al., 2011).

Figura 4 – Curva de MacLeamy.

Fonte: adaptado de Young (2017).

Apesar dos benefícios do BIM, a adaptação de empresas de projeto na transição do CAD para o BIM ocorre de forma gradual. Inicialmente, escritórios de arquitetura utilizam o BIM para compatibilização, projeto executivo e detalhamentos, trabalhando as etapas iniciais de forma convencional, em CAD e croquis (CORNETET; FLORIO, 2015). Os estudos de Coelho et al (2015) apontaram que na implementação do BIM em empresas de arquitetura, o uso simultâneo da plataforma BIM e CAD deve ser previsto, pois a mudança é progressiva, envolvendo diversas transformações no processo de projeto e constantes capacitações da equipe.

O desenvolvimento de transição de plataformas é definido como Maturidade BIM, um processo que possui três fases de implementação: a prontidão, a capacidade e a maturidade – representados no modelo de Ponto de Adoção (PoA) (Figura 5). Um PoA é um termo que identifica a(s) junção(ões) onde a prontidão organizacional se transforma em capacidade/maturidade organizacional. A adoção do BIM transformador começa no Ponto de Adoção (PoA) quando uma organização, após um período de planejamento e preparação (prontidão), adota ferramentas de modelagem baseadas em objetos e fluxos de trabalho. O PoA marca assim o salto de capacidade inicial de nenhuma habilidade BIM (status pré-BIM, fase CAD) para a capacidade BIM mínima (Fase 1). À medida que o adotante interage com outros adotantes, um segundo salto de capacidade (Fase 2) marca a habilidade da organização para participar com sucesso de uma colaboração baseada em modelo. Posteriormente, quando a organização começa a se envolver com diversas partes interessadas em toda a cadeia produtiva, um terceiro salto de capacidade (Fase 3) é necessário para se beneficiar de ferramentas, processos e protocolos integrados em rede. Cada um desses saltos de capacidade é precedido de um investimento considerável em recursos humanos e físicos, e cada fase sinaliza novas habilidades organizacionais e formas de entregas não disponíveis antes do salto. No entanto, os entregáveis de diferentes organizações no mesmo estágio variam em qualidade, repetitividade e previsibilidade. Essa variação na excelência de desempenho ocorre quando as organizações escalam suas respectivas curvas de maturidade BIM, experimentam sua difusão BIM interna e melhoram gradualmente seu desempenho ao longo do tempo (SUCCAR; KASSEM, 2015).

Figura 5 - Pontos de Adoção e Maturidade BIM.

Fonte: Succar; Kassem (2015).

A modelagem paramétrica e o BIM têm realizado um considerável avanço no processo de produção de empreendimentos na construção civil. Ao que aponta, trazer os esforços de projeto para as etapas iniciais condiz com um impacto maior nos custos e desempenho das edificações. Nessa linha de raciocínio, conforme já apontado durante essa revisão, desenvolver edificações sustentáveis está conectado intrinsecamente às fases mais preliminares de projeto, onde os traços de desenhos definem o custo de geometrias das edificações e as estratégias em eficiência energética, antecipando a influência e a responsabilidade do arquiteto para o sucesso dos empreendimentos.

2.2 *Eficiência energética em edificações*

O crescimento do consumo de energia no mundo no século XX colocou em xeque os investimentos nas fontes e modos de produção de energia. Desde a crise do petróleo na década de 1970, diversos países têm adotado estratégias sobre as fontes de produção de energia assim como medidas de redução de consumo sem prejudicar o crescimento da economia. Duas estratégias têm sido veiculadas como canais de transformação para a crise. A primeira estratégia está vinculada à geração de energias por fontes renováveis enquanto a segunda à eficiência de equipamentos no consumo de energia.

Durante as décadas seguintes esse cenário gerou um aglomerado de pesquisas e desenvolvimentos de tecnologias visando práticas mais inteligentes de produção e consumo de energia. Um dos principais desafios tem sido o setor da construção civil, que consome em torno de 50% da energia elétrica e de 20% a 40% da energia primária no mundo (PÉREZ-LOMBARD; ORTIZ; POUT, 2008). Logo, políticas têm sido desenvolvidas para alavancar o setor da construção no compromisso do uso racional de energia e, mais recentemente, na produção também.

No Brasil, políticas de eficiência energética surgiram em 1985 com a criação do Procel - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - (PROCEL, 2017). Porém, o impulso maior à pesquisa e ao desenvolvimento na área se deram efetivamente após a crise energética brasileira em 2001, que ficou conhecida como “apagão” (CUOLO, 2002; PINTO, 2002).

As pesquisas de eficiência energética em edificações no Brasil ocorreram por parte do governo federal, de organismos de inspeção e laboratórios de diversas universidades do país. O estabelecimento de leis, normativas e regulamentos foram essenciais e ocorreram ao longo da década de 2000, com destaque para a NBR 15.220 (ABNT, 2003), a NBR 15.575 (ABNT, 2008) e a formação de comitês, fundações e conselhos para esses fins específicos (SOUZA et al., 2009), mesmo que não relacionados diretamente com o poder público.

A primeira década após o apagão foi voltada principalmente à pesquisa de meios para redução de consumo de energia em equipamentos e edificações. Os desafios estavam principalmente relacionados em como regulamentar todo o processo de etiquetagem em edificações, algo ainda inédito no Brasil. Após o processo de formação e organização desses grupos, iniciou-se a aplicação e alguns

testes pilotos de projetos especiais, normalmente edifícios públicos institucionais parceiros das pesquisas (LAMBERTS et al., 2010; REIS, 2014). A partir de 2009 o Procel Edifica foi aberto ao processo de etiquetagem que, mesmo posterior à vinda de certificações estrangeiras como o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) e o AQUA-HQE (Alta Qualidade Ambiental), desempenhou um papel fundamental às estratégias de otimização do consumo de energia em edificações.

Congressos, fóruns, feiras e simpósios foram importantes para a discussão do tema em toda a cadeia da construção civil. Entre eles eventos como o ENCAC (Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído), o ENTAC (Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído), o GBC Brasil (Green Building Council Brasil) e o SBCS (Simpósio Brasileiro de Construção Sustentável). Com o amadurecimento do mercado, aumentou-se o número de etiquetas e certificações, tendo em 2016 mais de 140 emissões de etiquetas para edifícios comerciais pelo Procel Edifica, mais de 170 pelo AQUA e mais de 380 pelo LEED. Desse modo, pôde-se ver em quinze anos uma evolução no setor, apesar de que ainda muito discreta se comparada com o montante total de edificações no país (Figura 6).

Figura 6 – Panorama histórico da eficiência energética em edificações no Brasil.

Fonte: elaborado pelo autor.

Nesse meio, o design computacional ganhou novas perspectivas. Com a necessidade de medir os impactos das construções, empresas de arquitetura e engenharia se aprimoraram com a incorporação da simulação computacional para

eficiência energética. Outras, a maior parte dos casos, realizaram parcerias com empresas de consultoria em eficiência energética e simulação. O desafio, porém, estava em solidificar as estratégias de eficiência energética nas etapas iniciais de projeto, o que inicialmente não ocorreu, da mesma forma como a incorporação do BIM. Desse modo, compreender o processo de projeto a partir da simulação termoenergética computacional é essencial para avaliar as formas de implantação de projetos de edificações sustentáveis em empreendimentos.

2.2.1 Simulação termoenergética computacional

Esforços em pesquisa e desenvolvimento têm surgido para ajudar a reduzir os danos ambientais causados pela construção civil. O desenvolvimento de certificações e etiquetas ambientais e energéticas tem se dirigido a métodos quantitativos para análise de projetos de edificações. Desse modo, projetar um edifício sustentável transformou-se em sinônimo de quantificar seu impacto. A simulação computacional tem permitido avaliar a quantidade desses impactos nos projetos, envolvendo modelagem termoenergética e solar e aperfeiçoamento da geometria, materiais, controles e sistemas dos edifícios (CLARKE, 2001).

A simulação termoenergética computacional pode ser definida como um modelo matemático construído para representar cada possível fluxo de energia e suas interações. Neste sentido, a simulação é uma tentativa de imitar a realidade (CLARKE, 2001).

Segundo relatório de ferramentas computacionais dedicadas à análise termoenergética em edificações do IBPSA USA (2018), atualmente existem 172 programas entre avaliadores globais de energia, ar condicionado, acústica, iluminação, sistemas elétricos, geração de energia, qualidade do ar e uso de água. O grande desafio nesse contexto é a aplicação massiva dentro dos processos de etiquetagens e certificações, especialmente nas fases iniciais de concepção de projeto das edificações.

A elaboração de interfaces simplificadas é imprescindível para disseminar o uso da simulação nas empresas (MENDES et al., 2005). A integração e interoperabilidade entre programas de projeto e simulação também são essenciais, especialmente nas etapas iniciais. Quando não há integração, é comum que em projetos que possuem

modelagem BIM, 50% do tempo seja destinado apenas na recriação da geometria BIM para a modelagem BEM (KRYGIEL; NIES, 2008).

Com a grande diversidade de simuladores atualmente, é necessário realizar análises de requisitos para a escolha correta em cada aplicação. Østergård, Jensen e Maagaard (2016) fizeram uma revisão dos principais programas de simulação (Tabela 1). Nenhuma das ferramentas atendia todos os requisitos propostos na pesquisa que englobavam diversas necessidades atuais da produção de projetos de edificações. O desenvolvimento para permitir configurações que atendam ao pleno potencial de simulações em uma visão holística é fundamental para que se tome decisões nos estágios iniciais do projeto.

Tabela 1 - Comparação entre programas de simulação computacional.

Software	A. Users		B. Design stage				C. Interoperability	D. Core complexity	E. Objectives						F. Parametric sim.					Ref.	
	Architects	Engineers	Conceptual	Preliminary	Detailed	Management			Energy	Thermal	Daylight	Air Quality	LCA	LCC	Cloud	I/O Configurable	UA	SA	OAT		Optimisation
BPS (own engine)	Be10 (ISO 13790 monthly) ²	(A)	E		✓		Standalone	Low	✓	(✓)					✓						[120]
	BSim		E		✓	✓	Standalone	High		✓	✓	✓	✓					(✓)			[121]
	DOE2		E			✓	Standalone	Medium	✓					✓							[110]
	EnergyPlus (E+)		E			✓	Standalone	High	✓	✓		✓			✓						[28]
	EPC (ISO 13790 hourly)	(A)	E	✓	✓		Standalone	Medium	✓					✓							[122]
	ESP-r		E			✓	Standalone	High	✓	✓		✓		✓							[123]
	IDA-ICE		E		✓	✓	File exchange	High	✓	✓	✓	✓		✓				✓	✓		[124]
	iDbuild		E	✓			Standalone	Medium	✓	✓	✓	✓							✓	✓	[125]
	IESVE	(A)	E		✓	✓	✓	File exchange	High	✓	✓	✓	✓	✓	✓						[83]
	Radiance	(A)	E		✓	✓		Standalone	High			✓			✓						[87]
VELUX Daylight Visualizer	A	E	✓	✓	✓		File exchange	High			✓										[126]
BPS (external engine)	A+E3D	A		✓	✓		Integrated	Be10	✓	(✓)	(✓)										[127]
	Daysim	(A)	E		✓	✓	✓	Run-time	Radiance			✓		✓							[86]
	DesignBuilder	(A)	E		✓	✓	✓	File exchange	E+, Radiance, jE+	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓		[128]
	eQuest		E		✓	✓	✓	Standalone	DOE2	✓											[129]
	N++		E	✓	✓	✓	✓	Separated	E+, jE+, GenOpt	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓		[130]
	OpenStudio		E		✓	✓	✓	File exchange	E+, Radiance	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓					[84]
	Riuska		E		✓	✓		File exchange	DOE 2, own engine	✓	✓	✓	✓				✓	✓			[131]
	Sefaira	A		✓	✓		Run-time	E+, Radiance	✓	✓	✓			✓			(✓)	(✓)	✓	✓	[82]
Plug-in	DIVA for Rhino	A	(E)		✓	✓	✓	Run-time	Radiance			✓									[132]
	Green Building Studio	A	(E)		✓	✓		File exchange	DOE2	✓					✓						[78]
	HoneyBee (GH)	A	E		✓	✓	✓	File exchange	OpenStudio, E+, Radiance	✓	✓	✓		✓							[100]
	jEPlus (+ JESS)		E		✓	✓		Run-time	E+, DesignBuilder, N++	✓	✓	✓	✓	✓	✓		(✓)	(✓)	✓	✓	[133]
	Parametric Analysis Tool		E		✓	✓		File exchange	OpenStudio	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	[134]
	Solon	(A)	E		✓	✓		File exchange	Green Building Studio	✓					✓			(✓)	✓		
Glue ¹	Dynamo	A	E		✓	✓		-	-												[98]
	Grasshopper (GH)	A	E		✓	✓		-	-												[97]

Fonte: Østergård; Jensen; Maagaard (2016).

Desenvolvedores vêm realizando esforços para suprir a lacuna relativa à necessidade do uso de simuladores nas etapas iniciais de projeto e à integração aos programas de desenho de edificações, especialmente no âmbito da plataforma BIM. O progresso nesse campo de estudo tem sido realizado em integrar os motores de simulação computacional existentes – como o EnergyPlus, o Radiance e o DOE2 –

aos programas BIM. Desse modo, a necessidade de arquitetos nas etapas iniciais de projeto vem sendo atendidas em relação à eficiência energética do envoltório das edificações, apesar dessas inovações ainda estarem mais próximas de um processo inicial de desenvolvimento do que de um estágio mais avançado e maduro. No entanto, ainda há muitas barreiras a serem superadas para efetivamente estabilizar esse método.

A exemplo desses desenvolvedores, a Graphisoft tem desenvolvido o Ecodesigner Star para o Archicad. Além disso, em parceria com a Rhinoceros, a programação por interface gráfica tem auxiliado arquitetos no desenvolvimento de projetos de alto desempenho através do uso do Grasshopper. Com o Diva for Rhino, integrado ao Grasshopper, pode-se produzir resultados de simulação em uma interface gráfica amigável e de análise simplificada, auxiliando no direcionamento das decisões iniciais de projeto. Contudo, conforme apresentado na Tabela 1, esse uso está aplicado apenas a estudos de iluminação natural e radiação sobre superfícies, pois utiliza somente o motor do Radiance para as análises.

A Autodesk tem investido fortemente na integração de simuladores ao seu programa BIM, o Revit. A cada versão atualizada é possível verificar inovações voltadas principalmente às análises energéticas. Após a descontinuidade do Ecotect em 2015 (AUTODESK SUPPORT, 2016), a Autodesk tem buscado formas de incorporar o processo de simulação internamente ao BIM, evitando o uso convencional de interoperabilidades entre BIM e BEM. Duas dessas ferramentas desenvolvidas são o Formit e o Insight 360 (AUTODESK INC., 2018a, 2018b). O Formit é um aplicativo de modelagem 3D simplificado, semelhante ao SketchUp da Trimble. Entretanto, já possui internamente ferramentas de análise de radiação solar e exportação direta para o Insight. No Insight 360, uma série de análises iniciais são realizadas a partir do modelo 3D do envoltório da edificação desenhada no Formit (que pode vir também do Revit). Baseadas na ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2010), o Insight (Figura 7) analisa o material utilizado na edificação – paredes, aberturas, lajes, coberturas e elementos de proteção solar – o percentual de abertura na fachada (PAF ou *Window Wall Ratio* – *WWR* em inglês), as infiltrações de ar pelas esquadrias, o potencial de geração de energia, o modo de uso e ocupação, as cargas elétricas utilizadas, a eficiência da iluminação artificial e do sistema de condicionamento de ar e a forma de controle da iluminação natural. Essas variáveis podem ser alteradas a fim de chegar a um modelo satisfatório. Do Insight 360 o modelo por ser novamente

modificado de forma simplificada no Formit ou ainda ser utilizado no Revit, onde há parametrizações mais profundas. Entre esses programas há liberdade de interação, pois são todos desenvolvidos pela Autodesk (IBPSA USA, 2015). Essa demanda surgiu após o lançamento do Sefaira, programa de simulação em tempo real aplicado à modelagem 3D do SketchUp e do Revit. Para a Autodesk, a aposta do Formit e do Insight 360 foram uma resposta à carência que o programa BIM possuía em modelagens simplificadas, rápidas e de fácil análise para as etapas iniciais de projetos de edificações (SCHULTZ, 2017).

Figura 7 - Visualização do Insight 360.

Fonte: Autodesk (2017).

A simulação termoenergética computacional tem ganhado novas visões para o projeto de edificações. Os avanços nos motores de simulação continuam sendo enriquecidos por novas exigências como a quantificação das emissões de carbono e as mais diversas formas de geração de energias renováveis. Entretanto, o estudo sobre a aplicação dos simuladores à plataforma BIM tem sido uma das principais evoluções desse campo de pesquisa. Além desses desafios, outros novos têm surgido com a possibilidade que os simuladores trazem das diversas soluções para um mesmo empreendimento. Otimizar as diversas propostas baseando-se nos resultados

das simulações e programar seus desenhos a fim de alçar soluções ótimas é o próximo passo que o design computacional dará nos projetos de edificações.

2.2.2 Otimização baseada em simulação (OBS)

O desenho de edificações baseado no desempenho termoenergético é um processo altamente complexo e de intenso trabalho. Essa complexidade vem do grande número de parâmetros inter-relacionados envolvidos no projeto de construção sustentável como geometria da edificação, layout, materiais, localização, dados meteorológicos, comportamentos de usuários, etc. Existe uma carência de ferramentas computacionais compreensíveis e eficientes para auxiliar arquitetos a explorarem alternativas de desenho e compreenderem seus impactos na construção do desempenho termoenergético. Consequentemente, muitos profissionais decidem desconsiderar o desempenho em seus projetos e, em vez disso, seguem regras genéricas e simplistas, resultando em edificações ineficientes ou ainda buscam ajuda de especialistas em energia para simular alternativas de projetos. Uma vez que a transferência de um modelo arquitetônico para um modelo de energia é um processo demorado e propenso a erros, os arquitetos e especialistas optam por selecionar um número limitado de alternativas de projeto para análise energética, ocasionando em soluções de projeto não otimizadas (ASL et al., 2014).

Devido à complexidade das edificações sustentáveis e à busca do menor custo possível para a implantação de estratégias de eficiência energética, existem muitos processos que possuem objetivos conflitantes. Além disso, as possibilidades de soluções são vastas. A aplicação de métodos computacionais de otimização em projeto para superar esses desafios se torna, consequentemente, vantajosa aos processos (EVINS, 2013).

A teoria da otimização engloba o estudo quantitativo de um ponto ótimo em um processo e métodos para encontrá-lo (GOLDBERG, 1989). Através da otimização baseada na simulação computacional, os objetivos conflitantes dentro do escopo de projetos de edificações sustentáveis podem ser atingidos até o limite de uma determinada harmonia. Estes objetivos são desenhados pelo projetista que lança um modelo inicial a ser testado. O teste é realizado por um programa de simulação que gera resultados numéricos, os quais devem satisfazer os objetivos iniciais propostos e, caso não atingidos, são lançados no programa de otimização que sugere um novo

desenho de projeto visando um modelo computacional mais eficiente para o processo de simulação. A simulação gera novos resultados e o processo se repete até o projeto encontrar o objetivo proposto, designado de solução ótima (Figura 8).

Figura 8 - Processo de otimização baseada em simulação.

Fonte: adaptado de Shi et al. (2016).

A utilização da OBS como método para aperfeiçoar esforços sobre os processos de projeto em edificações tem crescido a partir de dois fatores. O primeiro foi a necessidade de melhorar a medição de quantitativos para os impactos de edificações que visavam a sustentabilidade. O segundo fator foi a evolução dos computadores ao ponto de processarem modelos computacionais mais complexos, antes praticamente inviáveis em custo e tempo gastos, o que simplificou o método entre pesquisadores e profissionais do mercado (SHI et al., 2016). Como resultado, a partir de 2005 as pesquisas sobre OBS aumentaram no campo da construção civil, aprimorando o método e a aplicação em projetos de edificações (EVINS, 2013; MACHAIRAS; TSANGRASSOULIS; AXARLI, 2014; NGUYEN; REITER; RIGO, 2014; SHI et al., 2016).

O método de aplicação da OBS possui diversos modos de utilização. O mais frequente é o algoritmo genético, usado na computação e programação evolutiva (EVINS, 2013; NGUYEN; REITER; RIGO, 2014). O algoritmo genético é baseado na teoria da evolução de Darwin, onde uma população de soluções para um determinado objetivo computacional é avaliada, sendo que as não adaptadas são eliminadas. Das soluções que permanecem, são geradas novas combinações e mutações, resultando

numa nova geração de soluções. Essa nova geração é novamente avaliada, até que se alcance um nível satisfatório de soluções dado um ou mais objetivos a serem atingidos.

O aprimoramento da relação entre redução de consumo de energia e os custos dessas estratégias, e os custos de operação durante a vida útil das construções têm sido os maiores motivos de desenvolvimento da OBS (EVINS, 2013). Visando a maioria dos casos estudados a forma e os materiais do envoltório arquitetônico (59%), a OBS tem se apresentado bastante útil nas etapas iniciais de projetos. Arquitetos, apesar de não serem os desenvolvedores dos fluxos de OBS, são alguns dos usuários finais mais importantes dessa cadeia produtiva (SHI et al., 2016).

Os programas de simulação computacional são um ponto chave na eficiência energética em edificações durante o fluxo de dados para otimização. Nas revisões de literatura encontradas, os simuladores mais utilizados na OBS são o EnergyPlus (37% a 40%) e o Transys (9% a 35%) – conforme a Figura 9 – e representam juntos mais de 50% das aplicações (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014; SHI et al., 2016). O EnergyPlus, amplamente conhecido, ainda é utilizado como motor de simulação em diversos programas de modelagem paramétrica, ampliando sua função dentro do processo de desenvolvimento de edificações eficientes.

Figura 9 - Programas de simulação utilizados em OBS.

Fonte: a) Nguyen; Reiter; Rigo (2014); b) Shi et al. (2016).

Os programas de otimização, outro ponto chave para o processo de OBS, são comumente integrados aos programas de simulação computacional para gerar os resultados que são analisados pelas definições dos objetivos propostos nos projetos.

O MatLab, programa bastante difundido e antigo de cálculo numérico, é o mais utilizado nos processos de OBS. Juntamente ao GenOpt, plataforma de otimização genérica desenvolvida pela Lawrence Berkley National Laboratory, esses programas representam mais de 40% das ferramentas de otimização utilizadas em OBS (SHI et al., 2016).

O potencial de aplicação da OBS é vasto, especialmente nos projetos de edificações sustentáveis que trabalham constantemente formas aprimoradas de reduzir impactos ambientais paralelamente ao processo de redução de custos da obra e operação do edifício em ocupação. Os diversos objetivos a serem atingidos simultaneamente nos projetos são simplificados através desse método. No entanto, os usuários de otimização nas fases iniciais de projeto – os arquitetos – ainda carecem de programas mais legíveis e de simplificada aplicação na definição da forma e materiais das edificações (SHI et al., 2016). Desse modo, a pesquisa e o desenvolvimento dessa área ainda devem crescer nos próximos anos para efetivamente serem aplicados de forma prática aos projetos de edificações de alto desempenho termoenergético.

2.3 Considerações finais da revisão bibliográfica

A revisão desta pesquisa procurou construir um referencial teórico de temas relacionados ao design computacional aplicado à eficiência energética em edificações nas etapas iniciais de projeto. Através das referências sobre computação na construção civil, pôde-se verificar que a plataforma BIM é um ponto chave em praticamente todas as pesquisas atuais que envolvem o processo digital de desenho de edificações. Apesar de temas de elevada relevância como a simulação computacional e outros estudos do design computacional, todos têm alguma finalidade direta ou indiretamente à aplicação do BIM nos processos de projeto.

O estado da arte em que se encontra o BIM sugere que os esforços de projeto em edificações sejam antecipados, aumentando a responsabilidade de arquitetos nas etapas iniciais dos empreendimentos. Com o advento da sustentabilidade, urge também o aprimoramento no desenho dos envoltórios voltados a desempenhos termoenergéticos minimamente satisfatórios. O uso de ferramentas computacionais voltadas à análise energética é essencial, sendo que o pouco uso entre arquitetos pode estar no fato de não considerarem a avaliação de desempenho como parte

integrante de sua função profissional. Tal como acontece com a análise estrutural, arquitetos parecem acreditar que tais tarefas devem ser realizadas por especialistas, embora a maioria acredite que deveria conhecer mais sobre desempenho e seus meios de avaliação (MAHDAVI; EL-BELLAHY, 2005).

A evolução da tecnologia computacional continua ocorrendo de forma intensa na construção civil. Com o aperfeiçoamento de interfaces gráficas aplicadas aos programas de design computacional, arquitetos estão podendo unir sua intuição, sensibilidade e lógica de raciocínio aos processos cognitivos de desenvolvimento de projetos. A computação, dirigida por profissionais de projetos de edificações, é a grande chave para uma nova era da construção civil que, ainda em estágio inicial de descobertas, já apresenta um universo vasto de soluções inovadoras.

3 Método

A abordagem metodológica desta pesquisa é quantitativa através de modelagem e simulação computacional. O método é aplicado a empreendimentos imobiliários nas etapas iniciais de projeto, especialmente no que condiz ao envoltório da edificação. É voltado à utilização de modelagem paramétrica para arquitetos com o objetivo de realizar análises energéticas durante o processo de concepção de projetos de edificações. A tipologia aplicada é a comercial de escritórios, onde normalmente se aplicam índices construtivos máximos, otimizando a utilização de lotes urbanos.

O presente capítulo apresenta o desenvolvimento do método para atingir o objetivo principal e os objetivos secundários da pesquisa. Um panorama geral para compreender o passo a passo do trabalho é explicado, sendo posteriormente esclarecidas as informações específicas de cada etapa.

O desenvolvimento do trabalho foi realizado através de um computador pessoal (*Personal Computer – PC*) com características específicas para modelagem paramétrica, visto que *softwares* BIM requerem alto desempenho computacional. A contextualização do *hardware* é necessária pois a pesquisa também mede tempos e registra problemas de processamento durante a realização das atividades de modelagem e simulação. A Tabela 2 apresenta as características do PC utilizado.

Tabela 2 – *Hardware* utilizado para o desenvolvimento da pesquisa.

Hardware	Desenvolvedor	Modelo
Placa Mãe	Gigabyte	B360M DS3H
Memória RAM	Kingston	Hyperx Fury 32GB 2x16GB 2.133MHz DDR4
Processador	Intel	Core i7-8700, 3.2 Ghz
Placa de Vídeo	Nvidia	Quadro P600
Disco Rígido 1	Seagate	Sata 3,5 Barracuda 2TB 7.200 RPM 64MB Cache Sata 6GB/s
Disco Rígido 2	Kingston	Hyperx SSD Fury 240Gb, 6GB/s
Fonte	EVGA	550W 100-N1-0550-L
Nobreak	SMS	Station II 1200VA Bivolt

Fonte: elaborado pelo autor.

Paralelo ao uso de *hardware* especializado, os *softwares* escolhidos foram adaptados para atender o método da pesquisa (Tabela 3). O alinhamento das versões de cada programa é essencial para que o processo seja harmônico, visto que determinados programas que utilizam arquivos de outros só funcionam se atendidas essas premissas.

Tabela 3 – *Softwares* utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

Software	Desenvolvedor	Versão
Dynamo	Autodesk	2.0.1
Energy Plus Launch	Department of Energy (DOE) of USA	2.13
Energy Plus IDF Editor	Department of Energy (DOE) of USA	1.50 ^a
Energy Plus	Department of Energy (DOE) of USA	8.7.0
Euclid	Big Ladder Software	0.9.3
Revit	Autodesk	2018
SketchUp	Trimble Inc.	Pro 2018 64-Bit
Windows	Microsoft	10 Pro

Fonte: elaborado pelo autor.

3.1 Fluxo de processos para geração automatizada do modelo 3D

Conforme apresentado durante a revisão, é fundamental que as estratégias de eficiência energética nas edificações sejam aplicadas logo no início do processo de projeto. Desse modo, a proposta deste método baseou-se em estudos de modelagem 3D durante a etapa de estudo de viabilidade de um empreendimento comercial de escritórios. A etapa de viabilidade, segundo a NBR 13.531 (ABNT, 1995), ocorre anteriormente ao estudo preliminar de projeto de edificações e analisa alternativas para a concepção da edificação e de seus elementos. A volumetria do modelo desse empreendimento é, portanto, um resultado da aplicação dos índices construtivos máximos permitidos a partir de um lote urbano em sua respectiva legislação local.

Essa volumetria edificada é composta por planos básicos com dimensões totais definidas. São elas:

- Altura total da edificação, formando a cobertura em seu topo;
- Altura entre níveis de pavimentos, formando lajes;
- Dimensões dos lados da base da volumetria, formando as fachadas;

- Definição do PAF, formando as aberturas envidraçadas;
- Definição de áreas sombreadas, formando as proteções solares.

A volumetria final é um modelo 3D gerado de forma automatizada por programação computacional. A programação é realizada em interface gráfica de utilização específica para modelagem paramétrica voltada à construção civil.

Após a concepção do modelo 3D, ainda na ferramenta de design algorítmico, o modelo é exportado para uma ferramenta computacional de análise energética, que utiliza motores de simulação computacional reconhecidos pela ASHRAE. O modelo é, nessa etapa, simulado a fim de se conhecer os resultados de consumo de energia e as características termofísicas da edificação.

A Figura 10 resume o panorama geral do método dessa pesquisa:

Figura 10 – Diagrama-resumo do método da pesquisa.

Fonte: elaborado pelo autor.

Adiante estão descritas as etapas específicas que compõem todo o processo do método conforme simplificados pela Figura 10. São elas: as características do terreno e do envoltório, o uso da ferramenta computacional de design algorítmico, a análise da volumetria resultante após a programação e o uso da ferramenta de simulação termoenergética computacional.

3.2 *Informações de entrada para a edificação*

O lote é um fator primordial para o estudo de desempenho termoenergético nas edificações. As informações a serem levantadas são a localização, a forma e as dimensões, os índices construtivos e, por fim, a topografia. O entorno edificado, apesar de relevante no estudo de desempenho termoenergético, é descartado para que a pesquisa estivesse focada apenas na volumetria a partir do lote, já que o entorno, salvo exceções, não limita alturas ou a forma e dimensão da edificação. Em seguida estão descritos os itens que compõem o lote urbano:

Localização – Através de imagem de satélite, são inseridas as coordenadas geográficas dos vértices do terreno como dados de entrada. A imagem em vista superior também é utilizada para fins de apresentação e compreensão do local.

Forma e dimensões – O terreno escolhido é um quadrilátero regular, com quatro cantos em 90°.

Índices urbanísticos – São analisados os principais índices urbanísticos que conformam a volumetria da edificação. Obrigatoriamente, devem ser, no mínimo, informados o coeficiente ou índice de aproveitamento, a altura máxima ou gabarito ou número de pavimentos permitido, a taxa de ocupação, a taxa de permeabilidade e os recuos e afastamentos das quatro linhas limítrofes do lote – frente(s), lateral (ais) e fundos. Eventuais características próprias do plano diretor e código de edificações que não fazem parte dos itens citados não estão descritas na pesquisa.

Topografia – Para fins de simplificação do modelo, não há diferença de níveis no terreno. Todo o terreno é considerado em mesmo nível do seu logradouro e como nível zero da edificação.

3.2.1 Estudo de caso – edificação na Av. Faria Lima

Para aplicação dos índices urbanísticos a um lote urbano, foi definido a escolha do terreno na cidade de São Paulo (SP). A localização escolhida foi um conjunto de terrenos no número 4.150 da avenida Faria Lima, uma via conhecida pela construção de edifícios de escritórios. O conjunto de terrenos que atualmente são compostos por pequenas edificações, foram simplificados para um único lote, gerando uma dimensão de 40,00 m de frente para a avenida Faria Lima, 36,00 m à direita para a rua Ministro

Jesuíno Cardoso, 36,00 m à esquerda para a rua Coronel Joaquim Ferreira Lobo e 40,00 m para os fundos em limite com outros terrenos. O lote escolhido está representado na Figura 11.

Figura 11– Localização do lote urbano para modelagem.

Fonte: adaptado de Google Earth.

Os índices urbanísticos adotados foram hipotéticos para simplificação do modelo, não representando necessariamente a realidade utilizada para essa região do Plano Diretor de São Paulo. A altura entre níveis aplicada foi de 3,24 m por ser um valor que compõe escadas de emergência de 18 degraus de 18 cm cada, bastante utilizado em projetos de edificações. A Tabela 4 apresenta as delimitações utilizadas para o estudo.

Tabela 4 – Informações do empreendimento para modelagem.

Item	Descrição
Endereço	Av. Brigadeira Faria Lima, 4.150 – Vila Olímpia, São Paulo/SP - Brasil
Latitude	23° 35' 33,90" S
Longitude	46° 40' 52,20" O
Altitude	803 m
Testada (medida frontal)	40,00 m

Tabela 4 – Informações do empreendimento para modelagem
(continuação).

Item	Descrição
Lateral direita	36,00 m
Lateral esquerda	36,00 m
Fundos	40,00 m
Taxa de ocupação (TO)	50 %
Coeficiente de aproveitamento (CA)	4,8
Taxa de permeabilidade	0,00 %
Recuo frontal	8,00 m
Afastamentos	8,00 m
Desnível topográfico	0,00 m
Altura máxima	sem limite
Altura entre níveis	3,24 m

Fonte: elaborado pelo autor.

Após o levantamento desses dados, a ferramenta de design algorítmico foi aplicada, conforme apresenta a próxima seção.

3.3 Aplicação de design algorítmico

A finalidade da programação para uso em projetos de edificações é a possibilidade de otimizar processos realizados manualmente. Durante a concepção de projetos, é comum arquitetos e engenheiros realizarem tarefas repetitivas e operacionais como o levantamento de volumetrias para estudos de viabilidade, o levantamento de áreas de um empreendimento, o desenvolvimento da melhor disposição possível de vagas de estacionamento em uma determinada área ou ainda o layout que melhor otimiza a disposição de metais e louças sanitários em uma área destinada a um banheiro. Esses trabalhos podem ser programados por computador e auxiliar na eficiência do desenvolvimento de projetos.

Desse modo, o fluxo de trabalho dessa pesquisa utiliza o design algorítmico como ferramenta de auxílio para realizar o processo de levantamento de volumetria automatizada a partir de um determinado lote. A escolha da linguagem em design algorítmico (*visual programming language* em inglês) se deu pela simplificação da linguagem de programação, além de programas desse padrão existirem especificamente para projetos de edificações.

3.3.1 Revit Dynamo

A ferramenta escolhida de design algorítmico foi o Dynamo, programa em formato de *plugin* que faz parte do pacote Revit da Autodesk (Figura 12). A versão utilizada faz parte do Revit 2018, no modo educacional, visto que a finalidade do trabalho nesses *softwares* foi para pesquisa acadêmica. Outro pacote conhecido e similar ao da Autodesk é o Archicad, da Graphisoft, que utiliza o Grasshoper sobre o Rhino 3D como ferramenta de design algorítmico. Devido a um vasto uso no mercado BIM brasileiro pelo Revit e as ferramentas da Autodesk, tornou-se mais plausível analisar essa cadeia de programas.

No Dynamo, deve-se organizar cada ação por um nó. Todo nó tem uma porta de entrada (dados de entrada – *input data*) e uma porta de saída (dados de saída – *output data*), onde se concentram as informações necessárias que geram a forma ou realizam análises do modelo a ser desenhado.

Pelo programa, os índices urbanísticos foram aliados a cálculos aritméticos, resultando em volumetrias 3D automatizadas. Para cada índice urbanístico alterado – índice de aproveitamento, recuos e afastamentos, altura máxima e taxa de ocupação – houve uma alteração parametrizada em todo o resultado do modelo 3D. O processo é sistematizado e integrado, gerando, além da visualização 3D, resultados numéricos referentes à área da base, à área total construída e à quantidade de pavimentos.

Figura 12 – Imagem do Dynamo sendo utilizado simultaneamente ao Revit.

Fonte: Autodesk (2014).

Para tornar mais compreensível a explanação do processo de informações do lote para geração do modelo 3D no Dynamo, a Figura 13 resume os procedimentos que foram realizados no programa. A partir das informações dimensionais do lote (quatro lados), o programa gerou uma base quadrilátera. Com essa base, os índices urbanísticos foram aplicados à área e às dimensões. Os índices de coeficiente de aproveitamento, taxa de ocupação e taxa de permeabilidade foram multiplicados pela área do terreno enquanto a partir das medidas dos lados foram subtraídos os recuos e afastamentos. Nos índices, o gabarito foi indicado como limitador de altura e, a partir desses resultados quantitativos, o modelo 3D foi gerado.

Figura 13 - Processos organizados na programação computacional via design algorítmico.

Fonte: elaborado pelo autor.

O método do processo de desenvolvimento do modelo 3D automatizado seguiu a utilização inicial do Revit, posteriormente o Dynamo e finalizou novamente para o Revit.

3.4 Simulação computacional

Essa pesquisa avalia duas formas de interoperabilidade entre BIM e simulação termoenergética computacional. A primeira e mais usual é exportar um modelo BIM para um modelo CAD 3D, convertê-lo em um modelo BEM e então reproduzi-lo em um simulador computacional. A segunda é exportar diretamente um modelo BIM para

um modelo BEM e também reproduzi-lo em um simulador. Portanto, a proposta é reduzir erros de interoperabilidade e agilizar processos de conversão de modelos, aumentando a precisão dos resultados e diminuindo o tempo de modelagem. Os dois fluxos partem da modelagem realizada em Dynamo e Revit, que estão esquematizados na Figura 14.

Fonte: elaborado pelo autor.

Utilizando os processos de BIM para BEM via CAD, o SketchUp foi escolhido como modelador de CAD 3D por se integrar via *plugin* ao EnergyPlus. A necessidade do *plugin* no SketchUp é para transformar o modelo CAD 3D em modelo BEM para simulação. Nesse caso o *plugin* escolhido foi o Euclid por se assemelhar ao Legacy Open Studio desenvolvido pela NREL, que parou de ser atualizado na versão simplificada do SketchUp (IBPSA USA, 2017). Com o arquivo CAD convertido em BEM, o modelo pode então ser simulado no EnergyPlus. A outra forma de fluxo de processos de interoperabilidade BIM e BEM avalia internamente a simulação computacional do Revit em conjunto com o Insight. O Revit converte o modelo BIM diretamente em um modelo BEM e o exporta para o Insight, que também possui como motor de simulação termoenergética, o EnergyPlus. A partir do resultado do Insight é possível, inclusive, exportar o arquivo BEM gerado para o formato IDF, padrão utilizado pelo EnergyPlus e que foi adotado na pesquisa como verificador universal dos resultados de simulação dos diferentes modelos.

No Revit, as condições de contorno são definidas na ferramenta *Energy Settings* situada na aba *Analyse*. O modo de análise escolhido pode ser o de massa conceitual (*Use Conceptual Masses*) ou de elementos construtivos (*Use Building Elements*). Esse critério foi alterado conforme a necessidade de escolha do modelo, sendo citado nas seções seguintes. As demais especificações são mantidas conforme as configurações predefinidas do Revit (Figura 15).

Figura 15 – Configuração do modelo para análise energética.

Parameter	Value
Energy Analytical Model	
Mode	Use Conceptual Masses
Ground Plane	Piso Térreo
Project Phase	Construção nova
Analytical Space Resolution	0.4572 m
Analytical Surface Resolution	0.3048 m
Perimeter Zone Depth	8.0000 m
Perimeter Zone Division	☐
Advanced	
Other Options	Edit...

[How do these settings affect energy analysis?](#)

OK Cancel

Fonte: elaborado pelo autor.

Nas configurações avançadas (Figura 16), dentro do item de detalhamento do modelo – *Detailed Model* – o PAF adotado foi de 40%. Os brises foram incluídos com 0,60 m de profundidade, horizontais sobre o topo das janelas. As aberturas zenitais foram de 0%. As informações da edificação – *Building Data* – foram configuradas com a tipologia de escritórios.

Figura 16 – Configurações avançadas do modelo de massa conceitual para análise energética.

Parameter	Value
Detailed Model	
Target Percentage Glazing	40%
Target Sill Height	1.1000 m
Glazing is Shaded	☒
Shade Depth	0.6000 m
Target Percentage Skylights	0%
Skylight Width & Depth	0.9144 m
Building Data	
Building Type	Office
Building Operating Schedule	12/5 Facility
HVAC System	12 SEER/7.7 HSPF Split Packaged Heat Pump
Outdoor Air Information	Edit...
Room/Space Data	
Export Category	Spaces
Material Thermal Properties	
Conceptual Types	Edit...
Schematic Types	<Building>
Detailed Elements	☐

[How do these settings affect energy analysis?](#)

OK Cancel

Fonte: elaborado pelo autor através do Revit.

No item *Building Type* do parâmetro *Building Data* a configuração escolhida *Office* do Revit possui suas características baseadas na ASHRAE 140. Essas características são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Forma de ocupação em edifícios de escritório segundo padrões da ASHRAE 140.

Parâmetro	Descrição
<i>Schedule</i> de ocupação	<i>Office</i>
Pessoas/100 m ²	4
Ganho de calor sensível por pessoa (W/pessoa)	73,3
Ganho de calor latente por pessoa (W/pessoa)	58,6
Densidade de carga de Iluminação (W/m ²)	9,7
Densidade de carga de equipamentos (W/m ²)	14,4

Tabela 5 – Forma de ocupação em edifícios de escritório segundo padrões da ASHRAE 140 (continuação).

Parâmetro	Descrição
Taxa de renovação de ar (<i>Air Changes per Hour</i>)	0,4
Fluxo de ar externo (ventilação) por pessoa (L/s)	0
Fluxo de ar externo (ventilação) por área (m ³ /h.m ²)	2,5
Temperatura de <i>set point</i> em zonas térmicas desocupadas (C°)	29,4

Fonte: Autodesk (2017b).

No item *Operating Schedule* das configurações avançadas os padrões de escolha estão divididos entre *Facilities*, Tipos Escolares, Teatros e Cultos Religiosos. Baseados também na ASHRAE 140, cada um desses usos apresenta uma diferente forma de ocupação ao longo dos dias de uma semana:

- *Facilities (24/7 Facility, 24/6 Facility, 24/5 Facility, 12/7 Facility, 12/6 Facility e 12/5 Facility)* – comumente utilizados para edificações de uso comercial como escritórios e setores do varejo;
- Tipos Escolares (*K-12 School* e *Year-Round School*) – *K-12 School* representa o jardim de infância ou pré-escolar até o 12º ano de estudo escolar, normalmente no fim do ensino médio. *Year-Round School*, não muito utilizado no Brasil, é um calendário escolar onde há aulas durante todo o ano, com períodos de recesso menores que os tradicionais calendários de 200 dias de aulas;
- Teatros (*Theater/Performing Arts*) – utilizado para edificações de performance artística;
- Cultos Religiosos (*Worship*) – utilizado para edificações de uso religioso.

Essas ocupações são representadas por gráficos de eixos X e Y. No eixo X são apresentadas as horas do dia, começando pela meia-noite e terminando em 24h. No eixo Y é dada a ocupação decimal da edificação, de 0 a 1. Por exemplo, se a densidade de ocupação é de 100 pessoas no edifício, então:

- O valor 1 na tabela supõe que 100 pessoas estão no edifício naquela hora;
- O valor 0 na tabela supõe que nenhuma pessoa está no edifício naquela hora;

- Um valor de 0.1 significa que $100 \times 0,1 = 10$ pessoas devem estar no edifício naquela hora.

Como a presente pesquisa trabalha com edifícios de escritórios, optou-se por trabalhar nos itens de *Facilities*. Os padrões de *Facilities*, por sua vez, são subdivididos em *24/7 Facility*, *24/6 Facility*, *24/5 Facility*, *12/7 Facility*, *12/6 Facility* e *12/5 Facility*. O primeiro número, 24 ou 12, representa se as instalações do edifício ficam sempre em funcionamento, mesmo que em estado de consumo mínimo fora de horário comercial, durante todo o dia ou apenas durante a ocupação das pessoas no edifício. O segundo número representa quantos dias da semana o edifício é ocupado, sendo que 7 significa que todos os dias o edifício está ocupado, 6 de segunda-feira a sábado e 5 de segunda-feira a sexta-feira.

A importância desse item revela o quanto um edifício pode consumir a mais mensalmente pelo fato de haver todos os dias e todos os horários algum tipo de funcionamento das instalações, especialmente as de condicionamento de ar.

Para a pesquisa foi escolhido o padrão *12/5 Facility* (Figura 17) pois a maioria dos edifícios de escritório no Brasil trabalha-se de segunda a sexta-feira com o ligamento dos sistemas de condicionamento de ar comumente no horário comercial.

Figura 17 – Horários de operação da edificação do modelo *12/5 Facility* do Revit.

Fonte: Autodesk (2017c).

Após a definição dos horários de uso do edifício, é escolhido o modelo de sistema de condicionamento de ar no item *HVAC Systems*. As opções, também baseadas em modelos norte-americanos, variam entre:

- VAV (*Variable Air Volume*): sistema de condicionamento de ar que consiste em refrigerar diferentes zonas térmicas a partir de uma Unidade de Tratamento de Ar (UTA), onde comumente se encontra um *chiller*. Cada zona térmica tem seu próprio controle de temperatura. O VAV (em português Volume de Ar Variável) é utilizado em situações onde há grandes áreas a serem condicionadas – comumente em grandes áreas de escritórios, centros comerciais, hospitais, hotéis, agências bancárias e instituições de ensino – e se destaca pelo baixo consumo de energia quando comparado a sistemas compactos de refrigeração.
- VRF (*Variable Refrigerant Flow*): em português VRV (Volume de Refrigerante Variável), esse sistema também trabalha com uma central de ar, contudo dispensa o uso de *chillers* e trabalha com módulos compactos e um inteligente sistema de automação integrado.
- PTAC (*Packaged Terminal Air Conditioner*): os sistemas compactos são os mais utilizados comercialmente. No Brasil existem dois modelos bastante adotados em pequenos ambientes. O de “janela”, onde a condensadora e a evaporadora estão concentradas em apenas um componente e os *split* (‘dividido’ em português), onde condensadora e evaporadora trabalham em pontos diferentes, dando maior flexibilidade de locação das máquinas.

Por se assemelhar aos sistemas mais convencionais utilizados em escritórios no Brasil, optou-se pelo sistema compacto de *splits*. O modelo adotado foi “12 SEER/7.7 HSPF *Split Packaged Heat Pump*”.

No próximo item, *Room/Space Data*, a categoria de exportação adotada foi *Spaces*. Essa escolha se deu por ser mais fácil de caracterizar configurações de simulação referentes a cargas térmicas e formas de ocupação, apesar de que nesse momento tais características são tratadas de forma simplificada diretamente no painel de configuração de energia. Entretanto, caso o usuário deseje configurar com mais precisão cada setor do prédio referente às configurações de carga térmica e

ocupação, pode-se criar uma tabela de espaços (*Space Schedule*) e especificar cada parte da edificação.

Os materiais utilizados para simulação foram escolhidos a partir da biblioteca disponível em *Schematic Types* do painel de configuração de energia do Revit (Tabela 6). A biblioteca, composta por materiais utilizados amplamente na construção civil norte-americana e britânica, foi adaptada ao uso mais próximo dos materiais do mercado brasileiro. Cabe aqui, porém, uma observação para a necessidade de elaboração de materiais para simulação no Revit adaptados à realidade do Brasil para maiores usos práticos da AECO.

Tabela 6 – Materiais utilizados nas simulações.

Componente	Espessura [m]	Condutividade térmica [W/(m.K)]	Densidade (kg/m ³)	Calor específico [J/(kg.K)]
Bloco cerâmico	0,101585	1,311205	2.082,6	921,096
Bloco de concreto	0,200	1,63	2.300	1.000
Gesso	0,013	0,50	1.300	1.000
Gesso leve	0,013	0,16	600	1.000
Carpete	0,0127	0,06	288	1.380
Concreto denso reforçado <i>in loco</i>	0,200	1,90	2.300	840
Concreto leve	0,1016	0,53	1.280	840
Piso cerâmico	0,0127	1,59	1.920	1.260
Reboco	0,019	0,50	1.300	1.000

Fonte: padrão de materiais para análise energética do Revit (AUTODESK, 2016).

As composições de faces opacas foram igualmente baseadas na biblioteca de *Schematic Types* do Revit (Tabela 7) e podem ser encontradas no Anexo A.

Tabela 7 – Elementos construtivos utilizados nas simulações.

Componente	Camada externa	Camada 1	Camada 2
Parede externa	Reboco	Bloco de concreto	Gesso
Parede interna	Gesso leve	Bloco cerâmico	Gesso leve
Cobertura	Concreto leve	-	-
Laje entre pisos	Piso cerâmico	-	-
Laje em contato com o solo	Concreto denso reforçado <i>in loco</i>	Carpete	-

Fonte: padrão de elementos construtivos para análise energética do Revit (AUTODESK, 2016).

As janelas, por sua vez, possuem definições especiais separadas das faces opacas. Optou-se por vidro de 6 mm de espessura simples (Tabela 8).

Tabela 8 – Propriedades das janelas.

Propriedade	Valor
Número de camadas de vidro	1
Espessura do vidro (m)	0,006
Espessura da camada de ar (m)	-
Transmitância térmica $W/(m^2 \cdot K)$	0,775
Condutividade térmica $W/(m \cdot K)$	0,9

Fonte: propriedades de janelas do Revit (AUTODESK, 2016).

3.4.1 Simulação pelo Euclid

Como o *software* modelador BIM aqui utilizado é o Revit, a exportação desses modelos 3D estritamente geométricos é possível em formatos de arquivo DWG, DXF, SAT e STL. Para realizar a exportação ao SketchUp foram utilizadas duas frentes de trabalho para gerar o modelo 3D a partir do Revit. A primeira foi a exportação em formato STL diretamente da modelagem do Dynamo para o SketchUp. A segunda foi o resultado da modelagem do Dynamo no Revit, exportando-se o modelo gerado para o formato DWG, sendo aberto posteriormente também no Sketchup. As duas formas para simulação no Euclid são apresentadas nas subseções seguintes.

3.4.1.1 Simulação via exportação STL pelo Dynamo

O processo se iniciou pela exportação do modelo gerado no Dynamo para STL (Figura 18), sem interferências de *softwares* intermediários, facilitando a interoperabilidade entre programas.

Figura 18 – Exportação do Dynamo para o formato STL.

Fonte: elaborado pelo autor.

Através do Dynamo também é possível exportar arquivos em formato SAT. No entanto esse formato não é legível no SketchUp. O SketchUp aceita os seguintes arquivos de formato tridimensionais: 3DS, DAE, DEM, DDF, DWG, DXF, IFC, KMZ, SKP e STL (Figura 19). Os demais arquivos são provenientes de imagens e não possuem sistemas de vértices, arestas e faces em eixos XYZ.

Figura 19 – Formatos de arquivo de importação no SketchUp.

Fonte: elaborado pelo autor.

Desse modo a única forma de exportação direta do Dynamo para o SketchUp é o formato STL. Por convenção nessa pesquisa, o arquivo foi exportado com o nome TESTE.stl do Dynamo e importado com o mesmo arquivo pelo SketchUp. Como

adotou-se o plugin Euclid como programa de transição para integrar o SketchUp ao EnergyPlus, foi realizada a primeira tentativa de importar pelo próprio plugin. Pelo fato do Euclid aceitar apenas arquivos de importação IDF, criou-se uma Zona Térmica e dentro dela foi realizada a importação do arquivo TESTE.stl. Nas opções de importação as faces coplanares foram habilitadas como mescladas a fim de não haver arestas diagonais que formassem faces triangulares, típicas desse formato de arquivo. A origem do modelo foi preservada para estar alinhada ao norte geográfico e as coordenadas utilizadas no Dynamo. Houve ainda a necessidade de trocar o eixo Y pelo Z pois o arquivo STL vem naturalmente com esses eixos invertidos, o que ocasionou em uma edificação girada em 90° do seu eixo utilizado original do Dynamo (Figura 20).

Figura 20 – Configurações de importação de arquivo STL no SketchUp.

Fonte: elaborado pelo autor.

O arquivo foi aceito e imediatamente o Euclid iniciou a conversão do modelo CAD 3D em um modelo BEM. As faces verticais foram transformadas em *Walls*, as faces horizontais entre pavimentos em *Floors* e a face de topo em *Roof*. Contudo, como o programa levou um tempo considerável para transformar um modelo CAD 3D em um modelo BEM (mais de 30 minutos), essa forma de trabalho foi descartada pelo demasiado tempo de processamento. A alternativa foi importar diretamente o modelo no SketchUp, sem a criação de Zona Térmica do Euclid. O arquivo abriu com facilidade e, em alguns segundos, foi posicionado nas mesmas coordenadas e escala que a tentativa do Euclid. As faces horizontais que representam as lajes ficaram fora

do nível de 3,24 m entre pavimentos estabelecido no Dynamo. Alguns pavimentos ficaram entre níveis com 3,00 m e enquanto outros com 4,00 m. A altura total do modelo não condiz com a do modelo do Dynamo, assim como a base do modelo. Como o erro nos níveis era muito grande, excluíram-se as faces dos pavimentos que em seguida foram modeladas manualmente, aproveitando apenas a base como referência para o pavimento térreo, o tipo e a cobertura. A geometria do terreno também foi excluída, pois não adentrava como dado em formato de geometria. As configurações de terreno participaram da simulação apenas nos dados de temperatura do edifício em contato com o solo.

Após a modelagem 3D manual dos pavimentos foi necessário configurar as relações entre faces, confirmando, por exemplo, a relação de troca térmica entre a face inferior e superior da laje entre o pavimento térreo e o pavimento-tipo. O modelo ficou, desse modo, definitivamente pronto para simulação no EnergyPlus, dividido em três: o volume do pavimento térreo, do pavimento-tipo e pavimento de cobertura (Figura 21). O arquivo climático (EPW) escolhido foi o do aeroporto de Congonhas, utilizado para simulações termoeenergéticas para a cidade de São Paulo.

Figura 21 – Modelo BEM no Euclid.

Fonte: elaborado pelo autor através do SketchUp e Euclid.

Com as informações inseridas, o Euclid gerou o arquivo IDF para simulação no EnergyPlus. No entanto, como o arquivo STL extraído do Dynamo possuía apenas características geométricas, os padrões de materiais, uso e ocupação da edificação e outras condições de contorno do modelo foram preenchidas pelos padrões predefinidos do Euclid. O próprio *plugin* alerta que, para alterar as condições de

contorno, o usuário deve realizar essa tarefa diretamente no arquivo IDF via EnergyPlus. O usuário ajusta, dessa forma, os materiais manualmente, após gerar o IDF, para que as condições de contorno padrões sejam as desejadas na simulação. Também pode usar um arquivo *template* do IDF, se o tiver elaborado antes de importar o modelo STL.

Com as condições de contorno inseridas corretamente no arquivo IDF, a simulação pelo EnergyPlus estava pronta para ser realizada.

3.4.1.2 Simulação via exportação DWG pelo Revit

Outro modo de importação do modelo 3D no SketchUp foi por exportação da massa conceitual gerada no Revit por DWG. Ela foi importada do mesmo modo que o modelo STL, através da importação dentro de uma Zona Térmica criada pelo Euclid. A diferença está apenas na unidade de medida, enquanto no modelo STL o arquivo é importado na unidade metro, o modelo DWG é importado na unidade milímetro. E apesar do modelo ser convertido automaticamente para um modelo BEM, de qualquer forma as faces de cada pavimento precisam ser separadas em zonas térmicas diferentes, havendo ainda assim um processo manual de conversão de um modelo CAD 3D para um modelo BEM. No mais, todo o restante do processo foi igual em relação a caracterização das condições de contorno das duas formas de geração do modelo BEM.

3.4.2 Simulação pelo Insight

Uma das propostas da pesquisa é apresentar a interoperabilidade direta entre BIM e BEM no sentido de reduzir perdas em relação ao tradicional processo BIM-CAD-BEM. Nesse caso, com o uso do Revit, o processo de simulação computacional foi realizado no Insight 360, apropriando-se de uma interoperabilidade mais eficiente dentro dos programas integrados. A interface é outro atrativo do Insight, que pode ser acessado via browser conectado à internet. Os arquivos simulados ficam salvos no portal do Insight 360 no modo nuvem (*cloud* em inglês) e podem ser acessados por qualquer dispositivo com acesso à internet, através da conta da Autodesk.

O Insight utiliza diversos motores de simulação computacionais. O DOE-2.2 funciona como motor de análise energética global do modelo, o EnergyPlus calcula as

cargas térmicas e o Radiance os sistemas de iluminação artificial e simulação de iluminação natural (EGGER, 2017). Como o programa funciona via browser em nuvem, a simulação ocorre no servidor da Autodesk a partir do Green Building Studio, agilizando processos mais complexos de simulação em modelos 3D. O Green Building Studio (SARACINO, 2018) é validado pela ASHRAE 140, normativa oficial utilizada para reconhecimento de diversos programas de simulação termoenergética computacional.

Na simulação pelo Insight há duas frentes de trabalho para gerar o modelo 3D no Revit. A primeira é a modelagem por massa conceitual, onde existem apenas planos sem espessura que formam conceitualmente elementos de edificações como paredes, lajes, aberturas, proteções solares e coberturas. A segunda é por elementos construtivos, onde já se determinam os elementos de edificações com detalhes construtivos como espessura, propriedades termofísicas, materiais e cores. Ambos os processos têm como produto final um modelo BEM. No entanto, as características termofísicas dos materiais do modelo de massa conceitual podem ser definidas no momento da exportação do BIM para o BEM, enquanto os materiais do modelo de elementos construtivos são definidos durante a modelagem da edificação.

3.4.2.1 Exportação de modelo por massa conceitual

A exportação para o Insight foi possível após a criação do modelo de massa conceitual. Antes disso foi necessário configurar as condições de contorno. Diferente da exportação para o SketchUp que aceita apenas modelos de CAD 3D para configurar os parâmetros de análise energética do Euclid, no modelo em massa conceitual do Revit pode-se configurar diretamente as condições de contorno para exportação ao Insight.

Por fim, configuram-se as propriedades térmicas dos materiais. Como o modelo aqui utilizado é por massa conceitual, optou-se pelas configurações do item *Schematic Types*, onde houve sobreposição de materiais no modelo (*override*).

Ao serem finalizadas as configurações de energia, gerou-se o modelo BEM. No Revit essa ação é realizada no item *Create Energy Model*, gerando o modelo de massa conceitual com todos os elementos para simulação (Figura 22).

Figura 22 – Modelo BEM preparado para simulação.

Fonte: elaborado pelo autor.

Com o modelo BEM desenhado, enviou-se para o mesmo para o Insight através da ferramenta *Generate* da guia *Analyze*. O modelo foi enviado através do servidor da Autodesk e um e-mail de notificação foi encaminhado ao usuário confirmando que o processo de simulação termoenergética computacional estava sendo realizado.

Para verificar os resultados do modelo BEM, na guia *Analyze* acessou-se o item *Optimize*, abrindo o programa Insight. No Insight os resultados foram exportados para EnergyPlus clicando-se em uma flecha ao lado da descrição do modelo, na opção *Export* (Figura 23).

Figura 23 – Exportação do Insight para o EnergyPlus.

Fonte: Insight.

3.4.2.2 Exportação de modelo por elementos construtivos

A exportação para o Insight através de modelos por elementos construtivos ocorre de forma semelhante à exportação por massa conceitual. As definições do painel de configurações de energia adotados para o modelo por elementos construtivos é a mesma do painel do modelo de massa conceitual. A diferença está na adoção dos materiais padronizados previamente nas abas *Conceptual Types* e *Schematic Types*. Desse modo, para não tornar o texto repetitivo, serão explicadas apenas as diferenças nas configurações.

Localização, PAF, cargas térmicas, modo de ocupação, sistemas de condicionamento de ar e definição de espaços ou ambientes (*spaces* e *rooms*) foram idênticos nos modelos por massa conceitual e por elementos construtivos. A única ressalva foram os materiais, já que os modelos por massa conceitual são constituídos de elementos geométricos sem materialidade e espessura. Os modelos por elementos construtivos são necessariamente formados por paredes, lajes, janelas, cobertura e elementos de proteção solar.

Na constituição de materiais de elementos construtivos modelaram-se as partes de uma edificação já sabendo de que eram feitos. Quando se modela em projeto uma parede composta por blocos cerâmicos de oito furos no centro e emboço, reboco e pintura acrílica em ambos os lados, já se imagina a densidade dos materiais, suas cores, composição química e propriedades térmicas, mesmo que de forma intrínseca. Por isso quando um arquiteto ou um engenheiro adota uma parede de concreto maciço no lugar de uma parede de alvenaria, ele sabe, mesmo sem dominar a nomenclatura e a ciência da termodinâmica dos materiais, que um determinado material pode aquecer mais rapidamente do que outro se exposto às mesmas condições de temperatura. Modelar um projeto por elemento construtivo requer, dessa maneira, sensibilidade na adoção dos materiais.

A modelagem deve ocorrer já constituindo uma hipótese de materiais adequados a cada situação. Para simplificar e padronizar esse processo, adotou-se a sobreposição de materiais pelo *Override* dentro de *Schematic Types* no painel de configuração de energia do Revit. Desse modo adotaram-se os mesmos materiais que o modelo por massa conceitual.

Com a configuração dos materiais dos elementos construtivos, o processo de exportação foi semelhante. Antes de criar o modelo BEM foi necessário apenas alterar

o modo de exportação no painel de configuração de energia de *Use Conceptual Masses* para *Use Building Elements*. O modelo BEM foi gerado em *Create Energy Model*. A visualização dos modelos BEM difere entre modelo de massa conceitual e modelo por elementos construtivos (Figura 24). A opção de criação automática de zonas perimetrais também não foi possível no modelo por elementos construtivos, pois no painel de configurações de energia do Revit essa função é exercida apenas por modelos de massa conceitual.

Figura 24 – Modelo BEM de exportação por massa conceitual (a) e exportação por elementos construtivos (b).

Fonte: elaborado pelo autor.

A exportação foi realizada, o modelo pôde ser aberto no Insight e em seguida convertido para IDF, formato do EnergyPlus.

3.5 Comparativo entre os modelos

A forma convencional de simulação termoenergética computacional com interoperabilidade entre BIM, CAD 3D e BEM foi avaliada junto à simulação entre BIM e BEM a partir dos resultados das simulações. A comparação utilizou os arquivos em formato IDF gerados pelas simulações do EnergyPlus para avaliar os resultados e

suas diferenças. Os critérios escolhidos foram baseados na pesquisa de Queiróz (2016), avaliando a geometria com auxílio do SketchUp para verificação das diferenças dimensionais dos modelos simulados e as configurações de simulação das propriedades físicas e térmicas dos materiais modeladas no Revit e no Euclid.

3.5.1 Geometria

A análise da geometria ocorreu com auxílio do Sketchup para verificação das dimensões dos modelos simulados, tais como: dimensões das zonas térmicas, existência e identificação dos elementos construtivos e a simplicidade da geometria. Os arquivos IDF gerados pelas simulações do Euclid e Insight foram abertos no SketchUp através do Euclid.

3.5.2 Configuração de simulação

No EnergyPlus os arquivos IDF foram abertos para avaliar se os parâmetros dos materiais e as programações de uso e ocupação (*schedules*) estavam de acordo com os modelos desenhados. As propriedades dos materiais analisadas foram as físicas (camadas dos componentes e suas respectivas espessuras e densidades) e as térmicas (condutividade térmica, calor específico e transmitância térmica). Para as tabelas de uso e ocupação foram analisados o percentual de ocupação da edificação ao longo de uma semana, a localização pela latitude e longitude e o arquivo climático utilizado (EPW).

4 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados da pesquisa. Testou-se o modelo paramétrico para a validação da hipótese dos objetivos a fim de abrir novos caminhos à concepção de projetos de edificações sustentáveis no Brasil.

O capítulo trabalha com quatro resultados. O primeiro discute o que foi gerado durante o processo de automatização de volumetrias 3D sob o uso de design algorítmico. O segundo resultado abrange, a partir do primeiro, como a volumetria 3D é convencionalmente simulada em programas de análise energética através do sistema CAD. O terceiro resultado traz uma perspectiva do uso do Insight 360 (BIM) para simulação da mesma volumetria gerada no primeiro resultado. O quarto resultado, por fim, compara os dois fluxos de trabalho, de modo a analisar criticamente as características de cada processo adotado.

4.1 Modelo 3D automatizado via design algorítmico

A proposta de desenvolvimento do modelo para a etapa de estudo de viabilidade foi trabalhada através do Dynamo, plugin do Autodesk Revit. Primeiramente houve a necessidade de aplicar o terreno hipotético para o desenvolvimento da proposta da pesquisa. O arquivo aberto no Revit foi um *template* em branco para iniciar o desenho do lote.

O lote adotado para o estudo foi um quadrilátero regular. As coordenadas geográficas de latitude e longitude foram configuradas nessa etapa, sendo adotado o lote urbano já citado da cidade de São Paulo. As informações de mapa foram trazidas pelo sistema Bing como parte da geolocalização do Revit (Figura 25). O endereço escolhido conforme a Tabela 2 já apresentada adotou a estação meteorológica 838847, no bairro Vila Olímpia. Comumente a estação utilizada para simulações termoenergéticas de edificações em São Paulo é a 837800 do Aeroporto de Congonhas, cadastrada pelo INMET e disposta em arquivo EPW pelo EnergyPlus (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2006). No entanto essa estação não apareceu na lista do Revit, mesmo estando a menos de 12 km e sendo uma das oito estações mais próximas do endereço conforme instruções do próprio programa (AUTODESK, 2018).

Figura 25 – Caixa de diálogo *Location* com o endereço do lote estudado.

Fonte: elaborado pelo autor.

Para o desenho de lote no Revit, utilizou-se a ferramenta *Toposurface*. Foram desenhados os quatro pontos para definição do quadrilátero, sendo que todos tiveram nível zero a fim de planificar totalmente o terreno proposto. O lote também foi adequado ao norte geográfico, estando assim alinhado à orientação solar.

Através do terreno elaborado no Revit, iniciou-se o Dynamo, *plugin* encontrado na aba *Manage* da guia *ribbon* do Revit. No Dynamo criou-se o arquivo modelo para a pesquisa, em formato DYN. O primeiro passo foi importar o modelo topográfico do Revit, convertendo-o em superfícies, linhas e pontos para que pudessem ser trabalhados. Com os elementos geométricos disponíveis, obteve-se a área do terreno e os índices urbanísticos foram criados para que formassem os multiplicadores e limitadores da volumetria 3D. Para facilitar a compreensão dos dados de entrada, os nós que portavam os índices foram renomeados diretamente com suas respectivas funções. Os índices de recuo, afastamento, aproveitamento e altura foram definidos no conjunto dos números reais positivos. A taxa de permeabilidade e a taxa de ocupação foram definidas cada qual com a variação de 0 (sem área permeável, sem ocupação) a 1 (área totalmente permeável, ocupação máxima), sendo permitido qualquer número real nesse intervalo. Conforme determinados no capítulo anterior, a

taxa de permeabilidade preenchida nesse intervalo foi de 0% enquanto a taxa de ocupação em 50%. A Figura 26 resume essa primeira etapa da árvore de nós do Dynamo.

Figura 26 – Conversão de elemento topográfico em elementos geométricos e criação de índices urbanísticos.

Fonte: elaborado pelo autor.

A partir dos índices estabelecidos, da área do terreno e sua forma, as tarefas operacionais de multiplicação e limitação da superfície para extrusão da volumetria 3D foram executadas, caracterizando um modelo simplificado de edificação. O polígono do perímetro do terreno foi recuado conforme recuos e afastamentos e, a partir da nova superfície formada, a área dessa superfície foi multiplicada pelo índice de aproveitamento, gerando a área total da edificação.

Com os cálculos aplicados aos nós do Dynamo, especificamente em formato de *Code Blocks* do programa, o volume 3D foi extrudado a partir da área da base da edificação. Os planos horizontais que representam as lajes foram multiplicados pelo número de pavimentos e posicionados nos níveis de cada pavimento. Os níveis também são escolhidos pelo usuário. Nesse caso especificamente adotou-se a dimensão de 3,24 m entre níveis.

A partir do volume extrudado, pode-se retirar informações de áreas totais de lajes, área do pavimento-tipo, altura máxima da edificação e número de pavimentos. Essas informações são obtidas pela ferramenta *Watch* ao final dos nós e exportadas para planilhas. Como o foco dessa pesquisa é a automatização do modelo 3D para análise energética, a árvore de nós se limitou até a produção da volumetria (Figura 27).

Figura 27 – Árvore de nós final do Dynamo.

Fonte: elaborado pelo autor.

4.1.1 Modelo por massa conceitual

Com o resultado da volumetria elaborada, pôde-se voltar ao Revit e verificar o resultado gerado. Entretanto, o volume do Revit não era manipulável, funcionando apenas como um modelo de referência, sem gerar massa conceitual ou elementos editáveis no programa. Mesmo que houvesse interesse em desenhar manualmente uma massa conceitual por cima do modelo referencial gerado, não era possível usar os vértices do modelo para desenhar sobre eles. Eles existiam como representação gráfica, porém não como modelos manipuláveis. Em resumo, havia uma volumetria invisível à edição pelas ferramentas do Revit (Figura 28).

Figura 28 – Modelo representado em Revit, porém invisível à edição.

Fonte: elaborado pelo autor.

Para resolver essas questões foram consultados fóruns, sistemas de ajuda e outros meios de auxílio para combinarem o Dynamo ao Revit. Estes sistemas de ajuda descreviam a possibilidade de exportar o modelo do Dynamo para arquivo no formato SAT ou a utilização da ferramenta *Direct Shape* dentro do próprio Dynamo. As duas ferramentas exportam arquivos tridimensionais que são entendidos pelo Revit. Na primeira proposta, o arquivo SAT foi compreendido ao ser exportado para um diretório do computador e depois importado dentro do Revit como um arquivo CAD 3D, contudo não possuía o parâmetro de massa conceitual dentro do Revit (Figura 29). Na segunda proposta pela ferramenta *Direct Shape* no Dynamo gerou-se um modelo 3D que podia ser categorizado como qualquer família no Revit. O modelo foi gerado como tipo de família *Mass* no Revit, referenciando à ferramenta de massa conceitual do programa. Porém, não era compreensível pelo programa como uma massa conceitual em si, funcionando apenas como um modelo referencial. A única forma de produzir uma volumetria com caráter de massa conceitual no Revit foi desenhar a massa de forma manual no programa, utilizando esses modelos 3D como referências. No Dynamo não havia nenhuma ferramenta de produção de massa conceitual direta sobre o Revit.

Figura 29 – Erro do arquivo SAT na tentativa de ser utilizado como modelo de massa conceitual no Revit.

Fonte: elaborado pelo autor.

Desse modo o desenho manual da massa conceitual foi realizado sobre as duas formas CAD 3D geradas pelo Dynamo. Assim foi possível gerar o volume 3D (Figura 30), desenhando-se a base e depois a extrudando até a altura do volume do CAD 3D (SAT ou via forma do *Direct Shape* do Dynamo).

Figura 30 – Volume de massa conceitual gerado manualmente sobre o modelo referencial CAD 3D.

Fonte: elaborado pelo autor.

Nesse modo foi possível criar *Mass Floors*, que são os planos dos pavimentos, um tipo de simplificação de uma laje em forma de massa conceitual. Os *Mass Floors* foram criados conforme os níveis disponíveis, estes já concebidos de forma automatizada no próprio Dynamo.

O processo de produção 3D automatizado no Dynamo, por fim, permitiu gerar um modelo referencial para desenhar a massa conceitual no Revit, no entanto, não atendeu a expectativa de integrar diretamente o modelo em design algorítmico para exportação por massa conceitual – CAD 3D.

4.1.2 Modelo por elementos construtivos

Outra forma testada e também aceita para simulação foi a produção de elementos construtivos no lugar de massas conceituais. Os elementos construtivos são facilmente gerados no Dynamo. Desse modo, ao invés de gerar modelos CAD 3D, desenvolveu-se no design algorítmico do Dynamo uma alternativa de produção de nós por elementos construtivos como *Wall* e *Floor*. Esse modo, por sua vez, foi efetivo e produziu uma volumetria 3D automatizada, sem que houvesse a necessidade de desenhar manualmente elementos após o modelo referencial produzido no Dynamo (Figura 31).

Figura 31 – Volume de elementos construtivos gerados de forma automatizada.

Fonte: elaborado pelo autor.

No Revit foi possível observar que as paredes foram locadas pelo seu eixo central (Figura 32), gerando a mesma caracterização de área e perímetro que o modelo em massa conceitual. No caso de exportação para um modelo BEM, significa que nos dois modos as zonas térmicas têm as mesmas características geométricas.

Figura 32 – Caracterização de paredes no Revit após geração pelo Dynamo com centro de parede no eixo das linhas de referência (azul).

Fonte: elaborado pelo autor.

O maior obstáculo no processo de design algorítmico por elementos construtivos é a denominação antecipada da composição dos próprios elementos construtivos. É necessário que o usuário já insira uma composição para paredes e lajes no Dynamo através de uma janela suspensa de elementos existentes no arquivo-base do Revit. A janela suspensa, criada no Dynamo, possui todos os elementos do Revit. A cada elemento construtivo de parede ou laje novos criados no Revit, a janela suspensa do Dynamo também atualiza sua biblioteca (Figura 33).

Figura 33 – Famílias de paredes no Revit (a) e opções de paredes na janela suspensa do Dynamo (b).

Fonte: elaborado pelo autor.

4.2 Análise dos modelos pelo Euclid

A forma mais usual de simular a edificação produzida no Revit é exportar o modelo 3D para o EnergyPlus através de formatos de arquivo em DWG, DXF, SAT ou STL e posteriormente importá-lo em algum *software* de modelagem 3D que trabalhe com simuladores do EnergyPlus. No capítulo do método foram apresentados os formatos STL e DWG para importação no SketchUp e conversão de modelo CAD 3D para modelo BEM. Nas seções seguintes serão apresentados os resultados das modelagens e simulações de cada formato, apontando as diferenças ao final.

4.2.1 Modelo STL

A exportação direta do Dynamo para o Euclid dentro do Sketchup foi um processo de inúmeros erros, gerando diversas tarefas manuais. A geometria do modelo estava com medidas aproximadas para números inteiros no eixo Z entre níveis de pavimentos – que estava estipulado em 3,24 m no Dynamo – existindo somente as distâncias de 3,00 m e 4,00 m. A altura total não condizia pois também havia sido aproximada para um número inteiro. Os eixos X e Y, apesar de possuírem as faces

verticais (paredes) em alguns casos com medidas decimais, também apresentavam distorções em relação ao Dynamo (Figura 34). O modelo teve de ser redesenhado no próprio SketchUp, tornando pouco aproveitável o uso do modelo STL entre Dynamo e SketchUp.

Figura 34 – Distorções de dimensões da geometria do a) Dynamo (visualização em Revit) para o b) Sketchup via exportação em STL.

Fonte: elaborado pelo autor.

As adequações geométricas foram expressivas ao ponto de o tempo utilizado ser próximo de uma modelagem iniciada em um arquivo vazio no próprio SketchUp. Foi necessário excluir também o plano do terreno que foi importado juntamente com o restante da volumetria. Como um programa CAD 3D não faz diferenciação entre elementos que compõem uma geometria para simulação termonenergética e outros elementos, quaisquer faces adicionais tiveram de ser excluídas.

Para a conversão do modelo CAD 3D em um modelo BEM, criaram-se zonas térmicas e os volumes geométricos foram copiados e colados um a um para cada zona criada. Durante o desenvolvimento do modelo BEM, após salvamento, fechamento e reabertura do arquivo, algumas zonas térmicas foram perdidas, havendo necessidade de novas reparações (Figura 35). Outros componentes estavam deslocados de seus pontos originais e tiveram de ser excluídos ou relocados novamente das posições que pertenciam. Esses ajustes, apesar de não serem complexos, tomavam tempo do procedimento de conversão CAD para BIM.

Figura 35 – Modelo em processo de ajustes após abertura de arquivo salvo.

Fonte: elaborado pelo autor no SketchUp 2018.

O modelo também não possuía orientação solar conforme as informações instruídas no BIM. Esse ajuste foi realizado dentro do SketchUp através da importação do entorno pela ferramenta *Geo-Location* na barra *Model Info*, inserindo a localização via imagem de satélite do Google Earth e posterior giro do modelo para correta orientação com o norte geográfico (Figura 36).

Figura 36 – Ajuste de geolocalização do modelo em SketchUp.

Fonte: elaborado pelo autor no SketchUp 2018.

Os processos de indicação de troca térmica entre zonas térmicas também precisaram ser realizados manualmente, pois como o arquivo importado tinha apenas informações geométricas, as informações térmicas eram inteiramente configuradas durante os ajustes de modelagem. O Euclid, assim como o antigo OpenStudio Legacy, também possui algumas limitações dentro do ferramentário do SketchUp. Não era possível criar grupos ou fazer multiplicação de zoneamentos em um só comando, sendo necessário copiar e colar zonas térmicas independentes uma a uma. As vantagens trazidas pela modelagem CAD 3D do SketchUp não funcionaram em sua totalidade para a modelagem BEM, tornando o procedimento ainda mais manual.

As cargas térmicas da modelagem BEM foram definidas conforme os padrões estabelecidos no painel de configuração de energia do Revit. Para adaptar ao Euclid, assim como nos materiais, os ajustes foram realizados pelo arquivo IDF (Figura 37).

Figura 37 – Ajuste de cargas térmicas no modelo.

Fonte: elaborado pelo autor no Euclid através do SketchUp 2018.

Com o término da modelagem do arquivo BEM, foram geradas as simulações. Durante o processo diversos erros severos e de advertência (*severe error* e *warning*) foram encontrados nos resultados. Novos ajustes foram realizados para que os dados de entrada estivessem corretos. Um dos erros encontrados foi o preenchimento que o Euclid realizou na aba *Site:Location*, onde a linha de Latitude ficou em branco e os demais dados desceram para as linhas seguintes, gerando erro na simulação (Figura 38).

Figura 38 – Erro de informação em *Site:Location* do EnergyPlus após o arquivo IDF ser gerado.

Field	Units	Obj1
Name		Sao Paulo
Latitude	deg	0
Longitude	deg	-23.59275
Time Zone	hr	-46.681167
Elevation	m	-3

Fonte: elaborado pelo autor através do editor IDF do EnergyPlus.

As trocas térmicas entre superfícies também apresentaram falhas, exigindo readequações dentro do próprio modelo BEM no Euclid. Mesmo existindo a ferramenta *Match Surfaces*, algumas faces adjacentes não estavam conformadas para realizar trocas térmicas, o que obrigou a um novo trabalho manual de configuração dessas faces para trabalharem em conjunto posteriormente na simulação. Essa etapa, de execução simples, tomou um novo tempo considerável para ajustes, demonstrando os exaustivos problemas de interoperabilidade entre modelagens CAD e BEM.

Quando houve os ajustes, as advertências e erros severos de simulação puderam ser superados e a simulação pôde ocorrer dentro da normalidade. Foram gerados os resultados das temperaturas médias do pavimento-térreo, tipo e cobertura para análise (Figura 39).

Figura 39 – Resultado da simulação do modelo STL.

Fonte: elaborado pelo autor.

4.2.2 Modelo DWG

O modelo CAD 3D por DWG foi exportado do Revit a partir do modelo de massa conceitual gerado. Esse modelo de massa conceitual, redesenhado a partir do modelo SAT do Dynamo, continha faces de paredes, janelas, brises, lajes e cobertura, os cinco elementos básicos para modelos BEM. Ao ser importado, porém, para o SketchUp no formato DWG, as janelas não foram reconhecidas, exibindo somente o volume de paredes, lajes, proteções solares e cobertura (Figura 40). Essa falha foi reparada desenhando-se todas as janelas manualmente com as ferramentas do SketchUp.

Figura 40 – Modelo DWG importado no SketchUp sem janelas.

Fonte: elaborado pelo autor no SketchUp.

A conversão do modelo CAD 3D em um modelo BEM foi idêntica aos processos do modelo STL. As condições de contorno também foram equivalentes e gerou-se um modelo BEM com os mesmos dados de entrada de simulação que a proposta em formato STL. Os resultados da simulação, por fim, igualaram-se aos do modelo STL conforme a Figura 39 já apresentou anteriormente.

4.2.3 Considerações finais da modelagem STL e DWG

As duas formas de interoperabilidade entre o modelo BIM para o modelo BEM apresentaram bastante processos manuais. Entretanto o processo de exportação do modelo DWG do Revit para o SketchUp não apresentou falhas geométricas no momento de conversão para o modelo BEM do Euclid. A exportação via Revit, ainda em caráter de CAD 3D, apresentou mais precisão do que a exportação de CAD 3D via Dynamo. O formato STL limitou algumas definições de modelagem geométrica, o que o tornou inaproveitável para exportação direta à simulação termoenergética computacional.

Os resultados das simulações não apresentaram diferença na temperatura média das zonas térmicas em razão das condições de contorno serem iguais durante o desenvolvimento do modelo BEM.

4.3 *Análise dos modelos pelo Insight*

A proposta de exportação ocorreu diretamente do Revit (BIM) para o Insight (BEM) a fim de testar uma alternativa com uma menor quantidade de erros de interoperabilidade. Os testes verificaram a interoperabilidade por modelo de massa conceitual e por modelo de elementos construtivos.

O modelo por massa conceitual apresentou inúmeras vantagens para uma etapa inicial de projetos de empreendimentos. A simplificação do modelo em faces sem espessura, comuns na prática da simulação termoenergética computacional, auxiliou em uma rápida geração da forma e suas configurações de condições de contorno. O processo associado ao design algorítmico agilizou na tomada básica de concepção inicial de uma edificação para um empreendimento. O maior desafio dessa estratégia esteve na carência de uma criação direta de massa conceitual no Revit a partir do Dynamo. O uso de modelos SAT para a interoperabilidade contribuiu para reduzir esse problema, contudo ainda ficou demonstrada uma brecha a ser solucionada entre os dois programas.

O uso do modelo por elementos construtivos para simulação termoenergética demonstrou ser uma alternativa mais compreensível a arquitetos e engenheiros habituados ao uso do Revit. Esse recurso aproxima a utilização de ferramentas de parede e pisos com o sentido de propriedades térmicas pois, ao se verificar as propriedades de brilho, textura e cor, típicas na busca pela composição dos elementos construtivos, as propriedades térmicas estão presentes juntamente na caixa de diálogo (Figura 41). Todavia essa modelagem torna a etapa inicial do estudo de viabilidade mais construtiva do que conceitual, o que pode por vezes tornar a etapa exageradamente determinante à vista dos que projetam. As análises e resultados gerados nesse meio foram, ainda assim, relevantes na prova do uso do BIM como integrador do design algorítmico à análise energética.

Figura 41 – Propriedades dos materiais utilizados no Revit.

Fonte: elaborado pelo autor através do Revit.

4.3.1 Modelo por massa conceitual

Assim como na exportação para DWG, a concepção da massa conceitual no Revit para simulação termoenergética também teve de usar a inserção de modelo SAT gerado pelo Dynamo. Esse trabalho manual, apesar de simples em sua resolução, poderia poupar um eventual erro de importação e de remodelagem. Logo, essa etapa exigiu mais atenção na operação de redesenho, especialmente quanto aos alinhamentos entre o modelo referencial SAT e o modelo de massa conceitual desenhado sobre ele. Para simplificar a tarefa, utilizou-se a ferramenta *Align* na aba *Modify* da guia *ribbon* que permite alinhar as faces de qualquer forma de massa conceitual com o modelo SAT.

Após as configurações de energia conforme apresentadas no capítulo Método, o modelo BEM estava preparado para simulação. O processo ocorreu de forma simplificada e sem erros, um fato diferenciado em relação aos inúmeros ajustes e retrabalhos que a conversão de modelos 3D costuma causar nos programas de

simulação termoenergética como no caso já apresentado aqui na modelagem do SketchUp para o Euclid.

O arquivo gerado pelo Insight e exportado ao EnergyPlus foi aberto no editor IDF para verificação das configurações gerais. Na abertura do arquivo foi notada a versão 8.5.0 do EnergyPlus que o Insight utilizou para exportação. Foi realizada conversão para a versão 8.7.0 para que houvesse compatibilização com EnergyPlus usado na presente pesquisa através do *IDF Version Updater*, localizado dentro do próprio EnergyPlus (Figura 42).

Figura 42 – Conversão da versão 8.5.0 para 8.7.0 do arquivo do EnergyPlus.

Fonte: elaborado pelo autor através do EnergyPlus.

A exportação do modelo do Insight para o EnergyPlus atendeu as expectativas com um modelo BEM sem erros de geometria e de cargas térmicas. Os materiais e elementos construtivos, por sua vez, também estavam todos modelados e integrados entre si, porém, as propriedades não condiziam com os valores adotados na opção *Schematic Types* escolhida durante as configurações de energia do Revit. O modelo tinha de ser, desse modo, ajustado para as configurações de materiais após a simulação no Insight, o que significava realizar tarefas no próprio editor do IDF.

Por motivos de verificação dos dados gerados diretamente pelo Insight, excluiu-se essa tarefa de ajustes para observação das diferenças de valores em relação às demais simulações que serão comparadas ao final desse capítulo.

Dessa forma, os resultados da simulação gerada foram a baseada no modelo direto do Insight, sem ajustes de materiais. As zonas térmicas dos pavimentos térreo, tipo e cobertura mostraram semelhanças nas temperaturas médias mensais, havendo uma ligeira variação maior na cobertura em virtude de estar mais exposta ao ganho de calor pelo telhado (Figura 43).

Figura 43 – Temperatura das zonas do modelo por massa conceitual.

Fonte: elaborado pelo autor.

4.3.2 Modelo por elementos construtivos

Como dito anteriormente, o uso de modelos BEM por elementos construtivos para simulação se apresenta como uma forma mais próxima da realidade dos modelos BIM utilizados por arquitetos e engenheiros. Dentro das propriedades dos próprios elementos construtivos pode-se criar e modificar parâmetros que influenciam no desempenho termoenergético das edificações. Essas vantagens, no entanto, não foram acompanhadas de resultados confiáveis nos modelos após a simulação.

No processo de modelagem sucedida no Dynamo e aplicada aos elementos construtivos, a volumetria foi gerada no Revit sem falhas. Notou-se que o modelo ficou mais robusto e tornou o manuseio do volume 3D mais lento em relação à massa conceitual. Sucessivos atrasos de comunicação ocorreram, mas não houve problemas de processamento ou erros fatais que fechassem o programa. Após as condições de contorno terem sido configuradas, o modelo BEM foi criado e enviado para o servidor da Autodesk.

O arquivo IDF extraído do portal do Insight foi baixado para análise no EnergyPlus e convertido à versão 8.7.0. A complexidade geométrica do modelo por elementos construtivos apresentou bastante diferença do modelo por massa conceitual. Enquanto no modelo por massa conceitual a quantidade de faces de construção (*Building Surface*) e de faces de aberturas (*Fenestration Surface*) foram de 187 e 56 respectivamente, no modelo de elementos construtivos essa composição resultou em 967 faces de construção e 896 faces de aberturas. A simulação computou o mesmo número de faces de sombreamento (*Shading*) em ambos os modelos, mas as faces de sombreamento do modelo por elementos construtivos ficaram distorcidas em sua profundidade com um espaçamento entre a fachada e as proteções solares. O nível de detalhamento mais apurado da geometria também tornou o modelo de elementos construtivos mais lento para abertura no Euclid. Além da notável quantidade de faces encontradas no modelo BEM, a conversão do arquivo trouxe inúmeras distorções e erros nas janelas e paredes (Figura 44). Apesar disso, o envoltório se manteve em suas medidas externas (largura, comprimento e altura) conforme os resultados volumétricos gerados a partir do Dynamo, confirmando a centralização dos elementos construtivos nos eixos referenciais de faces de modelos BEM.

Figura 44 – Modelo por elementos construtivos aberto no Euclid.

Fonte: elaborado pelo autor no Euclid e SketchUp.

Notou-se também que no contorno das janelas foram encontrados trechos de faces de paredes em uma tentativa do programa de conversão da união construtiva dos elementos em uniões de faces por arestas e vértices adjacentes (Figura 45).

Comumente nos modelos BEM do EnergyPlus as paredes são inteiramente desenhadas com a inclusão de aberturas dentro das faces das paredes, gerando um polígono inscrito sob outro, sempre com afastamento entre as arestas dos polígonos. Esses detalhes nas janelas, portanto, foram provenientes da conversão dos elementos construtivos das janelas do BIM em faces de janelas do BEM, o que gerou um acréscimo de centenas de faces de paredes em relação ao modelo de massa conceitual.

Figura 45 – Detalhe das faces de aberturas do modelo BEM no Euclid.

Fonte: elaborado pelo autor no Euclid e SketchUp.

As condições de contorno se mostraram parcialmente coerentes no arquivo IDF. Apesar das distorções de geometria nos elementos construtivos, os modelos de HVAC, as cargas térmicas, a geolocalização e orientação solar e os *Schedules* foram idênticas ou semelhantes aos de massa conceitual. As propriedades térmicas dos materiais não condiziam com a escolha de *Schematic Types* sobrepostas aos materiais do modelo no painel de energia do Revit. Essas propriedades estavam associadas aos elementos construtivos padrões do Revit, adotados na própria biblioteca de famílias do programa.

A simulação a partir do EnergyPlus ocorreu com vários erros severos e advertências. Os erros severos foram apontados como falhas de uniões das faces de sombreamento, possivelmente oriundo das tentativas de conversão dos elementos construtivos em faces para o modelo BEM, semelhante à também mencionada

distorção das paredes e janelas. Para corrigir o erro, as faces tiveram de ser ajustadas, limpando o excesso de arestas que poluíam o modelo e algumas dimensões dos elementos construtivos para que se alcançasse a mesma qualidade geométrica do modelo por massa conceitual.

4.3.3 Considerações finais da modelagem por massa conceitual e por elementos construtivos

A modelagem realizada no Dynamo mostrou maior capacidade para trabalhar elementos construtivos no Revit. Apesar de ser possível a criação de massas conceituais diretas pelo Dynamo ao Revit, ainda foi necessário um processo de interoperabilidade em formato SAT para desenvolvimento de massas a serem utilizadas como modelos analíticos de energia. O desenvolvimento automatizado de estudos de massa para etapas iniciais ainda poderia sofrer aperfeiçoamento do próprio programa, o que tornariam mais proveitosas as situações de projeto como esta.

A produtividade da modelagem manual em Revit foi bastante funcional ao serem utilizados arquivos SAT como modelos de referências para os desenhos, não havendo falhas ou limitações durante o processo.

As configurações do painel de energia do Revit tiveram um processo de tratamento semelhante entre os dois modelos. As cargas térmicas e os modelos de HVAC adotados tiveram a mesma origem do painel de energia. Em contrapartida o modelo por massa conceitual utilizou as propriedades térmicas dos materiais pré-definidos do painel de energia e o modelo por elementos construtivos foi determinado pelas próprias famílias dos Revit

O resultado do arquivo IDF gerado pelo Insight apresentou maior coerência final nos modelos de massa conceitual, uma vez que a semelhança geométrica entre o modelo de massa conceitual e o modelo BEM eram maiores se comparados ao modelo por elementos construtivos. A dificuldade de conversão de elementos construtivos parametrizados para faces de modelos BEM esteve relacionada principalmente às uniões construtivas. Enquanto o modelo de massa conceitual não possuía qualquer tipo de parametrização de vínculo construtivo como, por exemplo, o assentamento do marco de uma janela a uma parede de alvenaria, o modelo por elementos construtivos realizava essas tarefas entre todas as uniões de diferentes

categorias de construção, gerando uma informação adicional a ser trabalhada na simplificação da geometria para modelos BEM. A Figura 46 apresenta dois desses processos recorrentes em diferenças de conversões, com a relação de vínculo entre as janelas e as paredes e a relação entre as paredes e as proteções solares.

Figura 46 – Diferença do resultado de geometrias em modelo BEM a partir dos modelos de massa conceitual (a) e de elementos construtivos (b).

Fonte: elaborado pelo autor no Euclid e SketchUp.

Essas observações podem ser resumidas em algumas sentenças, as quais põem à prova as diferenças entre os modelos:

1. O processo de modelagem por elementos construtivos é mais automatizado que a modelagem por massas conceituais no Dynamo;
2. A modelagem por massa conceitual exige um arquivo de referência gerado pelo Dynamo para que se desenhe o modelo BIM que é convertido em modelo BEM;
3. As falhas mais recorrentes de conversão de modelos por elementos construtivos em modelos BEM estão associadas à complexidade dos vínculos construtivos parametrizados;
4. De forma geral, para etapas iniciais de projeto, é mais proveitoso utilizar o processo de concepção em massas conceituais, mesmo que o processo entre design algorítmico e modelo de massa conceitual demande mais processos manuais de modelagem.

4.4 Comparativo entre os modelos

Os testes realizados demonstraram algumas ordenações entre os modelos onde a complexidade de informações nem sempre resultou na mesma proporção que a qualidade de informações. Em determinadas situações de projeto um modelo complexo de informações parametrizadas pode resultar na poluição de dados que não sintetize a sua correta seleção para um uso. Pelo contrário, este excesso de informações pode tornar o processo de seleção de dados confuso à medida que uma modelagem mais simplificada poderia ser mais eficiente nos resultados.

As quatro formas de modelagem aqui discutidas mostraram diferentes comportamentos em distintos momentos. A simplicidade do modelo CAD 3D não representou, em todos os casos, uma inferioridade de uso em relação ao modelo BIM. A quantidade menor de informações do arquivo DWG em relação ao modelo BIM de elementos construtivos pôde, no âmbito da geometria para simulação termoenergética computacional, ser mais coerente. Por outro lado, houve a necessidade de serem modeladas as condições de contorno, tarefa mais trabalhosa quando executada entre programas não integrados.

4.4.1 Geometria

A análise da geometria dos modelos demonstrou que para a simulação termoenergética computacional uma maior complexidade de modelo não representa necessariamente uma maior precisão de resultados.

A interoperabilidade dos modelos nas dimensões de geometria apontou para inconsistências no modelo STL e de elementos construtivos. O modelo STL resultou em erros por haver aproximações de dimensões de números decimais para dimensões de números inteiros. Para o modelo de elementos construtivos a principal causa ocorreu nos elementos internos do envoltório, especialmente como já citado nos pontos de união das diferentes categorias de construção. O modelo DWG e o modelo de massa conceitual foram fieis na sua finalidade, não acarretando em erros dimensionais.

A simplificação da geometria esteve presente nos modelos STL, DWG e de massa conceitual. Os modelos STL e DWG, por serem de origem CAD, puderam manter sua simplicidade geométrica de origem no SketchUp. O modelo de massa

conceitual, pela sua pouca complexidade no Revit, assemelhando-se a um modelo CAD 3D, obteve a mesma qualidade de simplificação que os modelos CAD. O modelo de elementos construtivos, por sua complexidade geométrica focada em uma representação mais realística de uma edificação, gerou cinco vezes mais faces de paredes e cobertura e dezesseis vezes mais faces de janelas do que os demais modelos.

Os modelos BIM se diferenciaram dos modelos CAD na interoperabilidade de existência de todos os elementos geométricos. Os modelos STL e DWG careceram de janelas no momento da importação dos arquivos enquanto os modelos BIM vieram em sua totalidade. No caso do modelo de elementos construtivos, as janelas, paredes e proteções solares vieram distorcidas, mas todas estiveram inclusas.

Apesar de não ser uma consequência direta da interoperabilidade, em alguns momentos os modelos salvos em IDF no Euclid, quando reabertos, apresentaram falhas. Os modelos oriundos de CAD careceram de algumas paredes, janelas e proteções solares, normalmente vinculados a uma zona térmica, o que representam erros possivelmente também relacionados à conversão de CAD 3D em modelo BEM durante a transição dentro do SketchUp.

De forma geral, os modelos BIM representaram maior consistência nos resultados de interoperabilidade para o processo de conversão em modelo BEM (Tabela 9). O modelo de massa conceitual atingiu o melhor desfecho, obtendo uma avaliação favorável em todos os critérios de geometria verificados. Esse fato conduz à hipótese de que as ferramentas de modelagem para massa conceitual aprimoradas ao longo do tempo puderam gerar processos mais confiáveis de interoperabilidade entre BIM e BEM.

Tabela 9 – Resumo dos modelos geométricos.

Item	CAD		BIM	
	STL	DWG	Massa conceitual	Elementos construtivos
Dimensões corretas em relação ao modelo gerado pelo Dynamo	Não	Sim	Sim	Não
Simplificação da geometria	Sim	Sim	Sim	Não
Existência de todos os elementos geométricos	Não	Não	Sim	Sim
Inexistência de erros após salvamentos	Não	Não	Sim	Sim

Fonte: elaborado pelo autor.

4.4.2 Configurações de simulação

A possibilidade de trabalhar em várias especialidades diferentes torna o BIM uma plataforma mais multifuncional em relação ao CAD. Essas distinções foram reforçadas durante a análise de interoperabilidade entre BEM e as plataformas CAD e BIM. Nas configurações para simulação termoenergética computacional, os modelos BIM atenderam todas as condições de contorno, já configuradas antes da exportação para o Euclid. Os modelos CAD, por serem arquivos de uso restritamente geométrico, precisaram ser integralmente modelados em suas configurações para simulação.

A geolocalização, que auxilia na simulação da geometria solar em torno da edificação simulada, ocorreu sem erros nos dois modelos BIM. As coordenadas geográficas inseridas no Revit foram integralmente transmitidas ao arquivo IDF. Nos modelos CAD todo o volume 3D gerado não continha um ponto específico dentro do eixo XYZ assim como o giro do modelo referente à orientação solar. Todo esse processo foi descrito novamente no Euclid.

As zonas térmicas dos arquivos CAD foram a tarefa mais trabalhosa a se detalhar na modelagem da edificação enquanto em BIM vieram totalmente configuradas. A definição de trocas térmicas entre faces adjacentes de zonas distintas tomou considerável tempo, especialmente por exigir muita atenção em quais superfícies já haviam recebido a definição de troca térmica (*Outside Boundary Condition*). Na plataforma BIM, todas essas tarefas haviam sido realizadas por computador durante a exportação do Revit para o Insight. A maior dificuldade de trabalhar com zonas térmicas automatizadas foi a inserção automática de nomenclaturas genéricas para esses componentes, tornando-os de difícil compreensão quanto ao pavimento e característica da zona.

Mesmo com a inclusão por modelos padrões do Euclid, a inserção manual de *Schedules* aos modelos CAD foi uma tarefa de complexa integração. Com padrões limitados oferecidos pelo Euclid, editar a programação de uso e ocupação da edificação estudada exigiu em alguns momentos inúmeras ações de ida e volta entre modelagem e simulação. O maior desafio não esteve em entender qual *Schedule* adotar, mas em configurar a *Schedule* sem receber mensagens de erros severos ou advertências no EnergyPlus. Os modelos BIM, de iguais complexidades na formatação das *Schedules*, eram mais simples de serem configurados por já adotarem

padrões definidos pela ASHRAE. A fidelidade das *Schedules* no BIM se manteve sem mensagens de erros severos ou advertências.

As cargas térmicas, de modelagem simples, mesmo não existindo em arquivos CAD, não apresentaram dificuldades para configuração no Euclid. Entretanto, o fato de existirem modelos padrões e a possibilidade de preenchimento manual nos modelos BIM também os tornaram mais flexíveis e ágeis no preenchimento das informações.

A configuração de modelos de HVAC é uma das partes mais complexas de serem realizadas, especialmente na interoperabilidade CAD e BEM, uma vez que essa definição envolve diversas diretrizes como a programação de termostatos, o sistema de funcionamento do equipamento escolhido e a programação junto à modelagem das *Schedules*. No Euclid essa configuração é limitada, sendo necessário ter arquivos padrões externos para inserção direta no EnergyPlus. Além disso esse dimensionamento também exige um domínio mínimo de climatização, especialidade executada na maior parte das vezes por engenheiros mecânicos. Mesmo no painel de configurações de energia do Revit, havia diversos modelos pré-configurados de nomenclatura semelhante. Para as definições em BIM, apesar da existência dos padrões, havia igual necessidade de conhecimento sobre essa área de estudo.

Os materiais foram totalmente modelados nas configurações dos arquivos importados em CAD. As propriedades podiam ser determinadas no Euclid, o que facilitou as escolhas. No entanto esses modelos não possuíam variações e não havia como tomar conhecimento das propriedades térmicas sem que se verificasse o arquivo IDF. Nos materiais para BIM, havia diversas opções de escolha, podendo ser pelas famílias de elementos construtivos existentes no projeto quando era realizado por modelo de elementos construtivos ou por *Conceptual Types* e *Schematic Types*, em ambos os tipos de modelos BIM.

A definição das condições de contorno para simulação termoenergética computacional apresentaram diversas diferenças de interoperabilidade dos sistemas CAD e BIM para a modelagem BEM. Como apontado, mesmo em meio a alguns desafios de configuração para simulação a partir do BIM, a ferramenta tem mostrado um avanço significativo no projeto de edificações, utilizando do design computacional como forma de automatizar e integrar diferentes especialidades. O resumo dessas definições de condições de contorno de CAD e BIM está esquematizado na Tabela 10.

Tabela 10 – Resumo de modelagem para configurações de simulação.

Item	CAD		BIM	
	STL	DWG	Massa conceitual	Elementos construtivos
Geolocalização	Não	Não	Sim	Sim
Zonas térmicas	Não	Não	Sim	Sim
<i>Schedules</i>	Não	Não	Sim	Sim
Cargas térmicas	Não	Não	Sim	Sim
Modelos de HVAC	Não	Não	Sim	Sim
Propriedades térmicas dos materiais	Não	Não	Sim	Sim

Fonte: elaborado pelo autor.

4.5 Análises gerais

A modelagem paramétrica associada à simulação termoenergética computacional apresentou resultados interessantes à prática profissional de arquitetos e engenheiros voltados a empreendimentos imobiliários, neste caso em especial, a uma edificação de escritório. Os *softwares* BIM estudados aqui, da Autodesk, mostraram desempenho satisfatório para a proposta da pesquisa, apesar dos erros de interoperabilidade constatados entre modelos BIM de elementos construtivos e modelos BEM. No entanto, o uso da modelagem paramétrica, iniciando-se do design algorítmico até a simulação termoenergética computacional, provou ser viável na aplicação de modelos BIM por massa conceitual. Ainda se notou a necessidade de aperfeiçoamento no processo, especialmente entre a integração de modelagem de massas conceituais do Dynamo com o Revit.

Outro fator que se destacou durante a pesquisa foi a possibilidade de definição das condições de contorno. O Revit possui uma biblioteca razoável de modelos de HVAC e materiais para exportação de modelo BEM a partir de modelos de massa conceitual. Contudo a possibilidade de configurar os próprios modelos ampliaria o uso do programa, especialmente em casos de contextos que fogem ao padrão determinado pela biblioteca do Revit.

A discussão sobre modelagens mais personalizadas nas condições de contorno do Revit vem ocorrendo em fóruns do próprio portal da Autodesk. Em uma dessas discussões foi debatida a personalização de materiais de janelas de

Schematic Types para modelagem para simulação computacional (AUTODESK, 2014b). Essa configuração ocorre fora do uso convencional do programa e não é exibida de forma clara ao usuário. No diretório de instalação do Revit há o arquivo *Constuctions.xml* que exhibe todas as propriedades térmicas dos materiais utilizados no painel de configurações de energia (C:\Program Files\Autodesk\Revit 2018\en-US\Constructions.xml). Esse arquivo XML pode ser editado em forma algorítmica, o qual posteriormente é aberto no Revit (Algoritmo 1).

Algoritmo 1– Proposta de inserção de propriedades térmicas para janelas no arquivo *Constructions.xml* no diretório de instalação do Revit.

```
<WindowType id= {Unique ID} openingType="FixedWindow">
  <Name> {Unique Name}</Name>
  <Description> {Custom Description }</Description>
  <U-value unit="WPerSquareMeterK"> {Custom Value}</U-value>
  <SolarHeatGainCoeff unit="Fraction" solarIncidentAngle="0"> {Custom Value}</SolarHeatGainCoeff>
  <SolarHeatGainCoeff unit="Fraction" solarIncidentAngle="40"> {Custom Value}</SolarHeatGainCoeff>
  <SolarHeatGainCoeff unit="Fraction" solarIncidentAngle="50"> {Custom Value}</SolarHeatGainCoeff>
  <SolarHeatGainCoeff unit="Fraction" solarIncidentAngle="60"> {Custom Value}</SolarHeatGainCoeff>
  <SolarHeatGainCoeff unit="Fraction" solarIncidentAngle="70"> {Custom Value}</SolarHeatGainCoeff>
  <SolarHeatGainCoeff unit="Fraction" solarIncidentAngle="80"> {Custom Value}</SolarHeatGainCoeff>
  <SolarHeatGainCoeff unit="Fraction"> {Custom Value}</SolarHeatGainCoeff>
  <Transmittance unit="Fraction" type="Visible"> {Custom Value}</Transmittance>
</WindowType>
```

Fonte: Autodesk (2014b).

Ainda em paralelo aos resultados obtidos, destaca-se uma convergência aos estudos de Queiróz (2016) que apontou diversos benefícios na integração direta entre Revit e EnergyPlus pelo modelo de massa conceitual, aqui também confirmadas. A eliminação de ferramentas auxiliares para interoperabilidade entre BIM e BEM tem aperfeiçoado o sistema de simulação termoenergética computacional e ampliado as possibilidades de desenvolvimento de processos mais harmônicos para essa área profissional. Com o advento do Insight 360, uma evolução à plataforma do Green Building Studio, a totalidade desses estudos têm se confirmado à medida que os arquivos exportados do Insight têm sido abertos no EnergyPlus com uma razoável confiabilidade.

Por fim, a pesquisa trouxe a discussão do uso de design algorítmico relacionado ao BIM e BEM, demonstrando que dos quatro modelos trabalhados – STL, DWG, modelo de massa conceitual e modelo de elementos construtivos – o modelo por massa conceitual definiu o processo mais adequado. O resumo final da pesquisa pode ser compreendido na Figura 47.

Figura 47 – Fluxograma das alternativas pesquisadas entre design algorítmico, BIM, CAD e BEM.

Fonte: elaborado pelo autor.

5 Conclusões

O design computacional tem apresentado grande relevância no projeto de edificações. Com o desenvolvimento de computadores mais sofisticados e ferramentas computacionais mais integradas, as etapas de projeto vêm se tornando mais eficientes. Nas etapas iniciais, o aperfeiçoamento de *softwares* nos últimos anos sinaliza para um trabalho mais colaborativo e intuitivo, mesmo com um ferramentário cada vez mais preciso e que possui a capacidade de trazer mais informações que a tecnologia já superada. A responsabilidade do profissional acaba, consequentemente, aumentando com a possibilidade de gerar novas soluções de projetos para os problemas existentes da construção civil.

Nesta pesquisa, a revisão bibliográfica levantou assuntos relacionados ao uso da computação no processo de projeto, especialmente nas etapas iniciais. Abordou também o estado da arte da eficiência energética em edificações no Brasil, visando compreender como se encontra o panorama desse nicho no país. Por fim, discutiu o uso da computação para a eficiência energética, tratando principalmente da simulação termoenergética computacional e da otimização baseado em simulação. Entende-se que a revisão de literatura na área do design computacional é uma das mais dinâmicas no setor tecnológico e logo mais diversas novas temáticas surgirão para aplicação em edificações. Desse modo, a revisão aqui apresentada percorreu do momento em que se encontravam as problemáticas abordadas na pesquisa, mas tampouco será suficiente na continuidade de outras pesquisas relacionadas logo a frente.

O método abordou uma proposta para atingir uma nova forma de projetar edificações com análise termoenergética nas etapas iniciais. Seria interessante dar continuidade à pesquisa com conteúdos relacionados a mais estudos de caso e adaptação às normativas brasileiras, especialmente a NBR 15.575, a NBR 15.220 e à etiqueta nacional de conservação em energia, mas entende-se que a pesquisa tomou um rumo a essas realizações.

Ao final os resultados demonstraram que, mesmo diante das limitações e possibilidades de avanços da plataforma BIM, os modelos CAD foram pouco aproveitáveis em sua totalidade para integração do design algorítmico à simulação termoenergética computacional propostos. Geraram arquivos de baixa confiabilidade para exportação geométrica e nenhuma viabilidade de configurações de energia. O BIM atingiu uma confiabilidade razoável, especialmente o modelo por massa

conceitual que exportou os dados geométricos e de configurações de energia de forma plena, sem erros severos e com poucas advertências na simulação do EnergyPlus. Compete ainda, porém, um avanço maior no desenvolvimento de uma biblioteca de materiais no Revit para modelos de massa conceitual, com a alternativa de desenvolvimento dos próprios materiais, sem a necessidade da dependência de modelos de elementos construtivos.

5.1 *Limitações do trabalho*

Durante a elaboração deste trabalho foram encontradas algumas limitações devido às restrições dos *softwares* utilizados, sendo elas:

- Carência de recursos para modelagem de massa conceitual no Dynamo;
- Ausência de uma biblioteca de materiais utilizados no Brasil para simulação termoenergética computacional a partir do Insight. Os dados, nem sempre condizentes com a realidade brasileira, precisam ser ajustados após a simulação no Insight;
- Imprecisão de interoperabilidade entre BIM e BEM. Os recursos para integrar o processo ocorrem com qualidade entre massa conceitual e modelo de energia. Entretanto ao se adicionar elementos construtivos existem dificuldades no processo de simplificação dos vínculos construtivos do modelo, reduzindo a precisão dos resultados.

5.2 *Sugestões para trabalhos futuros*

No intuito de prosseguir com investigações em modelagem paramétrica para análise termoenergética de edificações, recomenda-se para trabalhos futuros:

- a) desenvolver estudos de caso através da proposta dessa pesquisa adaptados à etiqueta nacional de conservação em energia (ENCE) do Procel Edifica;
- b) permitir a modelagem direta no Dynamo de massas conceituais, a fim de automatizar esse processo para posterior simulação termoenergética do Revit para o Insight 360 e outros simuladores;

- c) aprimorar a estrutura do Dynamo de automatização de modelos tridimensionais aplicado a índices construtivos de legislações específicas de diversas cidades brasileiras;
- d) ajustar os materiais padrões do Insight 360 para a realidade brasileira, a fim de facilitar o processo de análise energética por este programa;
- e) desenvolver uma biblioteca padrão de elementos construtivos brasileiros no Revit com suas respectivas propriedades térmicas a partir de dados testados de fornecedores no país;
- f) desenvolver OBS entre o Dynamo e simuladores de forma a apresentar variações de materiais, PAFs, elementos de proteção solar e outras variáveis para obter mais opções de escolha de projetos de edificações;
- g) comparar o método desta pesquisa entre Dynamo, Revit e Insight 360 com programas paralelos como o conjunto Grasshopper, Archicad e EcoDesigner Star.

Referências

ABNT. **NBR 13531 - Elaboração de projetos de edificações - Atividades técnicas.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 10 p., 1995.

ABNT. **NBR 15220-3 - Desempenho térmico de edificações parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 23 p., 2005.

ABNT. **NBR 15575-1 - Edifícios habitacionais - Desempenho; Parte 1: Requisitos gerais.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 60 p., 2013.

ASHRAE. **ASHRAE 90.1 - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**, 228 p., 2010.

ASL, M. R. et al. BIM-based Parametric Building Energy Performance MultiObjective Optimization. **32nd eCAADe Conference**, v. 224, p. 10, 2014.

AUTODESK. **Autodesk at AIA 2014: Project Skyscraper, Dynamo Advance The Future of BIM for Architects.** Disponível em: < <https://adsknews.autodesk.com/stories/autodesk-at-aia-2014-project-skyscraper-dynamo-advance-the-future-of-bim-for-architects>>. Acesso em: 5 mar. 2019.

AUTODESK. **How to add Analytic Construction values in Windows family.** Disponível em: <<https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products/troubleshooting/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/How-to-add-Analytic-Construction-values-in-Windows-family.html>>. Acesso em: 5 mar. 2019b.

AUTODESK. **MEP Constructions for Buildings and Spaces.** Disponível em: <http://download.autodesk.com/us/revit_mep_2016/constructions-revised.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2019.

AUTODESK. **Sample Detailed Model.** Disponível em:< <https://insight.autodesk.com/oneenergy/Sample/Model/31390>>. Acesso em: 5 mar. 2019.

AUTODESK. **Building Type Data.** Disponível em: <<https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ENU/Revit-Analyze/files/GUID-D7783A4F-2445-44B6-AD91-707348CE5130-htm.html>>. Acesso em: 18 nov. 2018b.

AUTODESK. **Building Operating Schedules.** Disponível em: <<https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ENU/Revit-Analyze/files/GUID-D7783A4F-2445-44B6-AD91-707348CE5130-htm.html>>. Acesso em: 18 nov. 2018c.

AUTODESK. **Specify the Geographic Location.** Disponível em: <<https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products/troubleshooting/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/ENU/Revit-Model/files/GUID-EE95E55A-A600-49DB-B6F0-113C239B5F1E->

htm.html>. Acesso em: 19 nov. 2018.

AUTODESK INC. **Autodesk Formit**.

AUTODESK INC. **Autodesk Insight**.

AUTODESK SUPPORT. **Ecotect Analysis Discontinuation FAQ**.

BURNETT, M.; AMBLER, A. **Interactive visual data abstraction in a declarative visual programming language** *Journal of Visual Languages & Computing*, 1994. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1045926X84710032>>

CELANI, G.; MITCHELL, W. J. **A lógica da arquitetura: projeto, computação e cognição**. Campinas/SP: Unicamp, 303 p., 2008.

CLARKE, J. A. **Energy Simulation in Building Design**. 2. ed. Londres: Butterworth-Heinemann, 2001.

COELHO, K. M. et al. **Implementação da modelagem da informação da construção em empresa de arquitetura: um estudo de caso**. Encontro Brasileiro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção. **Anais...** Recife: 2015.

CORNETET, B. C.; FLORIO, W. **Reflexão sobre a Implantação do Bim em Três Escritórios de Arquitetura em Porto Alegre, de 2015 a 2015**. Encontro Brasileiro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção. **Anais...** Recife: 2015.

CRC CONSTRUCTION INNOVATION. **Adopting BIM for facilities management Solutions for managing the Sydney Opera House CRC for Construction Innovation participants IND**. Brisbane: [s.n.].

CUOLO, E. **“Você apagou a luz e iluminou o Brasil”, diz FHC em cadeia de TV**. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u41961.shtml>>. Acesso em: 3 jun. 2017.

EASTMAN, C. M. et al. **BIM handbook : a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors**. 2ª ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

EGGER, S. **Autodesk Insight 360**.

ENCAC. **XIV ENCAC e X ENLACAC**.

ENTAC. **ENTAC - Anais**.

EVINS, R. A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 230–245, 2013.

FLORIO, W. **Modelagem Paramétrica, Criatividade E Projeto: Duas Experiências Com**

Estudantes De Arquitetura. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 6, n. 2, p. 43–66, 2012.

GBC BRASIL. **Green Building Brasil**.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. 1ª ed. Boston: Addison-Wesley, 1989.

GUGGENHEIM BILBAO MUSEOA. **The Architect**.

GUGGENHEIM BILBAO MUSEOA. **The Construction**.

GUGGENHEIM BILBAO MUSEOA. **Outside the Museum**.

GUILLEMIN, A.; MOREL, N. An innovative lighting controller integrated in a self-adaptive building control system. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 5, p. 477–487, 2001.

IBPSA USA. **Autodesk Insight 360**.

IBPSA USA. **Euclid Extension for SketchUp Now Available**. Disponível em: <<https://www.ibpsa.us/news/euclid-extension-sketchup-now-available>>. Acesso em: 17 nov. 2018.

IBPSA USA. **Building Energy Software Tools**.

KILKELLY, M. **5 Ways Computational Design Will Change the Way You Work**.

KRYGIEL, E.; NIES, B. **Green BIM : Successful Sustainable Design with Building Information Modeling**. 1st. ed. Indianapolis, Indiana: Wiley Publishing, Inc., 2008.

LAMBERTS, R. et al. **Casa Eficiente: Simulação Computacional do Desempenho Termo-Energético**. [s.l.: s.n.]. v. 4

LEACH, N. Parametrics Explained. **Next Generation Building**, v. 1, p. 1–10, 2014.

LINDSEY, B. **Digital Gehry: Material Resistance/Digital Construction**. Basel: Birkhäuser, 2001.

MACHAIRAS, V.; TSANGRASSOULIS, A.; AXARLI, K. Algorithms for optimization of building design: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, n. 1364, p. 101–112, 2014.

MAHDAVI, A.; EL-BELLAHY, S. Effort and effectiveness considerations in computational design evaluation: A case study. **Building and Environment**, v. 40, n. 12, p. 1651–1664, 2005.

MASCARÓ, J. L. **O custo das decisões arquitetônicas**. 5ª ed. Porto Alegre: Masquatro Editora, 2010.

MELHADO, S. B. (COORD. . ET AL. **Coordenação de projeto de edificações**. São

Paulo: O Nome da Rosa, 2005.

MENDES, N. et al. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. p. 47–68, 2005.

NARAYAN, K. L.; MALLIKARJUNA, K. R.; SARCAR, M. M. M. **Computer Aided Design and Manufacturing**. New Delhi: Prentice-Hall of India Private Limited, 2008.

NGUYEN, A.-T.; REITER, S.; RIGO, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, v. 113, p. 1043–1058, 2014.

ØSTERGÅRD, T.; JENSEN, R. L.; MAAGAARD, S. E. Building simulations supporting decision making in early design – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 187–201, 2016.

OXMAN, R. Performance-based design: current practices and research issues. **International Journal of Architectural Computing**, v. 6, n. 1, p. 1–17, 2008.

PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C. A review on buildings energy consumption information. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 3, p. 394–398, 2008.

PINTO, T. DOS S. **O apagão energético de 2001**. Disponível em: <<http://brasilescola.uol.com.br/historiab/apagao.htm>>. Acesso em: 3 jun. 2017.

PROCEL. **O Programa**. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?Team=%7B505FF883-A273-4C47-A14E-0055586F97FC%7D>>. Acesso em: 3 jun. 2017.

QUEIRÓZ, G. R. DE. **Análise Da Interoperabilidade Entre Os Programas Computacionais Autodesk Revit E Energyplus Para a Simulação Térmica De Edificações**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

REIS, T. **Brasil – Imóveis certificados podem ter um potencial de economia de energia de até 50%**.

SARACINO, A. **Autodesk Green Building Studio**. Disponível em: <<https://www.buildingenergysoftwaretools.com/software/autodesk-green-building-studio>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

SCHULTZ, J. **FormIt + Revit + Insight = Bye Bye SketchUp + Sefaira**.

SHI, X. et al. A review on building energy efficient design optimization from the perspective of architects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 872–884, 2016.

SHI, X.; YANG, W. Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects. **Automation in Construction**, v. 32, p. 125–135, 2013.

SOUZA, H. M. DE et al. Reflexões sobre os principais programas em eficiência energética existentes no Brasil. **Review of Environmental Economics and Policy**, v. 15, n. 1, p. 7–26, 2009.

SUCCAR, B.; KASSEM, M. Macro-BIM adoption: Conceptual structures. **Automation in Construction**, v. 57, p. 64–79, 2015.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Weather Data Download - Sao Paulo-Congonhas AP 837800 (TRY.1954)**. Disponível em: <https://energyplus.net/weather-location/south_america_wmo_region_3/BRA//BRA_SP_Sao.Paulo-Congonhas.AP.837800_TRY.1954>. Acesso em: 4 mar. 2019.

YOUNG, M. **Out of Date Working Practices**.

ZEBALLOS, C. F. **Gehry: Guggenheim Museum, Bilbao**.

Glossário

Design algorítmico – linguagem computacional que permite ao programador expressar relações e transformações de informações através de esquemas, apontando ou demonstrando elementos entre si, diferente da programação em sequências de comandos, pontos e símbolos abstratos (BURNETT; AMBLER, 1994). Em inglês, o termo é utilizado como Visual Programming Language, entretanto no Brasil não há um consenso de utilização. Também pode ser encontrado na literatura como Programação de Interface Gráfica, Linguagem de Programação Gráfica, Programação Gráfica e Linguagem de Programação Visual.

Design computacional – segundo prefácio do livro “A Lógica da Arquitetura” (CELANI; MITCHELL, 2008), “área de pesquisa que procura desenvolver, por um lado, uma teoria computacional do processo de projeto apoiada nas ciências cognitivas, e, por outro, métodos e aplicações que permitam o desenvolvimento de projetos com o uso de meios computacionais”.

Estudo de viabilidade – etapa destinada à elaboração de análise e avaliações para seleção e recomendação de alternativas para a concepção da edificação e de seus elementos, instalações e componentes (ABNT, 1995).

Modelagem paramétrica – ligação de parâmetros numéricos e geométricos que permitem ajustes incrementais de uma peça que, em seguida, afeta todo modelo em cadeia. A diferença da modelagem paramétrica para o processo tradicional de projeto é que na modelagem paramétrica as partes do projeto são inter-relacionadas e mudam juntas, de forma coordenada. Essa inter-relação facilita mudanças, relações, adições e reparos no projeto, reduzindo retrabalho e facilitando possibilidades (LEACH, 2014). Algumas literaturas também utilizam o termo Design Paramétrico. Em inglês comumente se utiliza o termo *Parametric Design* e *Parametric Modeling*.

Schedule – de origem da língua inglesa e com traduções não bem definidas em português, *Shedule* é uma programação de horários de um determinado acontecimento, normalmente marcado por uma frequência conhecida. Ex.: uma tabela

de horários de ônibus, a ocupação de um edifício comercial por pessoas ao longo de uma semana ou o planejamento de dias e horários de uma série de eventos de uma banda musical em uma turnê. No caso desta pesquisa, foi utilizado para definição de horários de uso e ocupação por pessoas em edificações, previsão de uso de instalações prediais e programação de uso de equipamentos de HVAC.

Simulação termoenergética computacional – processo auxiliado por computador para prever o consumo de energia e o conforto ambiental em edificações novas ou em intervenções de edificações existentes. Devido à complexidade de seus cálculos matemáticos, a simulação computacional tem emergido nos estudos de análise energética em edificações (CLARKE, 2001). No Brasil, algumas pesquisas adotam o termo Simulação Computacional Termoenergética ou Simulação Computacional de Desempenho Energético. Na língua inglesa é utilizado de forma semelhante como *Building Performance Simulation* (BPS), *Building Energy Modeling*, *Energy Computer Simulation* ou simplesmente *Energy Simulation*.

ANEXO A – Caracterizações dos materiais e elementos construtivos

Neste anexo são apresentadas as caracterizações dos materiais e elementos construtivos utilizados nas simulações. Todas essas informações estão disponíveis no site da Autodesk (2016) e servem como composições padronizadas para as simulações do Insight.

Tabela A1 – Caracterização de parede externa utilizada nas simulações.

Reboco, bloco de concreto denso e gesso denso					Valor U: 2,73 W/(m².K)	
19 mm de reboco, 200 mm de bloco de concreto denso, 12 mm em gesso denso						
Material	Descrição	R m²	Espessura m	Condutividade W/(m.K)	Densidade kg/m³	Calor Esp. J/(kg.K)
Reboco externo	-	-	0,019	0,50	1.300	1.000
Bloco de concreto denso	-	-	0,200	1,63	2.300	1.000
12 mm em gesso denso	-	-	0,013	0,50	1.300	1.000

Fonte: Autodesk (2016).

Tabela A2 – Caracterização de parede interna utilizada nas simulações.

Gesso leve, bloco cerâmico, gesso leve					Valor U: 1,6896 W/(m².K)	
12 mm de gesso leve, 100 mm de bloco cerâmico, 12 mm de gesso leve						
Material	Descrição	R m²	Espessura m	Condutividade W/(m.K)	Densidade kg/m³	Calor Esp. J/(kg.K)
Gesso leve	-	-	0,013	0,16	600	1.000
Bloco cerâmico	-	0,07747	0,100	0,101585	2.082,60	921,096000
Gesso leve	-	-	0,013	0,16	600	1.000

Fonte: Autodesk (2016).

Tabela A3 – Caracterização de cobertura utilizada nas simulações.

100 mm em concreto leve					Valor U: 1,1407 W/(m².K)	
100 mm em concreto leve						
Material	Descrição	R m²	Espessura m	Condutividade W/(m.K)	Densidade kg/m³	Calor Esp. J/(kg.K)
100 mm em concreto leve	-	-	0,1016	0,53	1.280	840

Fonte: Autodesk (2016).

Tabela A4 – Caracterização de laje entre níveis utilizada nas simulações.

Laje passiva, sem isolamento, revestimento cerâmico ou vinílico					Valor U: 2,9582 W/(m².K)	
Laje passiva, sem isolamento, revestimento cerâmico ou vinílico						
Material	Descrição	R m²	Espessura m	Condutividade W/(m.K)	Densidade kg/m³	Calor Esp. J/(kg.K)
Ardósia ou cerâmica	-	-	0,0127	1,59	1.920	1.260
Sem isolamento	-	0.00001	-	-	-	-

Fonte: Autodesk (2016).

Tabela A5 – Caracterização de laje de solo utilizada nas simulações.

Laje de solo sem isolamento					Valor U: 0,7059 W/(m².K)	
Laje passiva, sem isolamento, revestimento cerâmico ou vinílico						
Material	Descrição	R m²	Espessura m	Condutividade W/(m.K)	Densidade kg/m³	Calor Esp. J/(kg.K)
Carpete	-	-	0,0127	0,06	288	1.380
Concreto denso reforçado	-	-	0,200	1,90	2.300	840

Fonte: Autodesk (2016).