Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Alice de Castro Cantele Coelho

A utilização do BIM na análise da eficiência energética de edifícios: ferramentas e interoperabilidade

Janeiro de 2020

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Alice de Castro Cantele Coelho

A utilização do BIM na análise da eficiência energética de edifícios: ferramentas e interoperabilidade

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis

Trabalho efetuado sob a orientação do(s)

Doutor Ricardo Mateus

Doutora Sandra Monteiro da Silva

Janeiro de 2020

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição
CC BY

https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais pelo amor e apoio incondicionais, e por sempre colocarem a educação dos filhos acima de tudo. Amo vocês!

Aos amigos de Guimarães, pelas pausas para um café e uma boa conversa, que tornaram o percurso acadêmico mais leve e divertido. Em especial a Taís, Dani, Natália, Cris e Giselle.

Às amigas de Vitória, por provarem que o tempo e a distância não abalam amizades verdadeiras. Jéssica, Renata, Raísa e Jacque, obrigada pelo apoio!

Finalmente, agradeço aos professores Ricardo Mateus e Sandra Monteiro da Silva pela orientação, apoio e atenção prestados durante o desenvolvimento da dissertação.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

A utilização do BIM na análise da eficiência energética de edifícios: ferramentas e interoperabilidade

Juntos, os edifícios residenciais, comerciais e públicos consomem cerca de metade da energia elétrica produzida no mundo. Para que uma edificação alcance um bom desempenho energético, é importante que boas soluções construtivas e sistemas adequados sejam definidos desde as fases iniciais do projeto. O Building Information Modeling (BIM) é uma metodologia de compartilhamento da informação da construção que auxilia na elaboração de projetos mais consistentes e antecipa a tomada de decisões.

O objetivo do estudo foi avaliar a utilização de ferramentas BIM para auxiliar na análise energética de edifícios em diferentes fases do projeto. Foi avaliado o potencial de utilização da plataforma BIM *Revit* e do *plug-in Insight* para a análise energética de edifícios. Foi verificada também a interoperabilidade do programa com a ferramenta de simulação energética *OpenStudio*.

Foram criados modelos energéticos de um edifício utilizando o método de massas conceituais, que se baseia em configurações de energia mais genéricas, e utilizando o método de elementos construtivos, que permite a inserção de espaços e configurações de energia mais detalhadas.

Os modelos foram simulados utilizando o *Insight*, ferramenta que funciona em 'nuvem' disponibilizada pela Autodesk que permite a comparação de diversos cenários de projeto, e Análise de Sistemas, ferramenta presente dentro do próprio programa *Revit*, que permite realizar análises de energia mais detalhadas. Um modelo semelhante foi criado utilizando o programa OpenStudio, com auxílio do *SketchUp*, para servir de base comparativa para os modelos criados no *Revit*.

Os resultados das simulações apresentaram diferenças de até 55% em valores absolutos, devido às limitações das possibilidades de configuração dos modelos em cada programa. Porém, ao realizar análises paramétricas, variando a localização, percentual de área de envidraçados da fachada e carga interna de iluminação, as variações entre os diferentes programas analisados são semelhantes.

Foi avaliada também a possibilidade de simular os modelos criados no *Revit* utilizando o programa *OpenStudio*. Diferentes arquivos foram exportados utilizando formato gbXML, de acordo com as opções disponíveis do *Revit*. A análise mostrou que a interoperabilidade entre os programas não é completa, pois há perda de informações e problemas na criação da geometria.

PALAVRAS-CHAVE

Análise de energia, eficiência energética de edifícios, ferramentas BIM, interoperabilidade.

ABSTRACT

Using BIM in the energy efficiency analysis of buildings: tools and interoperability

Together, residential, commercial and public buildings are responsible for nearly 50% of electricity consumption worldwide. The appropriate construction solutions and systems should be defined in the early design stage to enhance the energy performance of buildings.

Building Information Modeling is a method that supports designers in the development of more consistent projects and anticipates the decision-making process.

This study evaluates the potential use of the BIM platform *Revit* and related tools for building energy analysis. Also, the interoperability of this software and the energy simulation tool *OpenStudio* was verified. The building energy models were created using two different methods: conceptual masses and building elements. While using conceptual masses allows for more generic configuration of the model, a model with building elements allows the insertion of spaces and more detailed information.

The models were simulated using the cloud-based tool *Insight*, that enables the comparison of different design scenarios. Then, the function System Analysis was used to perform the simulation for more detailed results. The building energy model was also created and simulated using *OpenStudio* with *SketchUp* and the results compared with the Revit models.

The simulation results showed differences between them, due limitations in the configuration of each method. However, the parametric analysis in each software presented similar behavior between them.

Finally, the interoperability between the models created in *Revit* and *OpenStudio* software was tested. Different gbXML files were created using the exportation methods available in *Revit*. The tests showed that the interoperability of these programs is not complete, due to many information losses and geometrical shortcomings.

KEYWORDS

Energy analysis, building energy efficiency, BIM tools, interoperability

ÍNDICE

1. Introdução 1
1.1 Enquadramento 1
1.2 Motivação da pesquisa 3
1.3 Objetivos 3
1.4 Abordagem Metodológica 4
1.5 Estrutura da Dissertação 4
2. Estado da Arte 6
2.1 Eficiência energética no setor da construção civil 6
2.1.1 O consumo de energia e o papel dos edifícios 6
2.1.2 Metas de eficiência energética e redução de emissões 7
2.1.3 A importância do conforto térmico nos edifícios 8
2.1.4 Fatores determinantes da eficiência energética dos edifícios 9
2.1.5 Certificação da sustentabilidade de edifícios 10
2.2 Análises de energia e utilização de ferramentas BIM 11
2.2.1 Análise energética de edifícios 11
2.2.2 Uso do BIM na análise energética 13
2.2.3 Normas BIM para análise de energia 15
2.2.4 Análise energética nas diferentes fases do projeto 16
2.2.5 Nível de Desenvolvimento 18
2.2.6 Influência do comportamento do ocupante 19
2.2.7 Ferramentas BEM e formatos para interoperabilidade 20
3. Metodologia 24
3.1 Programas utilizados no estudo 24
3.2 Descrição do edifício 25
3.2.1 Configurações de espaço 28

3.2.2 Características do sistema de ar condicionado 28
3.3 Seleção da localização de acordo com o clima 28
4. Resultados 31
4.1 Análise da utilização do programa Revit na criação de modelos de energia 31
4.2 Criação do modelo no *Revit* utilizando massas conceituais 32
4.2.1 Resultados do *Insight* 35
4.3 Criação do modelo no *Revit* utilizando elementos construtivos 38
4.3.1 Resultados *Insight* 41
4.3.2 Resultados da Análise de Sistemas 43
4.4 Criação da geometria com *SketchUp* e *OpenStudio* 45
4.4.1 Resultados *OpenStudio* 46
4.5 Análise comparativa dos resultados entre programas 47
4.5.1 Consumo de energia de acordo com a localização 48
4.5.2 Consumo de energia de acordo com o PAF 50
4.5.3 Consumo de energia de acordo com a carga de iluminação 51
4.6 Exportação do modelo de energia para outras ferramentas BEM 53
4.6.1 Modelo de massas conceituais pelo método de configurações de energia 53
4.6.2 Modelo de elementos construtivos pelo método configurações de energia 54
4.6.3 Modelo de elementos construtivos pelo método de volumes de espaços 56
4.6.4 Arquivos IDF 57
4.6.5 Resumo dos problemas de interoperabilidade identificados 58
5. Conclusões 59
5.1 Conclusões gerais 59
5.2 Principais contribuições do estudo 62
5.3 Limitações do estudo 63
5.4 Trabalhos futuros 63
Referências Bibliográficas 64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Organização da Metodologia e Resultados da Pesquisa 5
Figura 2 - Divisão das zonas térmicas 26
Figura 3 – Zoneamento Bioclimático Brasileiro segundo a NBR 15220 29
Figura 4 – Zonas climáticas segundo a ASHRAE Standard 169 30
Figura 5 – Modelo de massa conceitual 32
Figura 6 – Modelo de energia criado por massas conceituais 35
Figura 7 – Faixas de consumo de energia para diferentes localizações 36
Figura 8 – Resultados de consumo de energia de acordo com as configurações modeladas 36
Figura 9 - Modelos com elementos construtivos (PAF 22% e 80%) 38
Figura 10 - Modelo de energia criado por elementos construtivos 41
Figura 11 - Faixas de consumo de energia para o modelo de elementos construtivos 41
Figura 12 - Resultados de consumo de energia de acordo com as configurações modeladas 42
Figura 13 - Consumo de energia anual por uso final 43
Figura 14 - Consumo de energia mensal 44
Figura 15 - Modelos de energia criados utilizando SketchUp (PAF22% e PAF80%) 45
Figura 16 – Zonas térmicas do modelo criado no SketchUp 45
Figura 17 - Consumo de energia anual por uso final 46
Figura 18 - Consumo de energia mensal 47
Figura 19 – Comparativo do consumo de energia na edificação para cada localização e programa 49
Figura 20 –Variação do consumo de energia total de acordo com a localização 49
Figura 21 - Comparativo do consumo de energia na edificação para cada PAF e programa 50
Figura 22 - Variação do consumo de energia total de acordo com o PAF 51
Figura 23 – Comparativo do consumo de energia na edificação com a carga de iluminação e programa 52
Figura 24 – Variação do consumo de energia total de acordo com a carga de iluminação 52
Figura 25 - Geometria importada do modelo de massas conceituais 54
Figura 26 - Janela de erro ao abrir o arquivo gbXML no *OpenStudio* 54
Figura 27 – Identificação do erro na importação do arquivo gbXML para o OpenStudio 54
Figura 28 - Geometria importada no *OpenStudio* 55
Figura 29 - Falhas na geometria importada 55
Figura 30 - Zonas térmicas 56
Figura 31 - Problema na importação do piso do primeiro pavimento 56
Figura 32 - Zonas térmicas do modelo de elementos construtivos 57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do vidro das janelas 26
Tabela 2 - Propriedades térmicas das camadas das paredes externas 27
Tabela 3 - Propriedades térmicas das paredes internas 27
Tabela 4 - Propriedades térmicas da cobertura 27
Tabela 5 - Propriedades térmicas da laje entre pavimentos 28
Tabela 6 - Configurações de espaço 28
Tabela 7 – Cidades selecionadas para o estudo 29
Tabela 8 – Áreas e volume brutos do edifício 33
Tabela 9 – Dados do tipo de construção 33
Tabela 10 – Dados do sistema AVAC para massas conceituais 34
Tabela 11 – Coeficiente de transmissão térmica dos elementos 34
Tabela 12 - Variação do consumo de energia com o PAF utilizando vidro reflexivo 37
Tabela 13 - Variação do consumo de energia com o PAF utilizando vidro simples 37
Tabela 14 - Variação do consumo de energia com a carga de iluminação 37
Tabela 15 - Propriedades de espaço 39
Tabela 16 – Listagem dos espaços criados 40
Tabela 17 – Características das zonas térmicas 40
Tabela 18 – Variação do consumo de energia de acordo com o PAF 42
Tabela 19 – Variação do consumo de energia de acordo com a carga de iluminação 42
Tabela 20 – Variação do consumo de energia de acordo com a localização do edifício 43
Tabela 21 – Variação do consumo de energia de acordo com o PAF 43
Tabela 22 – Variação do consumo de energia com a carga de iluminação 43
Tabela 23 - Variação do consumo de energia com a localização do edifício 46
Tabela 24 - Variação do consumo de energia com o PAF 46
Tabela 25 - Variação do consumo de energia com a carga de iluminação 46
Tabela 26 - Comparativo do consumo total de energia para cada programa de simulação 48
Tabela 27 - Variação do consumo energético total entre cidades 48
Tabela 28 - Comparativo do consumo total de energia de acordo com o PAF 50
Tabela 29 - Comparativo do consumo total de energia de acordo com a carga de iluminação 51
Tabela 30 - Problemas de interoperabilidade identificados 58

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACH	Renovações de ar por hora, sigla do inglês *Air Changes per Hour*
ASHRAE	Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado, sigla do inglês *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BEM	Modelagem de Energia da Construção, sigla do inglês *Building Energy Modelling*
BIM	Modelagem da Informação da Construção, sigla do inglês *Building Information Modeling*
BREEAM	Método de Avaliação Ambiental do Building Research Establishment, sigla do inglês *Building Research Establishment Environmental Assessment Method*
CAD	Desenho assistido por computador, sigla do inglês *Computer Aided Design*
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
COBIM	*Common BIM Requirements*
COP-21	Conferência das Partes
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GBC	*Green Building Council*
GBS	*Green Building Studio*
gbXML	*Green Building eXtensible Markup Language*
GEE	Gases de Efeito Estufa
GSA	*General Services Administration*
GUI	Interface Gráfica do Usuário, sigla do inglês *Graphical User Interface*
HSPF	Fator de Desempenho Sazonal de Aquecimento, sigla do inglês *Heating Seasonal Performance Factor*
IDF	*Input Data File*
IEA	Agência Internacional de Energia, sigla do inglês *International Energy Agency*
IFC	*Industry Foundation Classes*

kWh	Kilowatts-hora
LEED	*Leadership in Energy and Environmental Design*
LOD	Nível de Desenvolvimento, sigla do inglês *Level Of Development*
m	metro
m^2	metro quadrado
MDIC	Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
MEP	Mecânico, Elétrico e Hidráulico, sogla do inglês *Mechanical, Electrical and Plumbing*
NBR	Norma Brasileira
ND	Nível de Desenvolvimento
NDC	Contribuições Nacionalmente Determinadas, sigla do inglês *Nationally Determined Contribution*
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PAF	Percentual de Abertura da Fachada
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PNEf	Plano Nacional de Eficiência Energética
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia
R	Resistência térmica
RIBA	*Royal Institute of British Architects*
RPH	Renovações de ar por hora
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética em Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética em Edifícios Residenciais
SEER	*Seasonal Energy Efficiency Ratio*
SHGC	*Solar Heat Gain Coefficient*
U	Transmitância térmica
VRF	Volume de Refrigerante Variável, sigla do inglês *Variable Refrigerant Flow*
W	Watts
WWR	*Window-to-wall ratio*

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O setor dos edifícios residenciais, comerciais e públicos somam cerca de 50% da energia elétrica utilizada no mundo, sendo grande parte dessa energia utilizada na climatização dos ambientes (Empresa de Pesquisa Energética, 2018a; International Energy Agency, 2018a, 2018c, 2019a). Com as cidades cada vez mais densamente construídas, se intensificam os fenômenos climáticos locais, como o efeito de ilha de calor, aumentando a necessidade do uso de ar condicionado. O aumento do poder aquisitivo também faz crescer a demanda por ambientes mais confortáveis e climatizados (Empresa de Pesquisa Energética, 2018b).

As fontes de energia não renováveis ainda predominam na matriz energética mundial. Estes recursos, além de serem finitos, são responsáveis por grandes emissões de poluentes e gases de efeito de estufa (GEE) na atmosfera (International Energy Agency, 2018b). Desde a década de 1970, a Organização das Nações Unidas (ONU) vem realizando conferências para alertar o mundo sobre a necessidade de redução de emissões de poluentes para evitar as mudanças climáticas. Diversos acordos foram firmados entre os países durante esse tempo, porém as metas de redução ainda não foram alcançadas mundialmente (Nações Unidas, 2019; UNFCCC, 2019).

Neste contexto, a eficiência energética dos edifícios é fundamental na redução do consumo de energia e emissões de GEE. Além do fator ambiental, o bom desempenho dos edifícios traz benefícios sociais e econômicos, uma vez que promove maior conforto aos utilizadores e reduz os gastos de utilização das construções. Estes fatores evidenciam a importância de projetar edifícios mais eficientes. A melhoria da eficiência energética também pode ser alcançada nos edifícios existentes, por meio da reabilitação energética.

Diversas normas e formas de certificação da eficiência energética de edifícios vêm sendo implementadas no setor da construção. As normas garantem a qualidade mínima dos edifícios e a certificação informa o consumidor sobre o nível de desempenho do edifício, auxiliando na escolha por edifícios mais eficientes. A certificação é um incentivo também para as iniciativas de reabilitação energética.

Um dos métodos para a avaliação do nível de eficiência energética de edificações é através de programas de simulação computacional. A utilização destas ferramentas apresenta diversas vantagens para o projeto, porém implicam a existência de profissionais altamente qualificados e com competências

específicas para utilizá-las. Desta forma, a análise prévia do comportamento energético de um edifício representa aumento de custos e trabalho, sendo deixada muitas vezes apenas para a fase final de certificação do empreendimento.

Porém, a análise energética deveria ser realizada durante todo o processo de projeto, auxiliando na tomada de decisões que levem a um melhor desempenho do edifício. As decisões com maior impacto no desempenho do edifício se encontram na fase inicial do projeto, por isso, existe a grande necessidade da integração da análise de energia nas fases iniciais. A análise de energia é uma tarefa multidisciplinar, que integra as áreas da arquitetura, estruturas e sistemas técnicos do edifício, por isso é necessário que toda a equipe de projeto trabalhe em conjunto para alcançar um alto desempenho.

Neste sentido, a metodologia *Building Information Modelling* (BIM) vem ampliando a utilização do conceito de projeto integrado, onde todas as especialidades de projeto trabalham em conjunto, com o objetivo de tornar todo o processo construtivo mais claro e eficiente. A centralização da informação e automatização dos processos de projeto utilizando a metodologia BIM torna viável a integração da análise de energia no processo de projeto dos edifícios.

Atualmente o Autodesk Revit é uma das plataformas BIM mais difundidas e utilizadas no mundo. Além de todas as utilizações do programa para projetos de arquitetura e construção, o Revit possui funcionalidades para criar e simular modelos de energia, integrando as análises ao processo de projeto.

Uma das ferramentas precursoras para a simulação energética de edifícios foi o EnergyPlus, no qual os motores de cálculo da maioria das ferramentas atuais são baseados. O programa é utilizado até hoje, porém possui uma interface de utilização pouco amigável, sendo necessárias ferramentas complementares para auxiliar na introdução dos dados. Uma das ferramentas mais reconhecidas para este fim é o OpenStudio, que auxilia na inserção das informações do modelo.

Atualmente existe um esforço das empresas de software e do meio acadêmico para aprimorar a integração dos programas de simulação energética com a metodologia BIM, porém ainda existem limitações de interoperabilidade. Isso faz com que seja necessário introduzir informações de forma manual ou reconstruir o modelo do zero, gerando retrabalho e erros humanos desnecessários.

1.2 Motivação da pesquisa

Um estudo conduzido no Brasil, intitulado "Potencial de empregos gerados na área de Eficiência Energética no Brasil de 2018 até 2030" (Ministério de Minas e Energia, 2019) mostra que existe atualmente uma grande necessidade de profissionais qualificados na área de eficiência energética. Segundo o estudo, para que o país alcance as metas estabelecidas no Acordo de Paris, a procura por estes profissionais deve aumentar de cinco a seis vezes até 2030 (Ministério de Minas e Energia, 2019).

Além disso, com o objetivo de incentivar o desenvolvimento do setor da construção, o Governo Brasileiro promulgou a Estratégia Nacional de Disseminação do *Building Information Modeling* - BIM (Ministério da Indústria Comércio Exterior e Serviços, 2018), que institui metas para a adoção do BIM no setor das obras públicas. Até 2028, o uso do BIM será exigido em todas as fases do empreendimento, incluindo as fases pós obra de gestão e manutenção. Espera-se que a exigência de que os empreendimentos do setor público sejam entregues utilizando BIM estimule a sua adoção nos diferentes tipos de construções.

Considerando a relevância dos temas da eficiência energética dos edifícios e da adoção da metodologia BIM no setor da construção, este trabalho foi desenvolvido no sentido de ampliar e divulgar o conhecimento sobre as vantagens da análise do desempenho energético de edifícios utilizando o BIM e a sua integração no processo de projeto.

No Brasil, as edificações públicas e comerciais somam um quarto do consumo total de energia elétrica (Empresa de Pesquisa Energética, 2018a), sendo que nestes setores, um terço da energia é utilizada para fins de refrigeração (Empresa de Pesquisa Energética, 2018b). Edifícios de escritórios tem alta densidade de consumo energético, devido ao uso intenso de computadores e equipamentos elétricos, além de elevadas exigências de conforto térmico, com uso de ar condicionado em praticamente toda sua área útil (Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, 2014). Estes fatores evidenciam a importância da preocupação com o desempenho energético operacional de edifícios de escritórios.

1.3 Objetivos

O estudo teve como objetivo avaliar como a utilização de ferramentas BIM pode auxiliar na análise energética de edifícios em diferentes fases do projeto.

Objetivos específicos:

- Criar o modelo de energia do edifício em estudo utilizando a plataforma BIM *Autodesk Revit*, utilizando os métodos de massas conceituais e elementos construtivos, verificando qual nível de detalhe de informações é possível inserir nas configurações do modelo;

- Simular os modelos criados utilizando as ferramentas de análise de energia Insight e Análise de Sistemas, integradas na plataforma Revit, verificando qual é o método mais apropriado para cada fase de desenvolvimento do projeto;
- Criar e simular o modelo de energia utilizando as ferramentas SketchUp e OpenStudio, avaliando o nível de detalhe das informações inseridas e dos resultados fornecidos;
- Avaliar a influência do clima, percentual de abertura da fachada (PAF) e carga térmica de iluminação no consumo de energia da edificação e comparar os resultados dos diferentes métodos e ferramentas;
- Verificar a interoperabilidade dos modelos criados no Revit com o OpenStudio.

1.4 Abordagem Metodológica

Como objeto de estudo, foi utilizado o projeto de um edifício de escritórios com as características médias deste tipo de construção para o contexto brasileiro. Foram consideradas para a localização do edifício as cidades de Curitiba, Brasília e Vitória, por fazerem parte de diferentes zonas bioclimáticas do Brasil.

O modelo de energia do edifício foi criado no *Revit* utilizando dois métodos: Massas conceituais e Elementos construtivos, e foram simulados utilizando as ferramentas *Insight* e Análise de Sistemas, ambas integradas a plataforma *Revit*.

Complementarmente, foi criado e simulado um modelo no programa *OpenStudio*, com auxílio da ferramenta *SketchUp*, com o objetivo de comparação dos resultados.

Os modelos criados no *Revit* foram exportados em formato gbXML e importados para o *OpenStudio*, sendo depois verificada a transferência de informações entre os programas. Os arquivos em formato IDF disponibilizados pelo *Insight* foram verificados utilizando o *EnergyPlus*, *SketchUp* e *OpenStudio*.

1.5 Estrutura da Dissertação

O primeiro capítulo da dissertação apresenta uma introdução ao tema do trabalho, as motivações e objetivos da pesquisa e a abordagem metodológica utilizada.

O segundo capítulo apresenta o embasamento teórico para a pesquisa e revisão de outros estudos relevantes para o tema.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia utilizada, descreve o objeto de estudo e as ferramentas utilizadas. O quarto capítulo apresenta e discute resultados do estudo. O quinto capítulo apresenta as conclusões do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

A Figura 1 mostra a organização da metodologia e resultados do trabalho.

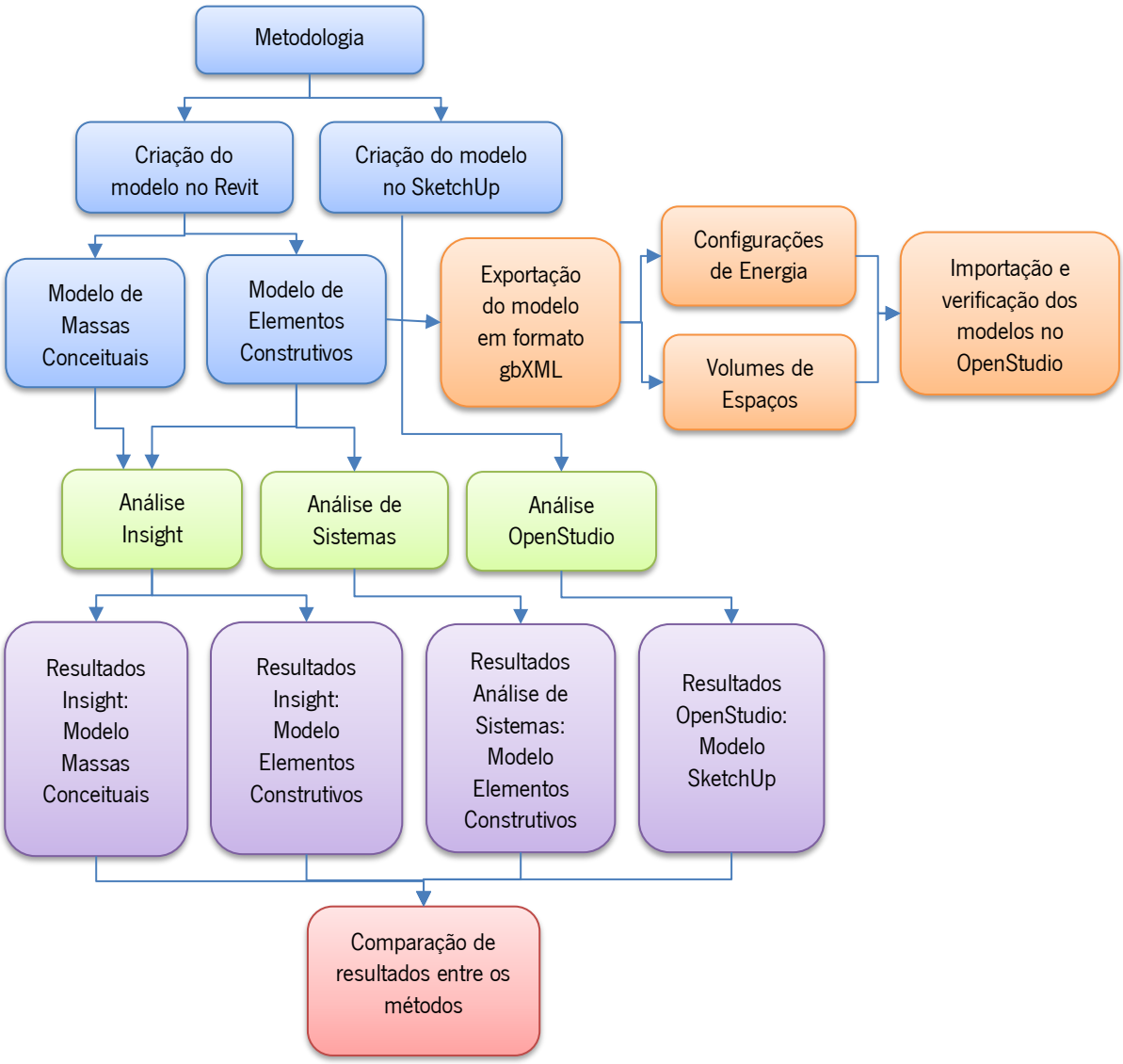


Figura 1 - Organização da Metodologia e Resultados da Pesquisa

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Eficiência energética no setor da construção civil

2.1.1 O consumo de energia e o papel dos edifícios

Nas últimas décadas, o consumo mundial de energia vem aumentando ano após ano, impulsionado principalmente pelo crescimento de economias emergentes, como a China, a Índia e o Brasil (International Energy Agency, 2018c, 2019b). Em 2016, mais de dois terços da energia elétrica mundial foram gerados a partir de fontes combustíveis não renováveis, como o carvão, petróleo e gás. Apesar do grande crescimento da produção de eletricidade a partir de fontes renováveis nos últimos anos, como a energia solar, eólica e geotérmica, o seu contributo ainda é de pouco mais de 5% da matriz energética mundial (International Energy Agency, 2018b).

No Brasil, as fontes de energia renováveis correspondem a 80,4% da oferta interna de eletricidade do país, sendo a fonte hídrica responsável por 65,2% da matriz (Empresa de Pesquisa Energética, 2018a). Apesar da energia hidrelétrica ser considerada uma fonte limpa, a construção das barragens traz graves impactes sociais e ambientais, como a perda de biodiversidade, alteração da paisagem e remoção de populações das áreas alagadas.

Segundo a Agência Internacional de Energia (International Energy Agency, 2019a), o setor da construção é responsável por metade da energia elétrica utilizada globalmente e por um quarto das emissões de dióxido de carbono (CO_2). No Brasil, dados do Balanço Energético Nacional (Empresa de Pesquisa Energética, 2018a) também indicam que em 2017 os setores residencial, comercial e público foram responsáveis por 50% do consumo de energia elétrica no país.

Entre os países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), metade da energia consumida nas residências é utilizada para o aquecimento dos ambientes (International Energy Agency, 2018a). Adicionalmente, o uso de energia para arrefecimento dos ambientes praticamente duplicou desde 2000 e continuará crescendo rapidamente. Na Europa, a utilização de ar condicionado aumentou 16% em 2017 devido ao aquecimento do clima (International Energy Agency, 2018c).

No Brasil, observa-se um grande aumento do consumo de energia nos meses de verão devido à necessidade de arrefecimento dos ambientes. O aumento do poder aquisitivo da população nos últimos anos também possibilitou o acesso aos aparelhos de ar condicionado e a elevação dos padrões de conforto ambiental. Estima-se que o consumo de energia elétrica devido ao uso de ar condicionado no

setor residencial tenha mais que triplicado entre 2005 e 2017 e que haja um potencial de crescimento ainda maior (Empresa de Pesquisa Energética, 2018b). Os eventos atípicos de ondas de calor aumentam ainda mais a demanda por eletricidade, podendo causar um efeito cíclico na emissão de Gases de Efeito Estufa.

Apesar do aumento, o consumo energético global poderia ser ainda maior sem as regulamentações e incentivos para melhorar a eficiência energética na indústria e na construção. Os ganhos em eficiência energética desde 2000 evitaram um consumo até 12% maior em energia (International Energy Agency, 2018c). Os investimentos em eficiência energética permitem o crescimento da economia sem que isso resulte em aumento do consumo de energia e de emissões de gases poluentes. A eficiência energética, aliada às fontes de energia renováveis, é indispensável para alcançar as metas climáticas mundiais (International Energy Agency, 2018c).

2.1.2 Metas de eficiência energética e redução de emissões

Desde a década de 70, existem esforços para estabelecer metas de redução de emissão de poluentes por meio de acordos climáticos. Apesar da adesão crescente dos países a estes acordos, os objetivos ainda estão longe de serem alcançados, sendo necessária a implementação de ações mais efetivas por todas as partes (Nações Unidas, n.d., 2019).

O Pacote 2020, também conhecido como metas 20-20-20 em função dos objetivos fixados, foi apresentado em 2007 e consiste no estabelecimento de três metas comunitárias para a política climática europeia até o ano de 2020. São elas: a redução de 20% das emissões de GEE em relação aos níveis de 1990; a inserção de 20% de fontes renováveis na matriz energética; o incremento da eficiência energética mediante economia de 20% de energia (Szucko, 2018).

O Pacote 2030, por sua vez, foi elaborado em 2014, antes do fim do pacote anterior, com compromissos ainda mais ambiciosos e com o objetivo de servir de exemplo para as negociações que ocorreram no ano seguinte, na 21ª Conferência das Partes (COP-21), em Paris. Desse modo, as três novas metas estabelecidas pela União Europeia para serem atingidas até 2030 ampliam o escopo do Pacote 2020 e consistem na redução de 40% dos GEE em relação aos níveis de 1990; no aumento para, pelo menos, 27% de fontes renováveis na matriz energética europeia; na melhoria da eficiência energética, com a economia de, no mínimo, 27% de energia, considerando 2005 como ano-base (Nações Unidas, 2015).

No Acordo de Paris, cada país apresentou sua proposta de redução de emissões dos GEE, de acordo com o que cada governo considera viável a partir do cenário social e econômico local. As contribuições

de cada país foram chamadas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC, na sigla em inglês). Com as NDC, o Brasil comprometeu-se a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de reduzir as emissões de gases com efeito estufa em 43%, abaixo dos níveis de 2005, em 2030 (Ministério do Meio Ambiente s.d.).

Porém, um estudo coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (2019) mostra que para que o Brasil alcance as metas estabelecidas nas NDC, será necessário ampliar incentivos e programas para acelerar a criação de demandas, contratação e capacitação de novos profissionais de eficiência energética. Atualmente, existe um grande déficit de profissionais capacitados para planejar e executar projetos de eficiência energética, sendo que demanda por estes profissionais deve aumentar de 5 a 6 vezes até 2030. O estudo também mostra que 76% dos empregos ligados a eficiência energética se encontram no setor da construção civil, mais especificamente na construção de edifícios eficientes.

2.1.3 A importância do conforto térmico nos edifícios

Nos dias atuais, a maioria das pessoas passa mais tempo dentro dos edifícios do que ao ar livre. A população europeia chega a permanecer até 90% do seu tempo em ambientes fechados (European Environment Agency, 2013). Por este motivo, os edifícios têm a importante função de garantir condições de saúde e conforto para os seus utilizadores, com níveis de iluminação, temperatura, humidade e renovação de ar adequados para as atividades exercidas no espaço (Frota & Schiffer, 2001).

A ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) define o conforto térmico como a condição mental de satisfação com o ambiente térmico, medida pela avaliação subjetiva do indivíduo (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2010).

Existem diversas pesquisas sobre a influência do conforto térmico no estado psicológico, físico e de saúde dos ocupantes. Na sua pesquisa, Batiz, Goedert, Morsch, Kasmirski Junior, & Venske (2009) verificaram uma relação direta entre o desempenho da atenção e memória de alunos universitários e as condições de conforto térmico da sala de aula. Outros trabalhos constataram a influência do conforto térmico no desempenho profissional e produtividade dos trabalhadores (Dias, 2013; Silva, 2001).

Condições inadequadas de humidade e temperatura dentro de um edifício podem permitir o desenvolvimento de fungos e micro-organismos nocivos à saúde das pessoas (Sterling et al., 1991). Teixeira, Brionizio, Rodrigues, e Mainier (2005) mostraram que existe uma grande associação entre o conforto ambiental e sintomas como alergia, dor de cabeça, irritação dos olhos e das mucosas, dores de

garganta e fadiga em geral, em trabalhadores expostos a ambientes com climatização e ventilação inadequados.

Desta forma, garantir as condições de conforto do utilizador pode trazer benefícios financeiros para as empresas, já que mantêm os trabalhadores mais produtivos, satisfeitos e menos doentes.

A qualidade do espaço físico e o ambiente construído saudável também propiciam maior eficiência na recuperação de pacientes em ambiente hospitalar, podendo reduzir custos dos tratamento e promover ganhos financeiros (Guelli & Zucchi, 2005). O trabalho de Sampaio e Chagas (2009) evidencia a importância da temperatura, trocas de ar, humidade e iluminação natural e artificial em ambientes hospitalares e sugere diretrizes para serem utilizadas por arquitetos na elaboração de projetos e avaliação destes ambientes.

Também há estudos que relacionam a influência do conforto térmico no comportamento do consumidor em locais de compras, como shoppings e supermercados. Quando em situação de conforto, a temperatura é pouco notada pelos consumidores, porém, temperaturas desagradáveis podem diminuir o seu desejo de permanecer no local (Wakefield & Baker, 1998). Bigois, Basso, & Souza (2017) verificaram também que a intenção de compra do consumidor é mais elevada quando este se encontra em estado de conforto térmico.

Todos estes fatores demonstram a importância de garantir as condições de conforto dentro dos edifícios, ao mesmo tempo em que é necessário reduzir seu o consumo de energia. Por esta razão, engenheiros, arquitetos, proprietários e administradores devem sempre buscar as melhores soluções para estas demandas.

2.1.4 Fatores determinantes da eficiência energética dos edifícios

A eficiência energética de um edifício está diretamente ligada ao seu comportamento térmico, pois grande parte da energia é utilizada para garantir as condições de conforto no seu interior. O comportamento térmico da construção é o resultado de uma série de interações entre o ambiente externo, o ambiente interno, seus elementos construtivos, sistemas e soluções técnicas implementados (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2017; BuildingSmart Finland, 2012b).

Os edifícios devem buscar ao máximo garantir as condições de conforto térmico de forma natural, isto é, aproveitando as características térmicas dos elementos construtivos e condições naturais de ventilação e iluminação. Para isso é importante conhecer os materiais e características arquitetônicas adequadas ao clima do local onde a edifício está inserida. A adequação da arquitetura ao clima reduz a necessidade

de sistemas de condicionamento de ar, seja para arrefecer ou aquecer os ambientes (Frota & Schiffer, 2001).

A radiação solar é uma importante fonte de calor para a edificação nos períodos mais frios, mas que deve ser evitada nos períodos do ano mais quentes. É necessário encontrar uma solução para o controle da incidência da radiação solar que seja adequada ao clima local. A trajetória do sol varia de acordo com a latitude do local do observador, e é imprescindível que seja levada em conta nas estratégias (Isolani, 2008).

As janelas são elementos da construção que influenciam fortemente nas trocas de calor com o ambiente externo, além de permitirem o aproveitamento da luz natural, por isso devem ser utilizadas de forma estratégica. Características como orientação, tamanho, sombreamento, tipo de vidro e caixilharia devem ser estudadas para garantir níveis de iluminação adequados, sem ganhos ou perdas de calor excessivos (Isolani, 2008).

Entre as estratégias de eficiência energética, também devem ser avaliadas as propriedades térmicas dos elementos da envoltória, que são paredes, coberturas e pisos. As características principais são o isolamento térmico e inércia térmica. O isolamento térmico diminui a transmissão de calor entre a edificação e o meio externo. Já a inércia térmica é a capacidade do elemento construtivo de guardar calor dentro de si, o que ajuda a manter a temperatura interna estável, amortecendo os picos de calor e frio (Isolani, 2008). Porém em algumas situações de climas muito quentes, a inercia térmica pode ser um fator indesejável, pois dificulta a retirada de calor de dentro da edificação (Frota & Schiffer, 2001).

Além destas características intrínsecas a arquitetura, também é necessário contar com sistemas eficientes de climatização e iluminação, já que são os principais consumidores de energia no edifício. É possível também a utilização de sistemas de automação que auxiliam na diminuição do consumo, como sensores de presença, sistemas de desligamento automático e medidores inteligentes de consumo.

2.1.5 Certificação da sustentabilidade de edifícios

Com o aumento da conscientização sobre sustentabilidade e o consumo de energia nos edifícios, foram desenvolvidos vários sistemas de avaliação do desempenho e classificação da sustentabilidade. Os sistemas *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM) e *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) são os mais utilizados atualmente. Para avaliar o consumo de energia e premiar a eficiência energética, estes sistemas baseiam-se na simulação computacional do desempenho energético (Schwartz & Raslan, 2013).

A certificação BREEAM, lançada em 1990 no Reino Unido, foi a primeira certificação ambiental para edifícios no mundo e que continua até hoje uma das mais utilizadas. Neste método, 15% da nota é dedicada ao desempenho energético do edifício. Na metodologia LEED, desenvolvida pela associação *U.S. Green Building Council* (USGBC), 33 dos 110 pontos possíveis estão relacionados com o consumo de energia (Suzer, 2019).

As certificações auxiliam arquitetos e promotores na concepção dos edifícios, pois definem parâmetros específicos que precisam ser atendidos, e trazem aos decisores sem conhecimento técnico, uma referência simples que os ajuda a optar por uma solução ou edifício em detrimento de outro.

No Brasil, o Selo Procel é concedido aos edifícios que apresentem altos índices de eficiência energética. Para obtenção do Selo Procel Edifícios, é necessário primeiramente obter a Etiqueta PBE Edifica, classe A, para todos os sistemas avaliados. A Etiqueta Nacional de Conservação de energia (ENCE) é concedida através do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), coordenado pelo Inmetro.

A metodologia de avaliação para a etiquetagem está descrita no Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética em Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) e no Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética em Edifícios Residenciais (RTQ-R). Os RTQ's apresentam dois métodos para a determinação da eficiência. O método prescritivo apresenta uma série de equações que devem ser utilizadas de acordo com o clima e características do edifício. O método de simulação define parâmetros para a modelação e simulação do edifício, permitindo maior flexibilidade na concepção do edifício.

No Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf) foi estabelecido o calendário da obrigatoriedade do PBE Edifica sendo este até 2021 para prédios públicos, até 2026 para edifícios comerciais e até 2031 para edifícios residenciais (Eletrobras/Procel, INMETRO, & CB3E/UFSC, 2013).

2.2 Análises energéticas e utilização de ferramentas BIM

2.2.1 Análise energética de edifícios

Nas últimas décadas, os programas computacionais vêm revolucionando a maneira como são desenvolvidos e documentados os projetos de arquitetura e construção. Inicialmente, com o uso de ferramentas CAD (Computer Aided Design) 2D e 3D, e, atualmente com a modelação da informação da construção. Hoje, o projeto computacional vai além da representação e documentação de projetos e inclui a análise e simulação computacionais e fabricação digital. Estas novas funções permitem que

arquitetos e engenheiros compreendam e analisem os seus projetos de forma inovadora, o que desafia os métodos tradicionais (Garber, 2009).

Com as atuais iniciativas políticas e maior conscientização dos consumidores, aumentaram as exigências por edifícios mais eficientes, que utilizem menos energia, gerem menos impactes ambientais e garantam as condições de conforto do ocupante. Neste sentido, a simulação computacional possui papel fundamental na melhoria do desempenho dos edifícios, pois permite verificar as condições de ventilação e iluminação, simular o comportamento térmico, além de realizar estimativas de consumo energético e de emissão de poluentes durante o ciclo de vida do edifício.

O *Building Energy Modeling* (BEM) é um método computacional que permite analisar o desempenho energético e avaliar os projetos arquitetônico e mecânico de um edifício. O BEM permite à equipa de projeto otimizar o uso de energia no edifício, além de comparar os impactes ambientais entre as várias opções de projeto. Com o BEM é possível calcular as cargas térmicas para o dimensionamento de equipamentos, avaliar o comportamento térmico e as condições de conforto do edifício. Também é possível avaliar o desempenho da iluminação natural (U.S. General Services Administration's, 2015).

A análise energética de edifícios não é uma temática nova no ramo da engenharia e arquitetura. Os programas de simulação têm sido desenvolvidos desde antes dos anos 70 com o objetivo de avaliar o consumo de energia nos edifícios. Estes programas ganharam força com a preocupação sobre o uso de energia, levantada com a crise energética no início dos anos 70 nos Estados Unidos e com o reconhecimento de que o consumo dos edifícios representa uma grande parcela do consumo global de energia (U.S. Department of Energy, 2018).

Os dados principais para a realização da análise energética são o arquivo climático, a geometria do edifício, os sistemas de iluminação e equipamentos, os padrões de ocupação, as características físicas dos elementos das envolventes e eficiência energética dos sistemas de condicionamento de ar (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2017).

Apesar da longa existência, a utilização destas ferramentas de projeto ainda não atingiu seu pleno potencial. Na metodologia tradicional baseada em CAD, o uso destes programas era realizado de maneira isolada, normalmente depois dos projetos de arquitetura estarem concluídos. Não havia uma troca de informação eficiente entre as especialidades de arquitetura, estruturas e redes mecânicas, eléctricas e de águas, MEP (do inglês *Mechanical, Electrical and Plumbing Engineering*) e os programas de simulação e análise energética, tornando o processo trabalhoso e sujeito a erros de interpretação de projeto (Santos & Couto, 2015).

A análise energética de um edifício é uma tarefa multidisciplinar que reúne diferentes elementos e suas respetivas características. A análise de energia deve fazer parte do desenvolvimento do projeto desde as fases iniciais, porém este processo ainda ocorre de forma bastante segmentada e a troca de informações entre as partes é precária. Por este motivo, muitas vezes a análise de energia só e realizada ao final do processo, quando já não há margem para mudanças e melhorias.

Hoje, com a disseminação do BIM e desenvolvimentos de novos programas de simulação, as análises preliminares podem ser realizadas de forma mais simples, auxiliando arquitetos e projetistas a compreender o impacte das suas escolhas no desempenho do edifício.

2.2.2 Uso do BIM na análise energética

O BIM é uma metodologia de partilha da informação que se materializa na existência de um modelo tridimensional, acessível através de programas informáticos e que permite a construção virtual de um edifício. Esse modelo de informação digital, não contém apenas a geometria dos elementos que compõem o edifício, mas também diversas propriedades e atributos como características mecânicas, termofísicas, dados de fabricação, custos, entre outros. Além disso, os elementos possuem informações paramétricas, que descrevem o seu comportamento em relação aos outros elementos e apoiam os fluxos de trabalho das diversas atividades do processo construtivo (Lino, Azenha, & Lourenço, 2012).

Uma das vantagens do desenvolvimento de projetos em BIM é que ele exige que várias decisões de projeto sejam tomadas em uma etapa anterior ao método tradicional. Nas fases iniciais da elaboração de um projeto, a capacidade de realizar alterações é alta e o custo destas modificações é baixo em relação ao custo total. Nas fases iniciais do projeto, estão as grandes e mais significativas oportunidades para obter reduções de custos e definir racionalizações. Conforme o projeto evolui pelos estágios do seu ciclo de desenvolvimento, diminui a capacidade de tomada de decisões que causem impacto significativo e aumenta o custo das alterações (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2017; Câmara Brasileira da Indústria da Construção, 2016).

O BEM tradicional não está integrado no processo de projeto digital, sendo assim um processo trabalhoso, demorado e muitas vezes caro. O BEM baseado em modelos BIM é uma área da tecnologia BIM que tem ganho grande atenção no meio acadêmico e profissional. Esta metodologia tem o potencial de minimizar o tempo e custo da modelação energética, avaliar rapidamente diferentes alternativas de projeto, melhorar a precisão da modelação energética do edifício, resultando em melhor desempenho energético (Gao, Koch, & Wu, 2019).

A metodologia BEM baseada em BIM utiliza o modelo em desenvolvimento como base de dados de entrada para as ferramentas BEM, incluindo as informações do projeto de arquitetura, cargas térmicas internas, propriedades de materiais e sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC). Porém, o BEM não está suficientemente integrado e sincronizado no processo digital e ainda não se beneficia do fluxo contínuo de informações da modelação BIM. Por enquanto, as informações necessárias à análise energética precisam ser inseridas manualmente nas ferramentas BEM, ainda que estas informações já estejam disponíveis nos modelos BIM. Como resultado, as estratégias de projeto para eficiência energética não são implementadas na fase inicial de projeto (Gao et al., 2019).

No método de simulação paramétrica é avaliado o impacto da modificação dos dados de entrada no desempenho energético do edifício variando um dos parâmetros, enquanto os outros são mantidos fixos. Desta forma pretende-se identificar os componentes que realmente sejam relevantes para o desempenho energético e selecionar melhores as alternativas (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2017). Para alcançar uma solução otimizada para um problema com menos tempo e trabalho, o modelo computacional do edifício é solucionado por métodos iterativos automatizados por programação computacional (Garwood, Hughes, Oates, O'Connor, & Hughes, 2018).

Gao et al. (2019) apresentaram uma revisão das aplicações do BIM e BEM no processo de projeto de edifícios e do desenvolvimento dos métodos de BEM com base em BIM e das principais estruturas de informação. Foram analisados diversos trabalhos publicados entre 2000 e 2018. O estudo concluiu que a abordagem BEM baseada em BIM pode ajudar os projetistas a avaliar as opções de projeto e tomar decisões de forma mais eficiente. Esta metodologia deve ser utilizada ainda nas fases iniciais de projeto, onde as soluções mais adequadas e económicas podem ser mais bem exploradas e integradas no projeto do edifício.

Os autores Pezeshki, Soleimani e Darabi (2019) exploraram a utilização do BIM como base de dados na metodologia BEM, através da revisão e classificação de artigos publicados entre 2015 e 2018. De acordo com a revisão realizada, muitos trabalhos utilizaram outras bases de dados que não o BIM. Ainda há poucas informações que auxiliem a implementação de um fluxo de trabalho e de dados eficiente e compreensível, que cubra todas as fases de projeto (Pezeshki, Soleimani e Darabi, 2019). Porém, ainda que limitadas, estas informações alcançaram importantes resultados e avanços.

Outros autores, nomeadamente Farzaneh, Monfet, & Forgues (2019), ressaltam que para o sucesso da execução do BIM-BEM, é necessário considerar dois aspectos principais: processos e tecnologia. O processo está ligado às atividades e decisões que precisam ser realizadas pelos profissionais e os fluxos

de trabalho que integrem o BEM no processo de projeto, já a tecnologia está ligada às metodologias de integração, esquemas de dados e interoperabilidade.

Para que isso seja realizado, é necessária a proposição de técnicas apropriadas para cada fase de projeto e incorporação das técnicas dentro do processo de projeto. A revisão sistemática da literatura mostra que esta combinação raramente é encontrada entre os estudos BIM-BEM atuais. É necessário um enquadramento que defina as abordagens técnicas, as atividades de modelação e projeto e os fluxos de trabalho do processo de projeto de maneira compreensível e generalista. Este enquadramento deve definir claramente os objetivos da simulação energética, os procedimentos de projeto, fluxo de dados e de trabalho, técnicas relevantes de modelação e integração em cada fase de projeto, os requisitos das informações, Nível de Desenvolvimento (ND ou LOD, da designação em inglês *Level Of Development*) e as interações BIM-BEM em cada fase (Farzaneh et al., 2019).

2.2.3 Normas BIM para análise de energia

A série de publicações *Commom BIM Requirements* (COBIM) é uma das maiores referências de regulamentação BIM no mundo. Foi desenvolvida em parceria por diversas organizações da indústria da construção e entidades governamentais da Finlândia (BuildingSmart Finland, 2012a). O COBIM define requisitos mínimos de projeto durante as suas várias fases de desenvolvimento. Os guias COBIM são divididos em vários temas, sendo um deles dedicado à análise de energia.

O COBIM *Energy Analysis* (2012b) indica os potenciais usos e define os requisitos necessários para a análise de energia nos diferentes estágios do projeto. Também apresenta os requisitos mínimos dos programas computacionais e das trocas de informação entre as disciplinas de arquitetura, estrutura e sistemas.

A *General Services Administration* (GSA) dos Estados Unidos também publicou uma série de guias para o desenvolvimento do uso do BIM. O guia dedicado ao desempenho energético (U.S. General Services Administration's, 2015) mostra a utilização da análise de energia nas diversas fases do projeto, além dos requisitos necessários para o modelo, como geometria, materiais, sistemas, espaços e zonas térmicas. O guia também aborda os formatos de dados para a interoperabilidade, como IFC e XML.

Os autores Beazley, Heffernan e McCarthy (2017) analisaram as atuais limitações da interoperabilidade entre o BIM e a avaliação de energia. Os problemas destacados foram a falta de clareza na especificação do conteúdo do modelo, a interdependência de responsabilidade entre as disciplinas e a falta de regulação digital e ferramentas para a verificação e validação automatizada de modelos em

desenvolvimento. Os autores mostraram que os exemplos bem-sucedidos de implementação BIM da GSA dos Estados Unidos e do COBIM na Finlândia e Noruega, podem ser utilizados para guiar a solução destes problemas.

No Brasil, a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), em conjunto com o Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC), desenvolveram o Guia de Avaliação de Desempenho Energético em Projetos BIM (2017). O guia apresenta, de acordo com as possibilidades de avaliação nos diferentes níveis de desenvolvimento do projeto, os requisitos do modelo para viabilizar a avaliação e a etiquetagem energética de edifícios projetados através do BIM. O desenvolvimento deste guia visa ajudar as equipas de projeto no planeamento e desenvolvimento dos seus respectivos Planos de Execução BIM, durante todas as fases do ciclo de vida de um edifício: planeamento, projeto, construção, comissionamento e operação. O Guia destaca as oportunidades e fornece orientações para verificar o desempenho térmico e a eficiência energética de edifícios por meio da modelação para a análise de energia baseada em BIM. O objetivo é aumentar a precisão e consistência das estimativas de uso de energia e a eficiência do desempenho real da construção por meio da implementação de tecnologias adequadas relacionadas com o BIM.

2.2.4 Análise energética nas diferentes fases do projeto

Para alcançar uma solução otimizada em termos energéticos, é imprescindível que os projetistas de sistemas de sistemas de ventilação, ar condicionado e iluminação participem no processo desde o início, para que seja possível identificar os erros e soluções pouco económicas antecipadamente. A solução destes problemas torna-se muito mais difícil quando os espaços e estruturas já estão definidos. O potencial de utilização da análise energética pode alcançar todos estágios do projeto, da fase conceitual até a operação e manutenção (BuildingSmart Finland, 2012b, 2012c)

As análises preliminares de energia podem ser baseadas nos dados de área construída e categorias de espaço, utilizando valores de referência. Inicialmente é possível elaborar um modelo de energia simplificado para comparar alternativas de volumetria, influência da orientação solar, percentual de abertura das fachadas. Estas análises podem ser utilizadas para avaliar se as metas de utilização de energia são realísticas e alcançáveis (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2017; BuildingSmart Finland, 2012b, 2012a).

Mais adiante, na fase de projeto esquemático, são adicionadas informações sobre as envolventes, como tipo de fachada, tipos de janelas, presença de dispositivos de sombreamento, informações sobre os sistemas técnicos e tipos de espaço, de acordo com o modelo de arquitetura. Ao analisar os resultados,

é importante notar em que nível as informações são baseadas em suposições ou em soluções já definidas. As informações iniciais e suposições utilizadas devem ser documentadas com os resultados da análise correspondente (BuildingSmart Finland, 2012a, 2012b).

Durante a fase de desenvolvimento do projeto, o objetivo da análise de energia é simular os efeitos das decisões de projeto do ponto de vista do comportamento térmico e do consumo de energia. As necessidades dos sistemas de ar condicionado devem ser calculadas separadamente para cada espaço e levar em conta diferenças como a orientação solar. Além do modelo de arquitetura, são necessárias informações mais detalhadas sobre a estrutura, tipos de janelas e portas (BuildingSmart Finland, 2012b).

Os modelos preparados na fase de projeto detalhado podem ser utilizados para gerar as simulações finais de energia e cálculos do custo de ciclo de vida, que podem ser comparados com os custos reais de utilização durante a fase de ocupação do edifício. Estes modelos podem ser utilizados na fase de licenciamento do edifício para a emissão de certificados energéticos (BuildingSmart Finland, 2012a). Nessa fase, o modelo tem o objetivo de atender aos códigos de desempenho energético, apresentando alguns dos dados necessários para qualquer certificação de construção sustentável (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2017).

Durante o período de comissionamento e garantia, o objetivo é garantir que a operação do edifício esteja de acordo com as metas em termos de conforto e eficiência energética, além de criar uma base para o monitoramento das metas durante a operação e manutenção (BuildingSmart Finland, 2012b). Durante o comissionamento, o modelo computacional de energia permite que os profissionais responsáveis possam validar e ajustar o projeto. Nessa fase, é possível verificar e comparar o desempenho energético do edifício real com o edifício virtual (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2017).

Na fase de operação e manutenção, a análise de energia poder ser utilizada para assegurar que o comportamento do edifício está de acordo com as metas, monitorando as condições internas e o consumo de energia. Os efeitos de alterações ocorridas na fase de operação podem ser avaliados para a revisão das metas. As análises também podem ser úteis na resolução de casos de mal funcionamento (BuildingSmart Finland, 2012b).

A calibragem do modelo de energia é utilizada para análises de reabilitação energética e análise contínua de desempenho. O processo de calibragem compara os resultados da simulação com os dados medidos e ajusta os parâmetros da simulação para que os resultados sejam coincidentes. As medições de consumo real podem ser realizadas de várias formas, o desafio é integrar efetivamente os dados coletados no modelo. Utilizando o modelo calibrado como referência, é possível avaliar o impacte das

medidas de eficiência energética de forma mais rigorosa e assertiva (U.S. General Services Administration's, 2015).

Durante os estágios iniciais de projeto, comparar alternativas é mais importante que a obtenção de valores absolutos (Attia, Gratia, De Herde, & Hensen, 2012). Os resultados comparativos entre alternativas de projeto são considerados relativamente precisos, pois são baseados nas mesmas premissas e suposições. Mesmo que os resultados não sejam tão próximos do real, as diferenças relativas entre as simulações costumam ser confiáveis (Maile, Fischer, & Bazjanac, 2007).

Os autores Chong, Lee e Wang (2017) analisaram o potencial de utilização do BIM para a promoção da sustentabilidade através de uma revisão sistemática de normas, guias de orientação para aplicação do BIM e publicações académicas sobre o assunto. Os resultados foram classificados de acordo com as diversas fases do ciclo de vida do edifício: planeamento, projeto, construção, operação e manutenção, reabilitação e demolição, uso de produtos e materiais, e consumo de energia. Entre as conclusões, está a necessidade de melhorar a interoperabilidade entre programas BIM e ferramentas de simulação energética.

2.2.5 Nível de Desenvolvimento

Durante o desenvolvimento de um projeto em BIM, o volume de informações agregadas ao modelo cresce progressivamente, tornando-o cada vez mais complexo. Para definir o grau de definição do modelo é utilizado o conceito de Nível de Desenvolvimento (ND), ou *Level Of Development* (LOD). A definição do conceito LOD é necessária pois diferentes etapas ou usos do BIM podem requerer modelos mais genéricos ou com maior grau de precisão das informações.

Os modelos normalmente contêm elementos com diferentes LOD. O termo LOD descreve o nível de informação geométrica e semântica de componentes da construção individualmente, mas não do modelo por completo.

A incorporação dos níveis de desenvolvimento na especificação dos requisitos mínimos de modelação são o elemento chave para o desenvolvimento de cada utilização BIM. A especificação do LOD permite aos intervenientes do projeto definir as limitações e a usabilidade dos seus modelos desenvolvidos, bem como como as exigências necessárias para desenvolverem determinadas utilizações BIM com base em modelos que não são da sua autoria (Caires, Azenha, Lino, & Lacerda, 2014).

Os investigadores Jin, Zhong, Ma, Hashemi, & Ding (2019) sintetizaram as atividades, resultados e o LOD necessários para cada fase da análise de desempenho de um edifício, baseados na definição do

Royal Institute of British Architectcs (RIBA). No projeto conceptual (LOD100) é possível analisar os fatores essenciais que afetam o consumo de energia do edifício, como iluminação e ventilação naturais, forma, tamanho e orientação do edifício, tipo de edifício. Deve ser realizada a análise de incidência solar e de sombra, análise preliminar de cargas térmicas. Durante o projeto preliminar (LOD200) devem ser realizadas análises mais detalhadas, que auxiliem os projetistas na tomada de decisões de projeto que levem à otimização do desempenho do edifício. Já no projeto detalhado (LOD300), devem ser realizadas as avaliações formais para a certificação de sustentabilidade. A definição de níveis de desenvolvimento permite a troca de informação e partilha de dados entre o BIM e BEM em diferentes fases do projeto (Jin et al., 2019).

Uma das maiores dificuldades na implementação do BEM com base em BIM é que os modelos BIM normalmente contêm grande quantidade de informação e detalhes desnecessários, que tornam o modelo BEM demasiadamente complexos. Em contrapartida, algumas informações essenciais para o BEM como, as zonas térmicas e condições da envolvente não estão presentes nos modelos BIM (Gao et al., 2019). Por este motivo, é necessário definir o nível de desenvolvimento das informações necessário para a análise de energia em cada fase.

2.2.6 Influência do comportamento do ocupante

O comportamento do ocupante tem uma influência crítica no consumo de energia de um edifício, sendo necessário integrar este fator no quadro de políticas de eficiência energética. Aumentar a conscientização dos ocupantes sobre a sua influência no uso de energia e implementar mudanças de comportamento pode ser uma medida de melhor custo-benefício que a instalação de equipamentos mais eficientes. Também são medidas com maior probabilidade de serem implementadas de forma abrangente pelos utilizadores dos edifícios do que as soluções técnicas (Zhang, Bai, Mills, & Pezzey, 2018).

A Agência Internacional de Energia (IEA, sigla em inglês para *International Energy Agency*) define o comportamento do ocupante como as ações e reações de uma pessoa em resposta aos estímulos internos e externos, ou respectivas ações e reações de uma pessoa para adaptar as condições do ambiente como temperatura, qualidade do ar e iluminação solar.

É necessário um melhor entendimento dos padrões de ocupação e comportamento do ocupante para diminuir a diferença entre o consumo de energia medido e calculado. Devido à complexidade dos parâmetros relacionados com o comportamento do utilizador, ainda não há pesquisa suficiente sobre o assunto (Simanic, Nordquist, Bagge, & Johansson, 2019).

Um estudo desenvolvido por Simanic et al. (2019) mostrou que os parâmetros relacionados com o comportamento do ocupante apresentam um influência significativa no desempenho energético de edifícios com baixo consumo de energia (*low-energy*). A definição dos parâmetros relacionados com os ocupantes é um dos principais fatores da diferença entre o consumo energético real e calculado. O trabalho dos autores analisa os parâmetros relacionados com o ocupante através de medições destes parâmetros em sete escolas *low-energy* recentemente construídas na Suécia. A taxa de ventilação e a configuração do termostato de aquecimento mostraram-se os parâmetros com efeitos mais relevantes no consumo total de energia.

Um dos fatores do comportamento do ocupante mais estudados é a operação de janelas, devido ao grande impacte desta variável na qualidade do ambiente interior e no consumo de energia. Outros fatores do comportamento humano importantes são a manipulação de cortinas e outros dispositivos de sombreamento, ligar e desligar iluminação, adaptação das roupas (Zhang et al., 2018).

Um outro estudo desenvolvido por Zhang et al. (2018) consistiu na realização de uma revisão acerca da influência do comportamento humano no desempenho energético dos edifícios. Foram identificados quatro tópicos críticos de pesquisa: o atual entendimento do comportamento dos ocupantes, com foco na operação de janelas, controle de iluminação e aquecimento/arrefecimento de ambientes; métodos e técnicas de recolha de dados; modelação quantitativa e avaliação do potencial de economia de energia baseados no comportamento do ocupante. Dentre as conclusões, estima-se que o potencial de economia de energia baseada no comportamento dos ocupantes seja de 10 a 25% em edifícios residenciais e de 5 a 30% em edifícios comerciais. Apesar dos diversos estudos acerca do comportamento humano e do desempenho energético de edifícios, o entendimento do tema ainda é vago, confuso e inconsistente.

2.2.7 Ferramentas BEM e formatos para interoperabilidade

Atualmente, existem centenas de ferramentas para avaliação energética. O *website BEST Directory*, disponível em [www.buildingenergysoftwaretools.com], funciona como um repositório onde estão listadas mais de 200 ferramentas de análises de energia e iluminação em edifícios. Grande parte dessas ferramentas utiliza como motores de análise de desempenho o *EnergyPlus* e o DOE-2. No entanto, também há programas que utilizam motor de cálculo próprio.

A maioria das ferramentas de análise energética são utilizadas para prever ou avaliar o desempenho energético do edifício, durante vários estágios do seu ciclo de vida. Normalmente, estas ferramentas são compostas por duas partes: uma interface gráfica do usuário (GUI, sigla do inglês *Graphical User Interface*) e um motor de cálculo. A interface gráfica normalmente permite a criação de geometria do

modelo de energia, facilita a inserção dos dados de entrada e a análise dos dados de saída, assim como as configurações da simulação. Os motores de cálculo são responsáveis pelos cálculos térmicos e energéticos. Muitas vezes os motores de cálculo e os programas de interface gráfica são desenvolvidos independentemente (Kamel & Memari, 2018; Sanhudo et al., 2018).

Para que as informações possam ser transferidas de um programa para outro, é necessário utilizar formatos de arquivos que permitam a interoperabilidade. Os formatos para interoperabilidade entre BIM e BEM mais importantes e conhecidos são o *Industry Foundation Classes* (IFC) e o *green building Extensible Markup Language* (gbXML)(Farzaneh et al., 2019; Kamel & Memari, 2018).

O formato *green building Extensible Markup Language* (gbXML) foi desenvolvido pela empresa *Green Building Studio* (que foi posteriormente adquirida pela *Autodesk*), e é baseado no formato *Extensible Markup Language* (XML). A aplicação do gbXML concentra-se principalmente no campo da simulação energética. O gbXML permite a interoperabilidade entre diversas ferramentas BIM e BEM. Comparativamente ao IFC, que tem como objetivo representar os aspectos do edifício como um todo, o gbXML teve o seu desenvolvimento voltado para a transferência de dados entre o modelo BIM e as ferramentas BEM (Gao et al., 2019).

O formato gbMXL foi desenvolvido para facilitar a modelação energética, enquanto o IFC é mais compreensível e inclui outros tipos de dados que podem ser desnecessários para a análise de energia. Embora ambos os formatos sejam considerados formatos de arquivo BIM compreensíveis e capacitados, as ferramentas BIM podem não ser capazes de transferir a informação necessária para o arquivo ou a ferramenta BEM pode não ser capaz de ler as informações apropriadamente (Kamel & Memari, 2018).

Os autores Gao, Koch e Wu (2019) focaram a sua análise na transferência de dados entre o BIM e o BEM. Os autores classificaram a transferência de dados, que foi organizada em seis níveis: (1) geometria, (2) materiais, (3) tipos de espaço, (4) zonas térmicas, (5) cargas térmicas e (6) sistemas AVAC. Os resultados mostraram que na maioria dos casos que utilizaram o IFC como formato de interoperabilidade, a transferência de dados se limitou ao nível 1. Já o formato gbXML se mostrou capaz de transferir informações sobre a geometria, materiais e tipo de espaço, alcançando o nível 3 de transferência de dados.

Kamel e Memari (2018) realizaram três estudos de caso para investigar as potenciais dificuldades e desafios no processo de interoperabilidade entre ferramentas BIM e BEM utilizando arquivos no formato gbXML. As ferramentas utilizadas foram o *Autodesk Revit, OpenStudio*, *Green Building Studio* e *EnergyPlus*. Os resultados mostraram que nem todas as informações necessárias para a simulação de

energia como dados do sistema AVAC, padrões de uso e cargas térmicas foram exportados apropriadamente para o arquivo gbXML usando o *Revit*, e estes dados tiveram que ser adicionados manualmente. Adicionalmente, foi desenvolvida uma ferramenta corretiva utilizando o *Python* para mitigar os problemas de interoperabilidade.

Um estudo realizado por Queiróz (2016) avaliou a interoperabilidade entre o programa *Revit* e o programa *EnergyPlus*, utilizando diferentes métodos de exportação de arquivos. Foram testadas duas geometrias com diferentes complexidades. Os modelos foram elaborados no *Revit* utilizando processos de modelação com massas conceituais e elementos de construção com ambientes e espaços inseridos. Foi elaborado, também, um modelo de referência no *SketchUp* com o *plugin OpenStudio*. Os modelos do *Revit* exportados nos formatos IFC e gbXML foram convertidos em outros programas para o formato IDF, compatível com o *EnergyPlus*. Também foi exportado por integração direta com o *Green Building Studio* um arquivo em IDF (*Input Data File*, que é o formato utilizado pelo programa *EnergyPlus*). Foram comparados os resultados das geometrias exportadas, as configurações de energia e de materiais nos arquivos e os resultados das análises de temperatura das simulações. A modelação utilizando massas conceituais apresentou menos distorções de geometria do que os elementos de construção. O arquivo exportado diretamente em IDF modelado com elementos de construção com espaços inseridos apresentou a melhor conformidade de configurações de energia. A maior complexidade do modelo implicou em maiores distorções de geometria. O programa *Revit* ainda não possui capacidade de gerar o modelo de energia de maneira ideal (Queiróz, 2016).

Outro autor, Pretti (2018), avaliou a interoperabilidade do programa *Revit* com outros programas BEM. Foi modelado um edifício comercial de vários pisos utilizando elementos construtivos (piso, paredes, cobertura) para definir a geometria dos espaços. Os programas eQUEST, IES-VE e *OpenStudio* apresentaram problemas de interoperabilidade e não foi possível realizar as simulações energéticas. O programa *DesignBuilder* apresentou perdas e distorções de informação, gerando resultados não confiáveis. Os programas *Green Building Studio* (GBS) e *Insight* realizaram as simulações de forma satisfatória, porém os resultados divergem do esperado. O *EnergyPlus* foi a única ferramenta que apresentou resultados de acordo com as expectativas ao comparar os dois modelos simulados.

Os autores Sartori e Calmon (2019) realizaram uma análise da energia incorporada dos materiais e da energia operacional de um edifício. Foi utilizada a plataforma BIM *ArchiCAD* para modelar o edifício estudado e o modelo foi utilizado para extrair o quantitativo de materiais para a *Life Cicle Energy Analysis* (LCEA). Para esta análise foi utilizado o programa *SimaPro* e a base de dados *Ecoinvent*. Porém, o modelo

BIM não foi aproveitado na análise da energia operacional. Os autores tiveram que repetir as tarefas de criar o modelo de energia utilizando o programa *ScketchUp* com o plug-in *Euclid* para a simulação energética no *EnergyPlus*, demonstrando a falta de integração entre a metodologia BIM e simulação energética de edifícios.

Embora os programas comerciais BEM tenham sido desenvolvidos para suportar o processo de geração de modelos de energia utilizando BIM através do gbXML, só é possível obter um modelo de energia confiável após verificações e modificações manuais. Os programas BIM e BEM ainda não possuem uma interoperabilidade completa, ao contrário do que afirmam muitas empresas de desenvolvimento de programas informáticos (Gao et al., 2019).

O desenvolvimento do BEM baseado em BIM ainda se encontra em estágio inicial e poucos métodos podem garantir a geração de modelos de energia a partir do BIM de forma confiável e sem erros. Porém, há um grande potencial de melhorar a interoperabilidade, velocidade e fiabilidade das simulações de energia, além de integrar de forma orgânica as estratégias de eficiência energética no projeto de edifícios (Gao et al., 2019).

Os autores Abanda & Byers (2016) estudaram o impacte da orientação no consumo de energia de um edifício. O modelo de energia foi criado no *Revit* e exportado para o GBS utilizando o formato gbXML. A investigação mostrou que o impacto da orientação no consumo de energia pode ser substancial e os resultados foram comprovados pelas medições reais, demonstrando que os valores usados pelo GBS na simulação estavam dentro da faixa adequada.

Kim, Zadeh, Staub-French, Froese, & Cavka (2016) também utilizaram o *Revit* e o GBS para analisar a influência das janelas na carga térmica de aquecimento e arrefecimento de um edifício residencial. Variando o percentual de abertura das fachadas, orientação e posição das janelas, 65 cenários foram criados. As simulações mostraram que, para o local definido no projeto, o aumento do tamanho das janelas foi o fator crítico para o aumento das cargas térmicas.

(Singh & Sadhu, 2019) realizaram um estudo com foco no efeito da morfologia urbana no desempenho energético de um edifício. Também foi avaliado o efeito das variáveis internas (Percentual de Abertura da Fachada (PAF), paredes, cobertura, sistema AVAC) e externas (orientação, localização, construções no entorno e condições climáticas). Os edifícios foram modelados no *Revit* e o GBS foi utilizado na simulação de energia. Os edifícios podem ter suas condições de iluminação e ganhos solares modificadas pela influência das outras.

3. METODOLOGIA

3.1 Programas utilizados no estudo

Neste trabalho foram avaliadas as potencialidades da plataforma *Revit* na criação e análise de modelos de energia automaticamente a partir de modelos BIM. Foram criados modelos a partir do método de massas conceituais e utilizando elementos construtivos, que foram analisados através de diferentes ferramentas de simulação.

Na primeira etapa, o modelo do edifício foi criado utilizando massas conceituais e analisado através do *plug-in Insight*, que envia o modelo criado no *Revit* diretamente para a ferramenta de simulação em nuvem *Green Building Studio*, onde são realizadas mais de 240 simulações paramétricas predefinidas. Após completar as simulações, os resultados podem ser visualizados através da interface do *Insight* na página do programa [insight.autodesk.com].

O *Revit* cria automaticamente um arquivo gbXML do modelo de energia e envia-o para o *Insight* e GBS para análise. Enquanto na página do GBS é possível visualizar o resultado de cada simulação individualmente, o *Insight* apresenta os resultados de forma mais intuitiva de forma a auxiliar nas decisões de projeto (Leavitt, 2019).

O *Insight* funciona como uma ferramenta que facilita a interpretação de todas estas simulações através de gráficos interativos. A ferramenta *Insight* tem como foco a análise preliminar dos modelos. Através dos diversos cenários criados é possível selecionar as melhores opções para a eficiência energética do edifício. O *Insight* possui poucas exigências quanto à definição das configurações iniciais de simulação, uma vez que basta inserir a volumetria e localização do edifício, pois grande parte dos parâmetros necessários para a análise de energia possui valores predefinidos.

Na segunda etapa, o modelo de energia foi criado a partir dos elementos construtivos do modelo de arquitetura e analisado utilizando o *Insight* e a função Análise de Sistemas. Esta funcionalidade integra o potencial do *EnergyPlus* e *OpenStudio* dentro a plataforma *Revit*, sem a necessidade de exportação do modelo de energia.

Diferentemente do *Insight*, que pretende analisar diversos cenários utilizando configurações mínimas de energia, a Análise de Sistemas promove uma análise detalhada do consumo de energia e cargas térmicas do edifício, e para isso é necessário criar e configurar os Espaços, Zonas e Sistemas AVAC.

Complementarmente, o modelo do edifício em análise foi criado e simulado através dos programas *SketchUp* e *OpenStudio* para servir de base comparativa para os resultados do *Revit* e *Insight*.

A terceira etapa do trabalho foi a avaliação da interoperabilidade dos modelos criados pelo *Revit* com os programas *OpenStudio* e *EnergyPlus*. O *EnergyPlus* é uma das ferramentas mais completas e utilizadas para a simulação energética, porém, o programa não possui interface gráfica e sua utilização é pouco amigável ou intuitiva. O *OpenStudio* surgiu como uma ferramenta para facilitar a configuração e simulação dos modelos de energia e utiliza o *EnergyPlus* como motor de cálculo. Ainda assim, dentro do *OpenStudio* não é possível criar a geometria do modelo, sendo necessário um terceiro programa como, por exemplo, o *SketchUp*.

O *OpenStudio* tem a funcionalidade de importar e exportar arquivos em diversos formatos, entre eles o IDF e gbXML. O *Revit* apresenta a possibilidade de gerar arquivos em gbXML e o *Insight* disponibiliza arquivos em IDF e gbXML para serem utilizados em outros programas. Desta forma, foi avaliada a interoperabilidade dos arquivos gerados pelo *Revit* e *Insight* diretamente para os programas *OpenStudio* e *EnergyPlus*.

3.2 Descrição do edifício

Para o presente estudo, foi considerado um edifício comercial de planta livre típica do Brasil, inserida em três diferentes condições climáticas do país. A geometria do edifício em estudo foi baseada no trabalho de Brugnera (2018), que sintetiza as características médias principais deste tipo de edifício.

O edifício possui pavimento tipo de geometria retangular de 20 m x 40 m, totalizando 800 m², e a altura entre os pavimentos é de 3,7 m. A altura do pé direito é de 2,7 m devido ao forro rebaixado e o pavimento possui uma área central não condicionada de 300 m² destinada a instalações sanitárias, escada e elevadores.

O edifício foi dividido em cinco zonas térmicas (Figura 2). Além do centro, que é uma área não-condicionada, foram criadas quatro zonas térmicas para as áreas de escritórios, que são condicionadas. Esta divisão de zonas é necessária, pois as condições da envolvente são diferentes em cada orientação, devido a influência da exposição solar e ventos. As áreas próximas da fachada também sofrem maior influência das condições externas do que as áreas mais centrais do edifício.

No trabalho de Brugnera (2018), foi simulado um pavimento intermediário do edifício. Para isso, as lajes que separam os pisos do edifício foram configuradas como adiabáticas. As ferramentas de análise energética do *Revit* não apresentam esta possibilidade de configuração, portanto devem ser simulados

todos os pavimentos existentes no edifício. Para este presente estudo, foram considerados 10 pavimentos.

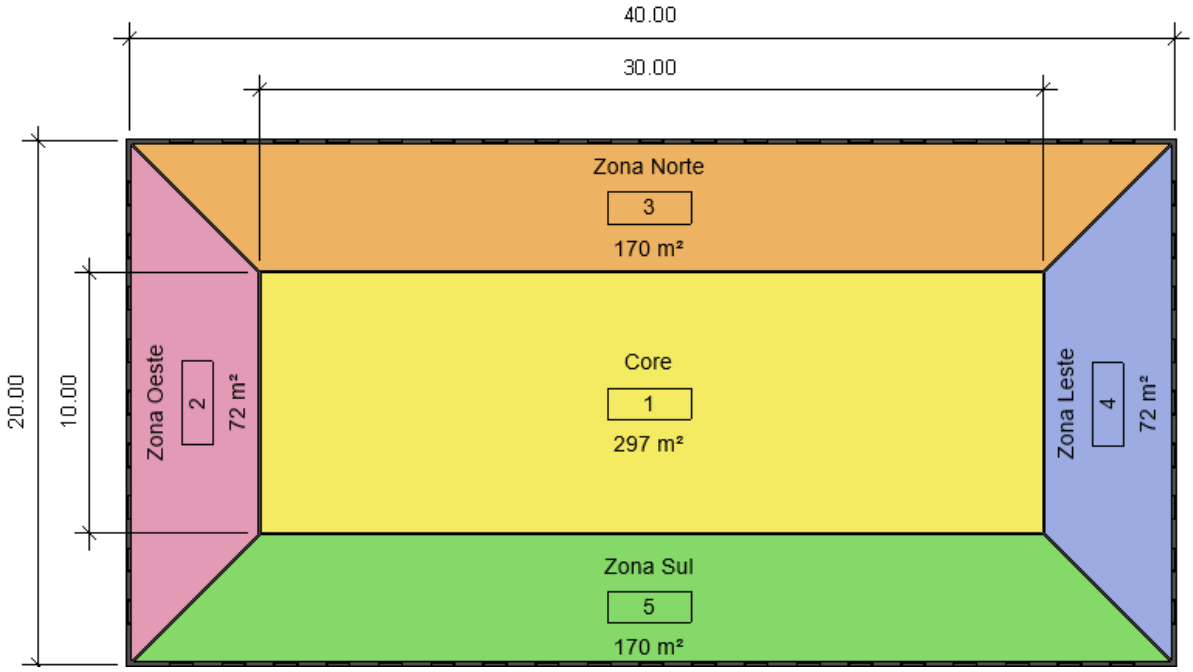


Figura 2 - Divisão das zonas térmicas

As paredes exteriores do edifício são construídas em blocos de concreto, revestidas com camada de argamassa de cimento no lado exterior e argamassa de gesso no interior. A Tabela 2 apresenta as características termo físicas dos materiais das camadas das paredes externas. As paredes internas são compostas por duas placas de gesso cartonado de 1,5 cm com uma caixa de ar de 5 cm entre as placas, como mostrado na Tabela 3. A cobertura do edifício é composta por uma laje de concreto de 10 cm e o teto rebaixado por um forro de gesso de 1,5 cm de espessura, como mostra a Tabela 4. O piso dos pavimentos é composto por uma laje de 10 cm de concreto, contrapiso de 3,5 cm e revestimento de pedra natural de 1,5 cm, com propriedades térmicas de acordo com a Tabela 5. As janelas são compostas por vidro simples de 8 mm com propriedades reflexivas, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades do vidro das janelas

Transmissão de luz visível	0,11
Coeficiente de ganho de calor solar	0,25
Coeficiente de transmissão térmica U [W/(m².K)]	5,84

Tabela 2 - Propriedades térmicas das camadas das paredes externas

Material	Espessura [m]	Condutividade térmica [W/(m.K)]	Resistência térmica [(m².K)/W]	Densidade [km/m²]	Calor Específico [kJ/(kg.K)]	Emissividade
Resistência superficial externa	-	-	0,04	-	-	-
Argamassa de cimento	0,025	1,15	0,022	2000	0,92	0,95
Blocos de concreto[1]	0,140	0,88*	0,159	949,5	1,00	0,95
Argamassa de gesso	0,005	0,70	0,007	1200	0,84	0,90
Resistência superficial interna	-	-	0,13	-	-	-
Resistência térmica total R_T [(m².K)/W]			0,358			
Coeficiente de transmissão térmica U [W/(m².K)]			2,79			

Tabela 3 - Propriedades térmicas das paredes internas

Material	Espessura [m]	Condutividade térmica [W/(m.K)]	Resistência térmica [(m².K)/W]	Densidade [km/m²]	Calor Específico [kJ/(kg.K)]	Emissividade
Resistência superficial interna	-	-	0,13	-	-	-
Placa de gesso	0,015	0,35	0,043	900	0,85	0,90
Caixa de ar	0,050	-	0,16	1,2	1,0	0,01
Placa de gesso	0,015	0,35	0,043	900	9,85	0,90
Resistência superficial interna	-	-	0,13	-	-	-
Resistência térmica total R_T [(m².K)/W]			0,506			
Coeficiente de transmissão térmica U [W/(m².K)]			1,98			

Tabela 4 - Propriedades térmicas da cobertura

Material	Espessura [m]	Condutividade térmica [W/(m.K)]	Resistência térmica [(m².K)/W]	Densidade [km/m²]	Calor Específico [kJ/(kg.K)]	Emissividade
Resistência superficial externa	-	-	0,04	-	-	-
Laje de concreto	0,100	1,75	0,057	2300	1,0	0,95
Espaço de ar	0,85	-	0,17	1,2	1,0	0,01
Forro de gesso	0,015	0,35	0,043	900	0,85	0,90
Resistência superficial interna	-	-	0,13	-	-	-
Resistência térmica total R_T [(m².K)/W]			0,440			
Coeficiente de transmissão térmica U [W/(m².K)]			2,27			

[1] A alvenaria de blocos de concreto, por ser um componente com camadas não homogêneas, teve suas características térmicas calculadas de acordo com a NBR 15220.

Tabela 5 - Propriedades térmicas da laje entre pavimentos

Material	Espessura [m]	Condutividade térmica [W/(m.K)]	Resistência térmica [(m².K)/W]	Densidade [km/m²]	Calor Específico [kJ/(kg.K)]	Emissividade
Resistência superficial interna	-	-	0,13	-	-	-
Piso pedra natural	0,015	3,00	0,005	2500	0,84	0,90
Contrapiso	0,035	1,15	0,030	2000	1,0	0,90
Laje de concreto	0,100	1,75	0,057	2300	1,0	0,95
Espaço de ar	0,85	-	0,17	1,2	1,0	0,01
Forro de gesso	0,015	0,35	0,043	900	0,85	0,90
Resistência superficial interna	-	-	0,13	-	-	-
Resistência térmica total R_T [(m².K)/W]			0,565			
Coeficiente de transmissão térmica U [W/(m².K)]			1,77			

3.2.1 Configurações de espaço

As cargas internas do edifício são provenientes dos ocupantes, iluminação artificial e equipamentos elétricos, como mostra a Tabela 6. O horário de ocupação é das 8h às 19h, de segunda a sexta-feira.

Tabela 6 - Configurações de espaço

Área por pessoa	8,0 m²
Ganho de calor total por pessoa	117 W
Densidade de carga de iluminação	9,7 W/m²
Densidade de carga de equipamentos	16,2 W/m²
Horário de ocupação	8h – 19h

3.2.2 Características do sistema de ar condicionado

O sistema de ar condicionado selecionado para o estudo é do tipo VRF (*Variable Refrigerant Flow*), que é um sistema central de expansão direta com múltiplas unidades evaporadoras. Esse sistema foi considerado um dos mais utilizados em grandes edifícios de escritórios atualmente (Brugnera, 2018). Nesse sistema há pelo menos um compressor com capacidade variável, o qual pode distribuir gás refrigerante através de uma rede dede distribuição, além de possuir dispositivos capazes de controlar a temperatura individual de cada zona térmica (Brugnera, 2018).

3.3 Seleção da localização de acordo com o clima

Para avaliar a influência do clima no consumo energético do edifício, foram selecionadas 3 cidades brasileiras que possuem diferentes características climáticas, como indica a Tabela 7. As cidades

Curitiba, Brasília e Vitória fazem parte da Zona 1, Zona 4 e Zona 8, respectivamente, de acordo com o Zoneamento Bioclimático Brasileiro, descrito do NBR 15220 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003) (Figura 3). Já de acordo com as Zonas Climáticas definidas pela ASHRAE Standard 169 (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2012) estas cidades são enquadradas na Zona 3A – Muito quente úmido, 2A – Quente úmido e 1A – Temperado úmido (Figura 4).

Tabela 7 – Cidades selecionadas para o estudo

Cidade	Zoneamento Bioclimático Brasileiro NBR 15220	Zonas Climáticas ASHRAE Standard 169
Vitória – ES	Zona 8	1ª – Muito quente úmido
Brasília – DF	Zona 4	2ª – Quente úmido
Curitiba – PR	Zona 1	3ª – Temperado úmido

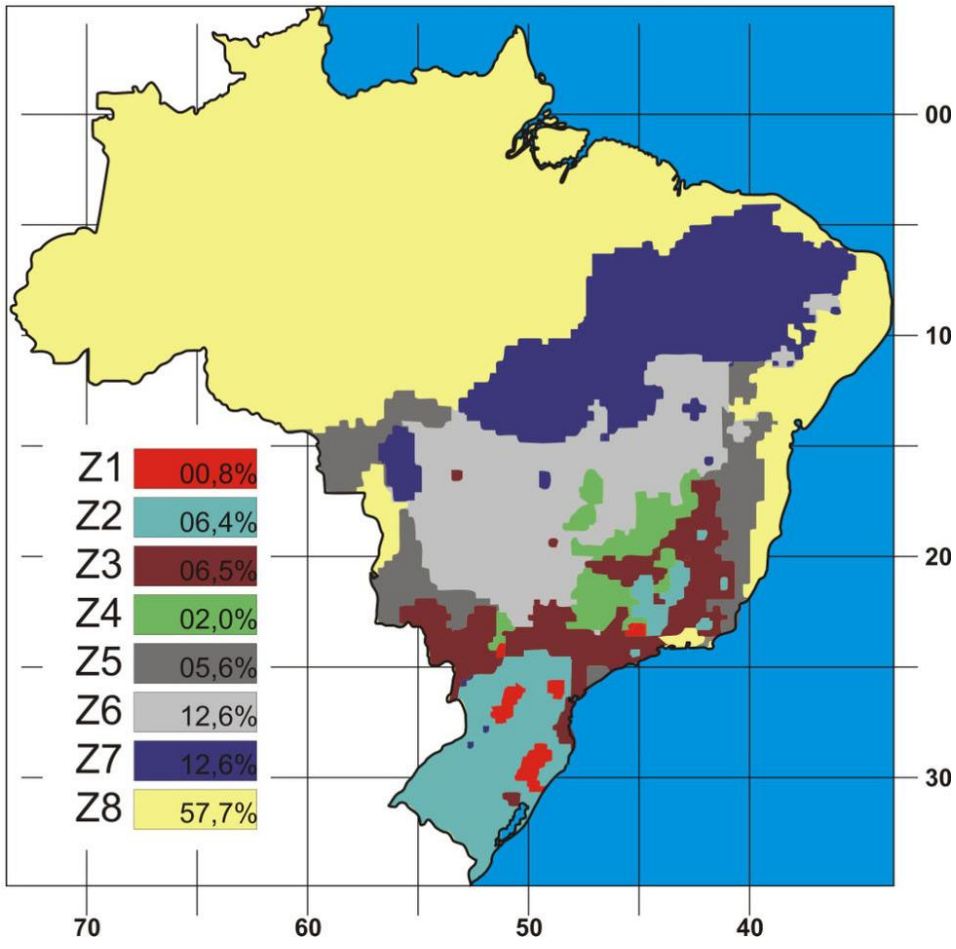


Figura 3 – Zoneamento Bioclimático Brasileiro segundo a NBR 15220

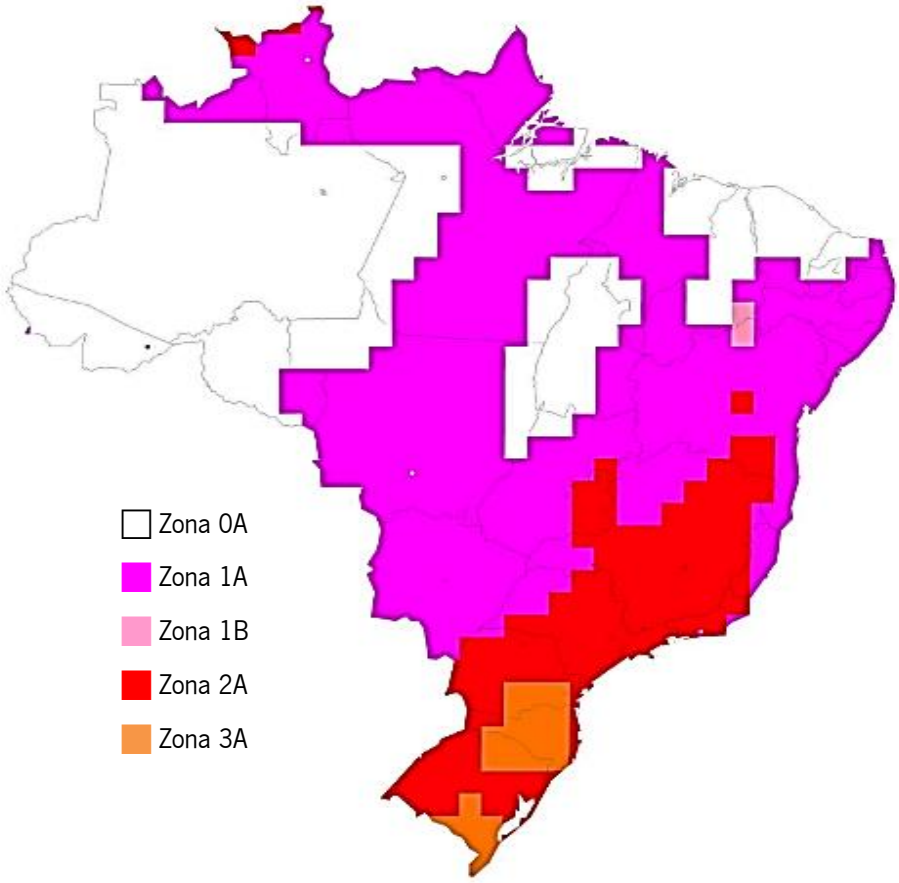


Figura 4 – Zonas climáticas segundo a ASHRAE Standard 169

4. RESULTADOS

4.1 Análise da utilização do programa Revit na criação de modelos de energia

O *Autodesk Revit* é atualmente uma das plataformas BIM mais difundidas no mundo. O programa permite criar e analisar modelos de edifícios, gerar documentação automática, tabelas de quantitativos e usufruir de todas as vantagens da metodologia BIM. O *Revit* possui funções para a criação de modelos multidisciplinares, integrando arquitetura, estruturas e MEP. O programa também permite a criação automática de modelos de energia para análise energética e pode ser integrado a outras ferramentas.

O *Insight* é um *plug-in* do *Revit* utilizado para a otimização energética do projeto. O *Insight* envia o modelo de energia para nuvem e utiliza o GBS como motor de cálculo. São geradas automaticamente mais de 200 simulações paramétricas que podem ser consultadas individualmente na página do GBS. O *Insight*, além de criar várias simulações automáticas, permite consultar os resultados de forma interativa, onde o projetista pode restringir as faixas de valores desejadas para cada parâmetro e perceber a influência de cada um deles de forma rápida e simples, mesmo para um profissional sem grandes conhecimentos sobre simulação e análise de energia.

Os parâmetros referem-se à orientação do edifício, percentual de aberturas nas fachadas, características dos elementos construtivos, eficiência da iluminação e equipamentos, sistema AVAC, perfis de operação e utilização de sistemas que aproveitem energias renováveis, nomeadamente sistemas fotovoltaicos. Os resultados são apresentados de forma a facilitar o entendimento da influência de cada um dos parâmetros, permitindo aos projetistas focarem-se nos fatores mais importantes.

Além da análise energética, o *Insight* também possui funções para análise de iluminação natural e da incidência solar no edifício.

Uma das funções mais recentes adicionada ao *Revit* na versão 2020.1 é a Análise de Sistemas. A Análise de Sistemas permite calcular as cargas térmicas do edifício e gerar relatórios anuais de consumo de energia. O *Revit* integra as funcionalidades do *EnergyPlus* e *OpenStudio* para realizar as simulações. O objetivo da ferramenta é otimizar o projeto de sistema AVAC.

A geometria do modelo de energia pode ser construída no *Revit* de duas formas. A primeira, e mais simples, é utilizando a função de massas conceituais. As massas conceituais permitem realizar uma simulação energética com base na volumetria e características genéricas do edifício. As propriedades dos materiais da envolvente podem ser selecionadas dentre as opções disponíveis no programa. A

densidade de cargas também possui predefinições genéricas de acordo com o tipo de utilização do edifício. As características como a percentagem de abertura das fachadas, fator de sombreamento das aberturas, aberturas zenitais também podem ser configuradas de forma simplificada.

Os estudos de volumetria utilizando massas conceituais são bastante úteis nas fases iniciais de um projeto. A partir delas é possível estimar a área de piso, área de fachada, volume e realizar análises preliminares de energia. As massas também podem ser utilizadas para representar construções e elementos do entorno do edifício.

A segunda forma de criar um modelo de energia é utilizando elementos construtivos do *Revit*, como paredes, pisos e coberturas. Com os elementos construtivos é possível detalhar com maior precisão os materiais utilizados, as aberturas e divisões de espaços internos. Com a utilização de elementos construtivos, também é possível a inserção de espaços, que são utilizados para guardar informações de área, volume, tipo de uso, tipo de condicionamento, densidades de carga, entre outras configurações de energia, que podem ser configuradas pelo ocupante.

4.2 Criação do modelo no *Revit* utilizando massas conceituais

Para a criação do modelo de energia foi inserida uma massa conceitual com a volumetria do edifício proposto. Os pavimentos são retangulares e possuem dimensão de 20m x 40m, totalizando uma área de 800 m² e o edifício possui 10 níveis de 3,75m de altura, como mostra a Figura 5.

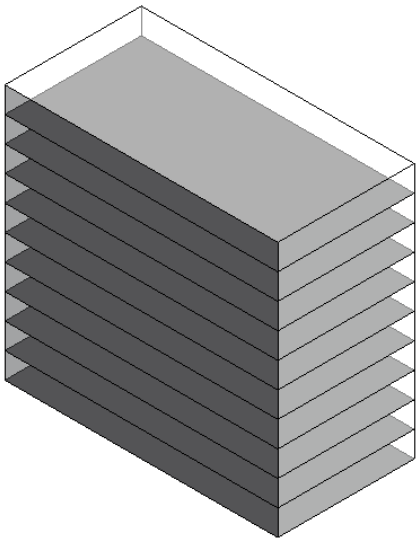


Figura 5 – Modelo de massa conceitual

A utilização de massas conceituais permite o cálculo automático das áreas e volume da edificação. Estas informações são importantes nas análises iniciais do projeto, como na estimativa de custos e estudo de volumetria, por exemplo. A Tabela 8 indica as áreas e volume brutos do edifício.

Tabela 8 – Áreas e volume brutos do edifício

Área bruta do piso	8000 m²
Área bruta da superfície	6100 m²
Volume bruto	30000 m³

O *Revit* constrói o modelo de energia com base nas massas conceituais, de acordo com as configurações de energia selecionadas. O *Revit* tem a capacidade de definir as zonas térmicas automaticamente. Para isso a profundidade da zona térmica do perímetro foi definida como sendo 5m. O percentual de abertura da fachada foi definido nas configurações de energia, inicialmente com o valor de 22%, depois 80%. Neste método de construção da geometria, o Revit permite inserir um único valor de PAF para todas as fachadas.

O tipo de construção foi definido como Escritório (*Office*). O *Revit* assume diversas configurações de acordo com o tipo de construção selecionado, como padrão de ocupação e cargas internas. Estas configurações podem ser consultadas na página de Ajuda da *Autodesk*, disponível em [www.help.autodesk.com].

A Tabela 9 apresenta os dados utilizados pelo *Revit* para o tipo de construção de Escritório e os dados especificados do edifício em estudo. Para a configuração de massas conceituais não é possível especificar os dados detalhadamente, portanto foram escolhidas as opções com valores mais aproximados do pretendido.

Tabela 9 – Dados do tipo de construção

Parâmetro	Valor do *Revit*	Valor especificado
Tabela de ocupação	Escritório	8h – 19h
Ganho de calor sensível por pessoa	73,3 W	117 W (total)
Ganho de calor latente por pessoa	58,6 W	
Densidade de carga de iluminação	9,7 W/m²	9,7 W/m²
Densidade de carga de equipamento	14,4 W/m²	16,2 W/m²
Fluxo de infiltração	0,4 RPH	

O padrão de operação foi definido como 12/5 (12 horas de operação por dia, 5 dias por semana), pois é o que mais se aproxima das características do edifício especificado. O sistema AVAC selecionado foi a bomba de calor tipo *split* 12 SEER/HSPF 7,7. Todos os sistemas disponíveis no *Revit* incluem unidade

de água quente residencial, não sendo possível desconsiderar a utilização de energia para este fim. A Tabela 10 apresenta os dados do sistema de ar condicionado selecionado.

Tabela 10 – Dados do sistema AVAC para massas conceituais

Bomba de aquecimento tipo *split* 12 SEER/HSPF 7,7
12 SEER/7,7 HSPF (Fator de Desempenho Sazonal de Aquecimento) eficiente < sistema de bomba de aquecimento *split*/ completo de 11,25 ton
Ventilador de volume constante curvado adiante e motor de eficiência *premium*
Manômetro de água de 2,0 polegadas (498 Pascals) com sistema de dutos de pressão estática de volume constante
Economizador de temperatura do bulbo seco diferencial integrado
Unidade de água quente residencial (fator de energia de 0,575)

Para as propriedades térmicas dos materiais foram utilizados os Tipos Esquemáticos. O *Revit* possui uma ampla biblioteca de materiais, porém as opções são mais apropriadas para o contexto do Estados Unidos e não apresentam opções para as construções típicas brasileiras, sendo necessário optar por alguma solução com características aproximadas.

Um problema verificado na tabela de referência dos Tipos Esquemáticos, disponível em [www.help.autodesk.com], foi que alguns valores de resistência térmica foram calculados incluindo a resistência superficial e outros não incluindo. Porém o efeito da resistência térmica superficial é contabilizado pelo motor de cálculo e o valor a ser inserido no programa é da resistência térmica do componente (Rt). Outra questão identificada foi o cálculo do coeficiente de transmissão térmica que é calculado em alguns casos como o inverso da resistência térmica do componente (Rt), porém deve ser sempre o inverso da resistência térmica total (R_T). A Tabela 11 apresenta os valores das propriedades térmicas dos elementos com os valores fornecidos pelo Revit e os valores corrigidos considerando a resistência térmica superficial.

Tabela 11 – Coeficiente de transmissão térmica dos elementos

Categoria	Tipo	U* [W/(m².K)]	Rt [(m².K)/W]	RT [(m².K)/W]	U [W/(m².K)]
Telhado	Telhado com moldura de madeira ou aço R-0	4,8351	0,207	0,377	2,65
Paredes externas	Parede de alvenaria de blocos de concreto de 8 pol (20,3 cm)	6,4528	0,155	0,325	3,08
Paredes internas	Partição com placa de gesso natural de ¾ pol (19,1 mm)	1,4733	0,679	0,939	1,18
Pisos	Deck de piso de concreto pesado de 4 pol (101,6 mm)	3,8651	0,25873	0,51873	1,93

O *Revit* criou diferentes zonas térmicas para cada pavimento, sendo uma central (*core*) e quatro no perímetro. Esta divisão é importante para se obter um modelo de energia mais apurado, pois leva em consideração a influência das condições externas nas áreas mais próximas à fachada e da direção de cada uma. A Figura 6 apresenta o modelo de energia criado automaticamente pelo *Revit* a partir do modelo de Massas Conceituais.

A criação do modelo de energia utilizando o método de massas conceituais é consideravelmente simples de ser realizada, pois é baseada em suposições genéricas e respeito do edifício. Como o *Revit* possui uma série de valores predefinidos, facilita a inserção das informações e minimiza a ocorrência de falhas de simulação. Este método é ideal para as estimativas preliminares de energia, porém a configuração dos dados de entrada é limitada às opções disponíveis no programa. Para a criação de um modelo de energia detalhado, este método possui grandes limitações, como a inserção de diferentes PAFs para cada fachada, opções de sistemas AVAC, configuração das cargas internas. Conclui-se que o método é ideal para as fases iniciais do projeto, quando se deseja realizar estimativas do consumo de energia do edifício, porém os dados do projeto ainda são genéricos.

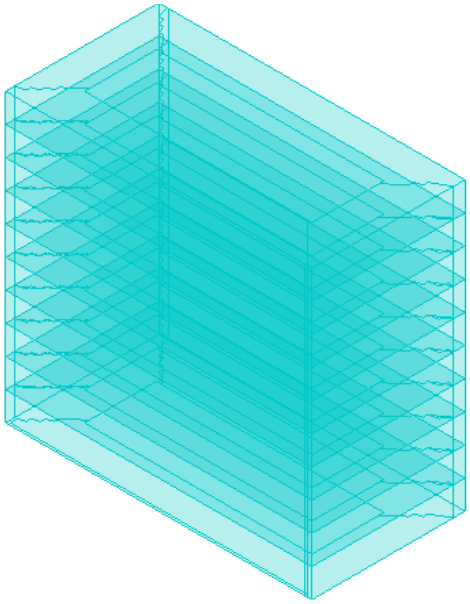


Figura 6 – Modelo de energia criado por massas conceituais

4.2.1 Resultados do *Insight*

Após a criação e configuração dos modelos, foi utilizada a ferramenta *Insight* para realizar as simulações. A Figura 7 mostra os valores de consumo máximo e mínimo do edifício para cada localização, de acordo com os parâmetros considerados pelo *Insight*. A ferramenta realiza diversas simulações do edifício,

variando as configurações de orientação, tamanho e sombreamento das aberturas, propriedades térmicas dos materiais da envolvente, cargas internas, entre outros. O resultado destas simulações gera uma faixa de valores, que podem ser filtrados de acordo com as preferências do utilizador.

Uma limitação do Insight são os resultados de consumo de energia não separados por uso final, sendo o consumo dos sistemas AVAC, iluminação e equipamentos apresentados em um único valor. Desta forma, não é possivel identificar a influência de cada sistema no consumo de energia.

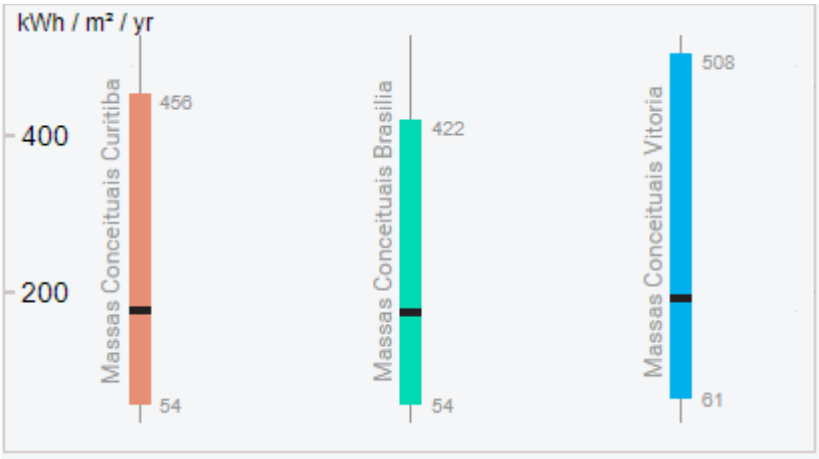


Figura 7 – Faixas de consumo de energia para diferentes localizações

O *Insight* apresenta o gráfico de resultados para os diversos cenários simulados, porém os resultados podem ser filtrados de acordo com os valores desejados para cada parâmetro. Os resultados foram filtrados para apresentar apenas a opção do modelo como configurado no *Revit*. A Figura 8 mostra os resultados para o consumo de energia de acordo com as as configurações modeladas.



Figura 8 – Resultados de consumo de energia de acordo com as configurações modeladas

Esta análise permitiu verificar as diferenças no consumo energético do edifício devido ao clima onde está inserido. Os resultados confirmam a tendencia esperada de que nas cidades mais quentes, o consumo de energia é mais elevado.

Os resultados de cada simulação podem ser manipulados de acordo com os valores desejados para cada parametro do *Insight*. Para este estudo foram destacados os parametros Percentual de Abertura da Fachada (PAF) e carga de iluminação. Estes parametros foram selecionados para avaliar a influência de um parâmetro da fachada e um parâmetro relativo às cargas internas.

A Tabela 12 mostra a variação do consumo de energia para duas opções de PAF, 22% e 80%, considerando a localização da cidade de Brasília. O resultado mostra que houve um pequeno aumento no consumo de energia. Este resultado explica-se devido à escolha do envidraçado com boa eficiência.

Tabela 12 - Variação do consumo de energia com o PAF utilizando vidro reflexivo

Localização: Brasília			
Vidro Reflexivo			
PAF	22%	80%	Diferença
Consumo de energia total	147 kWh/m²	149 kWh/m²	2 kWh/m² (+ 1,36%)

No *Insight* foi avaliada a variação do consumo de energia de acordo com o PAF, caso o vidro fosse do tipo simples e sem proteção solar (Tabela 13). Os resultados confirmam que, caso o vidro não tivesse propriedades de proteção solar, a influência do PAF no consumo de energia seria mais significativa.

Tabela 13 - Variação do consumo de energia com o PAF utilizando vidro simples

Localização: Brasília			
Vidro Simples claro			
PAF	22%	80%	Diferença
Consumo de energia total	152 kWh/m²	167 kWh/m²	15 kWh/m² (+ 9,87%)

O segundo parâmetro avaliado foi a densidade de carga de iluminação. A Tabela 14 mostra a variação do consumo de energia de acordo com a carga modelada (9,7 W/m²) e uma das variações de carga simuladas pelo Insight (20,45 W/m²).

Tabela 14 - Variação do consumo de energia com a carga de iluminação

Localização: Brasília			
Carga de iluminação	9,7 W/m²	20,45 W/m²	Diferença
Consumo de energia total	147 kWh/m²	187 kWh/m²	40 kWh/m² (+27,21%)

Além da energia consumida de forma direta pelo sistema de iluminação, o aumento da carga de iluminação também aumenta o consumo de energia do sistema AVAC, pois a iluminação produz calor que precisa ser retirado do ambiente para manter a temperatura de conforto.

As análises paramétricas geradas pelo *Insight* permitem avaliar a influência de cada parâmetro no consumo de energia do edifício. Ainda que as informações do projeto de massas conceituais não seja completa e precisa, esta análise gera resultados que permitem ao projetista perceber quais são as variáveis mais importantes e assim tomar melhores decisões desde o início da concepção do projeto. A análise energética realizada desde a fase conceptual do projeto permite estimar o consumo de energia e traçar metas de desempenho do edifício.

4.3 Criação do modelo no *Revit* utilizando elementos construtivos

Na segunda etapa do estudo, o modelo de energia foi criado a partir dos elementos construtivos do *Revit*, como paredes, pisos, lajes e janelas. A utilização dos elementos construtivos permite definir elementos com as camadas de materiais e propriedades desejados. Desta forma, é possível criar um modelo de energia mais detalhado, com divisões dos espaços internos, disposição de janelas, sistemas e cargas definidos para cada espaço.

A Figura 9 mostra o modelo criado no *Revit* utilizando os elementos construtivos. Para a divisão das zonas térmicas foi utilizado o elemento de Parede Interna. As propriedades térmicas dos materiais construtivos foram configuradas de acordo com a descrição do capítulo Metodologia.

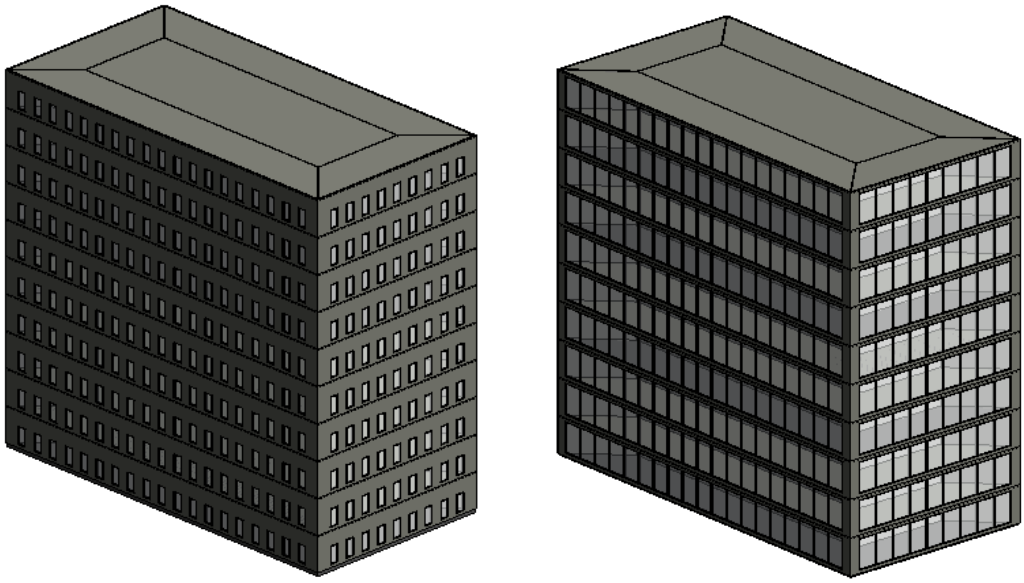


Figura 9 - Modelos com elementos construtivos (PAF 22% e 80%)

Com a utilização de elementos construtivos é possível a criação de Espaços para diferentes áreas do modelo. O *Revit* utiliza o componente espaço para manter informações sobre a área onde ele é colocado. O tipo de espaço está associado a informações como cargas térmicas internas, padrão de ocupação e fluxo de ar no espaço.

As informações inseridas no espaço sobrepõem-se àquelas definidas nas configurações de energia para a edifício. Se numa determinada região não for inserido nenhum espaço, serão utilizadas as configurações padrão para o Tipo de Construção.

O *Revit* possui no seu banco de dados valores padrão para os parâmetros do espaço de acordo com o seu tipo. Porém, estes valores podem ser alterados e novos tipos de espaço podem ser criados pelo projetista de acordo com seus objetivos. As tabelas de ocupação também podem ser configuradas livremente pelo projetista. A tabela de ocupação indica o percentual de ocupação do espaço de acordo com o horário e dia da semana. A Tabela 15 indica os valores utilizados para as configurações dos espaços.

Tabela 15 - Propriedades de espaço

Tipo de Espaço	Escritório Aberto
Área por pessoa	8,00 m²
Ganho de calor total por pessoa	117 W
Densidade de carga de iluminação	9,70 W/m²
Densidade de carga de equipamentos	16,20 W/m²
Taxa de infiltração por área	0,19 L/(s.m²)
Contribuição de iluminação do *plenum*	0%
Tabela de ocupação	8h às 19h
Tabela de potência	8h às 19h
Tabela de equipamentos	8h às 19h
Ar externo por pessoa	7,5 L/s
Ar externo por área	0,30 L/(s.m²)
Renovações de ar por hora	0,4
Método do ar externo	Por área e por pessoa

Além das características do tipo de espaço, é importante definir o tipo de condição das áreas. O tipo de condição determina quais cargas térmicas serão calculadas. Quando definido como aquecido, somente cargas de aquecimento são calculadas. Quando definido como arrefecido, somente cargas de refrigeração são calculadas. Quando o espaço é definido como não condicionado, nenhuma carga é calculada para ele. A Tabela 16 lista os espaços criados no *Revit*. Os espaços foram agrupados de acordo com a zona a que pertencem.

Tabela 16 – Listagem dos espaços criados

Quantidade	Área total	Tipo de Espaço	Tipo de Condição	Zona
10	2968 m²	Escritório Aberto	Não-condicionado	Central
10	724 m²	Escritório Aberto	Refrigerado	Leste
10	1699 m²	Escritório Aberto	Refrigerado	Norte
10	724 m²	Escritório Aberto	Refrigerado	Oeste
10	1699 m²	Escritório Aberto	Refrigerado	Sul

Após a definição dos espaços, devem ser criadas zonas AVAC de acordo com os requisitos pretendidos. As zonas definem espaços que são servidos pelo mesmo equipamento e são controlados pelo mesmo sistema de controle ambiental, como aquecimento, arrefecimento e sistemas de controle de humidade. Dessa forma, espaços condicionados e não condicionados não devem estar dentro de uma mesma zona. Deve-se criar uma zona exclusiva para os ambientes não condicionados.

O *Revit* atribui os espaços criados à Zona Padrão. Espaços que permanecem na Zona Padrão não são incluídos em cálculos de cargas de aquecimento e arrefecimento. Isto permite determinar de forma independente as cargas de aquecimento e arrefecimento dos espaços em cada zona para produzir uma análise mais precisa das respetivas cargas. A Tabela 17 mostra as zonas térmicas criadas, temperatura definida para o arrefecimento, área e volume totais e tipo de serviço.

Tabela 17 – Características das zonas térmicas

Nome	Temperatura de arrefecimento	Área total	Volume total	Tipo de serviço
Norte	23°C	2968 m²	5800,53 m³	Sistema *Split* com ventilação mecânica
Leste	23°C	724 m²	2470,89 m³	Sistema *Split* com ventilação mecânica
Oeste	23°C	1699 m²	2470,89 m³	Sistema *Split* com ventilação mecânica
Sul	23°C	724 m²	5800,53 m³	Sistema *Split* com ventilação mecânica
Centro	-	1699 m²	10135,94 m³	Nenhum

O modelo de energia é criado de maneira semelhante ao método de massas conceituais. Porém, ao invés de considerar os dados gerais de configurações de energia, o Revit assume as informações inseridas nos elementos construtivos e espaços criados. A Figura 10 mostra o modelo de energia criado a partir dos elementos construtivos.

A criação do modelo de energia utilizando elementos construtivos apresenta maiores possibilidades de configuração em relação ao método de massas conceituais. Este método é adequado para a fase de desenvolvimento do projeto, à medida que mais informações podem ser adicionadas ao projeto e auxiliar na tomada de decisões. As configurações das propriedades térmicas dos materiais construtivos, espaços,

sistemas AVAC podem ser definidas de forma bastante detalhada, assim como detalhes da envoltória, dispositivos de sombreamento, tamanho e posição de cada janela.

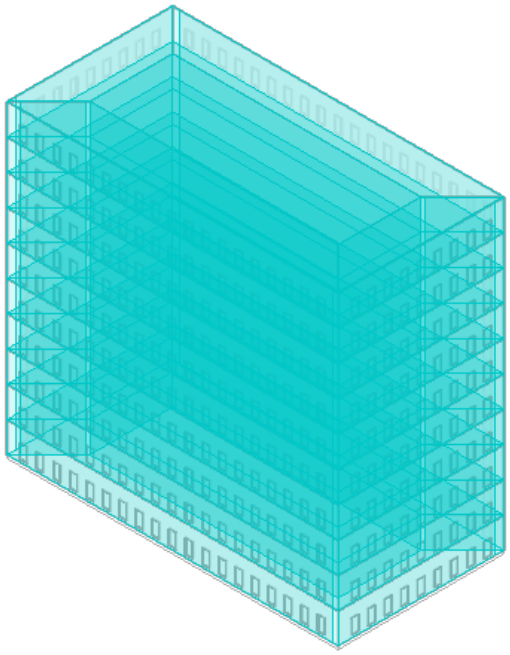


Figura 10 - Modelo de energia criado por elementos construtivos

4.3.1 Resultados *Insight*

A Figura 11 mostra os valores máximos e mínimos de consumo de energia total do edifício obtidos pelas simulações paramétricas do *Insight* para as cidades de Curitiba, Brasília e Vitória, utilizando o modelo de elementos construtivos criado no *Revit*.

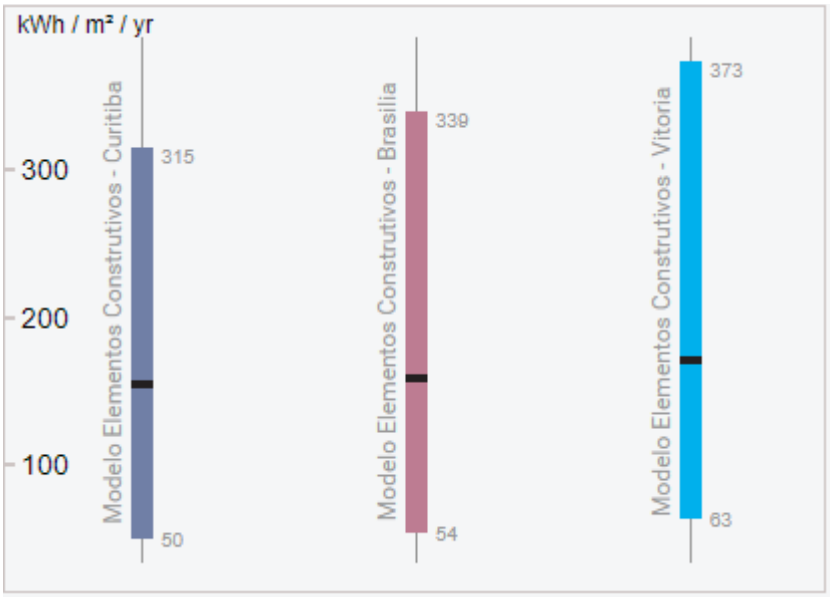


Figura 11 - Faixas de consumo de energia para o modelo de elementos construtivos

A Figura 12 mostra os resultados de consumo de energia para as diferentes localizações de acordo com os parametros modelados no *Revit*. Novamente, os resultados são maiores de acordo com os climas mais quentes.

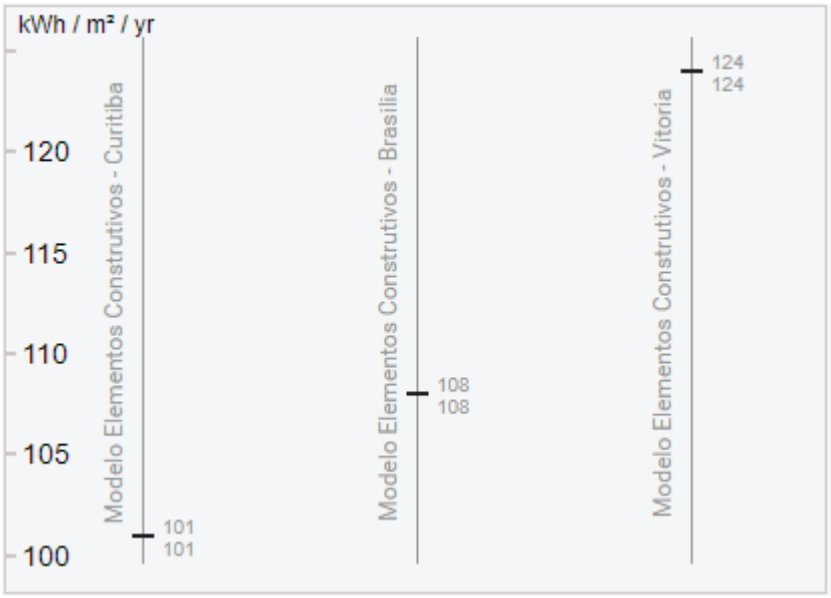


Figura 12 - Resultados de consumo de energia de acordo com as configurações modeladas

Em seguida, foi avaliada a influência do PAF no consumo de energia total do edifício. A Tabela 18 mostra a variação do consumo de energia para duas opções de PAF, 22% e 80%, considerando a localização da cidade de Brasília.

Tabela 18 – Variação do consumo de energia de acordo com o PAF

Localização: Brasília			
PAF	22%	80%	Diferença
Consumo de energia total	108 kWh/m²	117 kWh/m²	9 kWh/m² (+8,33%)

Os resultados mostram novamente a influência do aumento do PAF no consumo de energia da edificação. A diferença entre os resultados foi maior do que no método de massas conceituais (+1,36%).

Foi avaliada também a influência da carga de iluminação no consumo de energia total do edifício, como mostra a Tabela 19.

Tabela 19 – Variação do consumo de energia de acordo com a carga de iluminação

Localização: Brasília			
Carga de iluminação	9,7 W/m²	20,45 W/m²	Variação
Consumo de energia total	108 kWh/m²	175 kWh/m²	67 kWh/m² (+62,04%)

4.3.2 Resultados da Análise de Sistemas

O mesmo modelo criado utilizando elementos construtivos foi simulado utilizando a função Análise de Sistemas do *Revit*. A Tabela 20 mostra a influência da localização no consumo de energia do edifício.

Tabela 20 – Variação do consumo de energia de acordo com a localização do edifício

Cidade	Consumo de energia total
Brasília	95,08 kWh/m²
Curitiba	91,64 kWh/m²
Vitória	109,57 kWh/m²

A Tabela 21 mostra a variação do consumo de energia total do edifício para as duas opções de PAF, 22% e 80%, considerando a localização da cidade de Brasília.

Tabela 21 – Variação do consumo de energia de acordo com o PAF

Localização: Brasília			
PAF	22%	80%	Diferença
Consumo de energia total	95,08 kWh/m²	103,46 kWh/m²	+ 8,37 kWh/m² (+8,81%)

A Tabela 22 mostra a variação do consumo de energia total do edifício de acordo com a carga de iluminação, considerando a cidade de Brasília.

Tabela 22 – Variação do consumo de energia com a carga de iluminação

Localização: Brasília			
Carga de iluminação	9,7 W/m²	20,45 W/m²	Diferença
Consumo de energia total	95,08 kWh/m²	132,62 kWh/m²	+ 37,54 kWh/m² (+39,49%)

A Análise de Sistemas gera um relatório detalhado de energia, com informações sobre os usos finais e consumo mensal de energia no edifício. A Figura 13 mostra a proporção de energia utilizada para cada uso final no edifício.

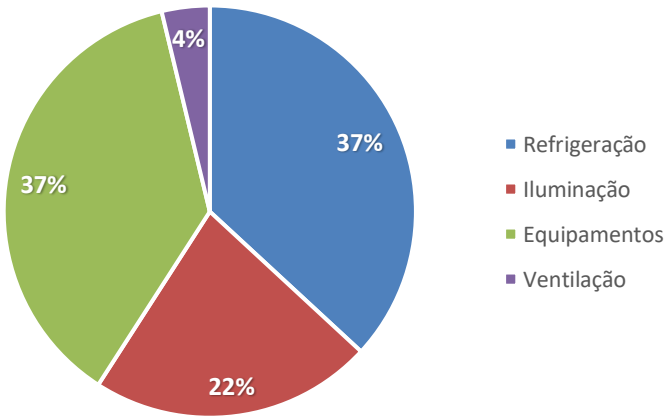


Figura 13 - Consumo de energia anual por uso final

A Figura 14 mostra o consumo de energia mensal do edifício para cada uso final.

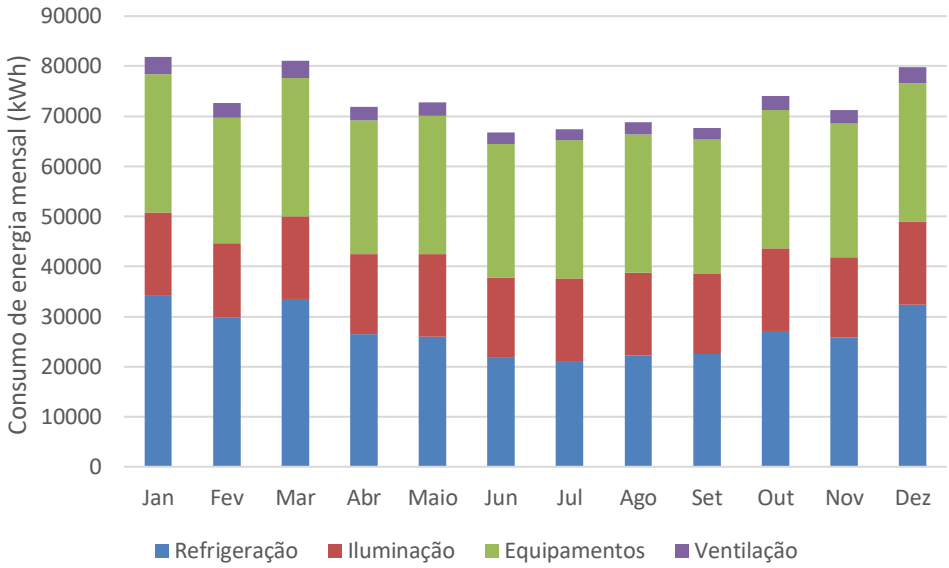


Figura 14 - Consumo de energia mensal

A ferramenta Análise de Sistemas possui a vantagem de realizar as simulações dentro do próprio ambiente do *Revit,* evitando problemas de interoperabilidade. Além disso, a ferramenta fornece resultados muito mais detalhados. Porém, como desvantagem, não são gerados os vários cenários do Insight, sendo que cada simulação precisaria ser feita individualmente. O tempo gasto para realizar todas estas simulações seria muito maior, além de consumirem capacidade de processamento do computador, o que não ocorre no *Insight*, pois as simulações são realizadas em "nuvem". A geração de relatórios detalhados também não seria adequada para comparar uma grande quantidade de resultados, como ocorre no Insight.

Como conclusão, este método é adequado para análises de energia em uma fase mais adiantada do projeto, quando se deseja comparar algumas poucas opções de projeto e para o dimensionamento dos sistemas AVAC.

O *Revit* apresenta diversas possibilidades de criação de análises de energia, que podem ser utilizadas de acordo com o nível de desenvolvimento do projeto e dos objetivos pretendidos. A análise utilizando a ferramenta *Insight* se mostrou mais adequada para análises comparativas entre diversos cenários de projeto, porém possui pouca precisão e detalhe nos resultados. Estas análises seriam ideais para as fases iniciais do projeto. Em contrapartida, a ferramenta Análise de Sistemas gera resultados mais detalhados e confiáveis, ideal para fases mais adiantadas do desenvolvimento.

4.4 Criação da geometria com *SketchUp* e *OpenStudio*

O modelo de energia do edifício foi criado utilizando o programa *SketchUp* e a sua configuração foi realizada através da utilização do *OpenStudio*, como mostrado na Figura 15.

As propriedades térmicas dos materiais, cargas internas, propriedades de espaços e zonas térmicas foram configuradas de acordo com o capítulo de Metodologia. O sistema AVAC foi definido como *Variable Refrigerant Flow* (VRF). A Figura 16 mostra o modelo com a divisão das zonas térmicas.

O *OpenStudio* é um programa de simulação energética bastante complexo. Permite inserir os parâmetros necessários para a análise de maneira detalhada, principalmente no que diz respeito ao sistema AVAC. A sua utilização torna-se mais adequada para as etapas finais de análise do projeto, como a certificação energética do empreendimento e monitoramento das condições de operação. O *OpenStudio* é capaz de gerar resultados bastante detalhados, para isso, exige um maior conhecimento técnico do usuário.

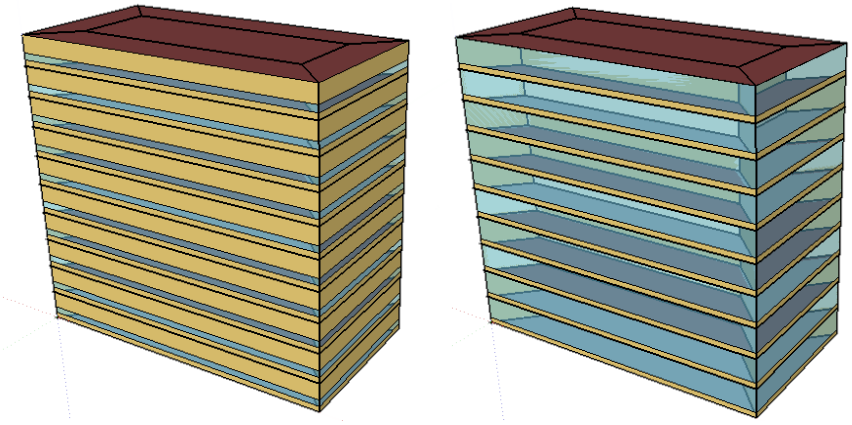


Figura 15 - Modelos de energia criados utilizando SketchUp (PAF22% e PAF80%)

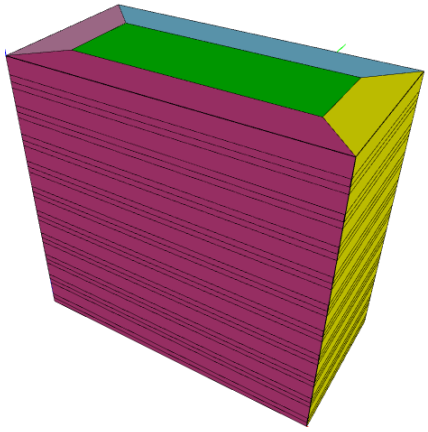


Figura 16 – Zonas térmicas do modelo criado no SketchUp

4.4.1 Resultados *OpenStudio*

A Tabela 23 mostra os resultados do consumo de energia total no edifício de acordo com a localização do projeto.

Tabela 23 - Variação do consumo de energia com a localização do edifício

Cidade	Consumo total de energia
Brasília	153,64 kWh/m²
Curitiba	133,72 kWh/m²
Vitória	163,96 kWh/m²

A Tabela 24 mostra os resultados do consumo de energia para as duas opções de PAF, 22% e 80%.

Tabela 24 - Variação do consumo de energia com o PAF

Localização: Brasília			
PAF	22%	80%	Diferença
Consumo de energia total	153,64 kWh/m²	155,96 kWh/m²	+ 2,32 kWh/m² (+ 1,51%)

A Tabela 25 mostra os resultados do consumo de energia total do edifício de acordo com a carga de iluminação.

Tabela 25 - Variação do consumo de energia com a carga de iluminação

Localização: Brasília			
Carga de iluminação	9,7 W/m²	20,45 W/m²	Diferença
Consumo de energia total	153,64 kWh/m²	197,93 kWh/m²	+ 44,29 kWh/m² (+28,83%)

A Figura 17 mostra o uso final de energia na edificação.

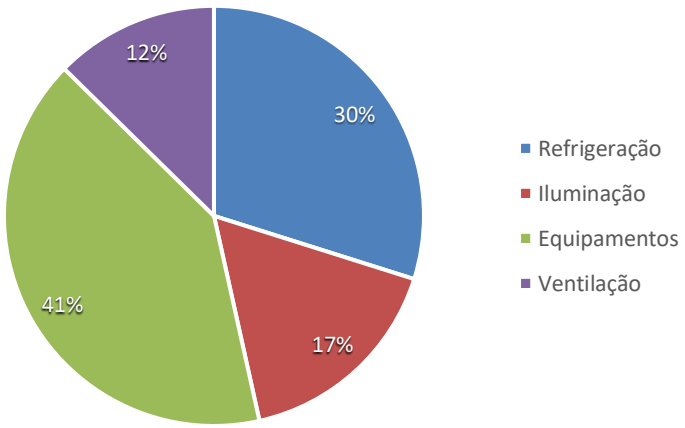


Figura 17 - Consumo de energia anual por uso final

A Figura 16 mostra o consumo de energia mensal do edifício para cada uso final.

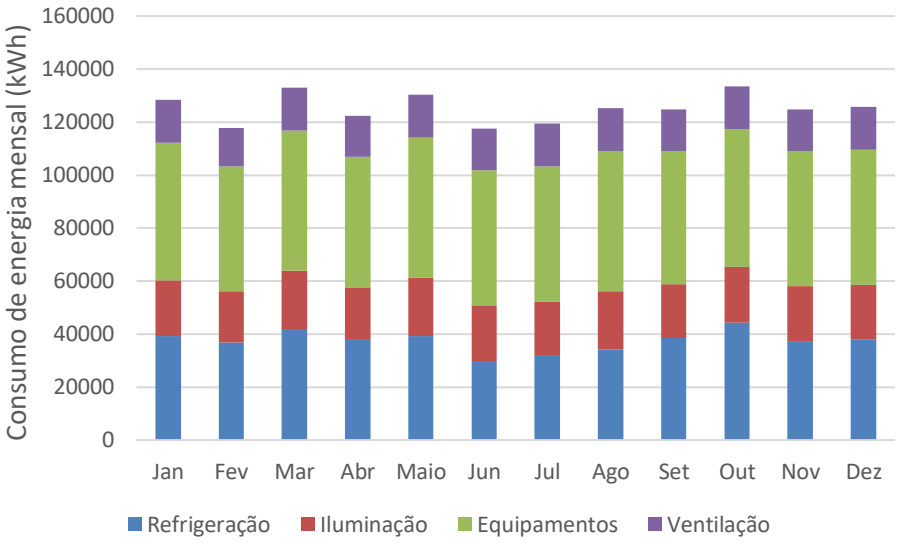


Figura 18 - Consumo de energia mensal

Os resultados das simulações confirmam a tendência observada nos modelos criados utilizando o Revit. A principal diferença entre os modelos criados no Revit e no OpenStudio é em relação ao sistema AVAC, devido às possibilidades de configuração desse sistema em cada programa. O OpenStudio possui recursos para a configuração do sistema AVAC muito mais avançados do que os do Revit, que é uma ferramenta mais simplificada para análise deste sistema.

A possibilidade de se criar um sistema detalhado para simulação é de grande importância para os especialistas de projeto e dimensionamento deste sistema. Porém, nas fases iniciais do projeto, quando o sistema ainda não está definido, é possível utilizar um sistema genérico.

A utilização de ferramentas mais avançadas de análise de energia requer profissionais especializados, que normalmente participam do projeto já em fase mais adiantada do processo. As ferramentas simplificadas permitem que as análises preliminares sejam feitas pelos projetistas, auxiliando na tomada de decisões desde as fases iniciais.

Estas ferramentas simplificadas não substituem a utilização das ferramentas detalhadas, mas permitem que decisões visando uma melhor eficiência no uso de energia sejam tomadas desde o início do projeto.

4.5 Análise comparativa dos resultados entre programas

Nesta seção são comparados os resultados da simulação realizada com os programas para cada cenário.

4.5.1 Consumo de energia de acordo com a localização

A Tabela 26 mostra os resultados dos diferentes softwares para o consumo de energia total do edifício para cada localização.

Tabela 26 - Comparativo do consumo total de energia para cada programa de simulação

	Localização		
Programa	Curitiba	Brasília	Vitória
Insight – Massas conceituais	141,0 kWh/m²	147,0 kWh/m²	166,0 kWh/m²
Insight – Elementos construtivos	101,0 kWh/m²	108,0 kWh/m²	124,0 kWh/m²
Análise de Sistemas	91,6 kWh/m²	95,1 kWh/m²	109,6 kWh/m²
OpenStudio	133,7 kWh/m²	153,6 kWh/m²	164,0 kWh/m²

Apesar dos resultados de consumo energético apresentarem valores diferentes para cada programa (Tabela 27), ao analisar a variação percentual do consumo entre as cidades, os métodos apresentaram resultados mais próximos.

Tabela 27 - Variação do consumo energético total entre cidades

Programa	Curitiba - Brasília	Curitiba - Vitória	Brasília - Vitória
Insight – Massas conceituais	4,3%	17,7%	12,9%
Insight – Elementos construtivos	6,9%	22,8%	14,8%
Análise de Sistemas	3,8%	19,6%	15,2%
OpenStudio	14,9%	22,6%	6,7%
Média	**7,5%**	**20,7%**	**12,4%**

A Figura 19 mostra o gráfico de comparação dos resultados para cada programa. As simulações utilizando a ferramenta Análise de Sistemas apresentaram os menores resultados. As simulações utilizando o modelo de elementos construtivos apresentaram resultados em média 12% maiores na análise do *Insight* do que usando Análise de Sistemas, apesar de utilizarem exatamente o mesmo modelo. Isso mostra que existem diferenças entre as considerações feitas por cada ferramenta. O modelo de massas conceituais e o modelo do *OpenStudio* apresentaram os maiores valores, que foram bastante aproximados, com diferenças em torno de 5%, apesar das diferenças entre os dados inseridos.

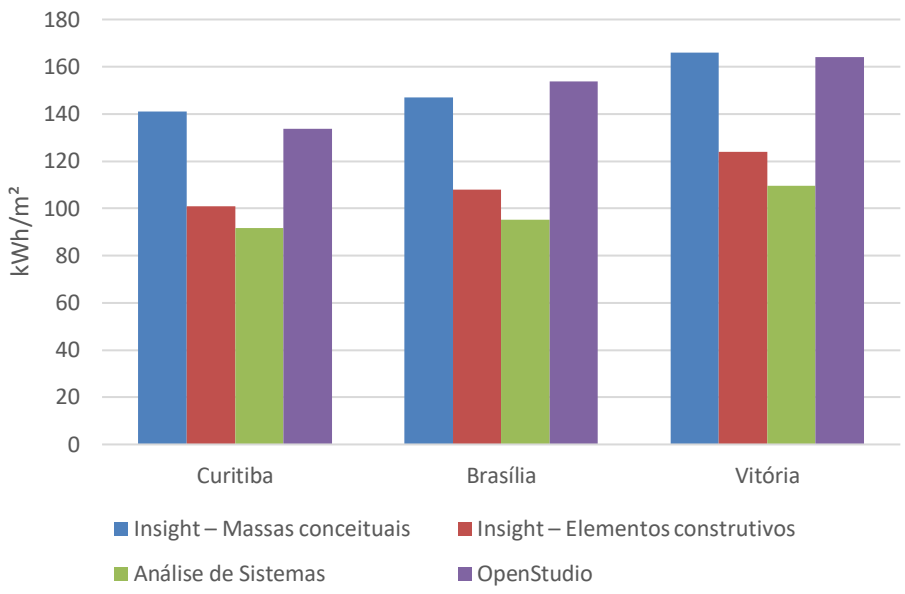


Figura 19 – Comparativo do consumo de energia na edificação para cada localização e programa

A Figura 20 mostra que, apesar da diferença entre os valores, os resultados são consistentes e permitem identificar a situação mais favorável.

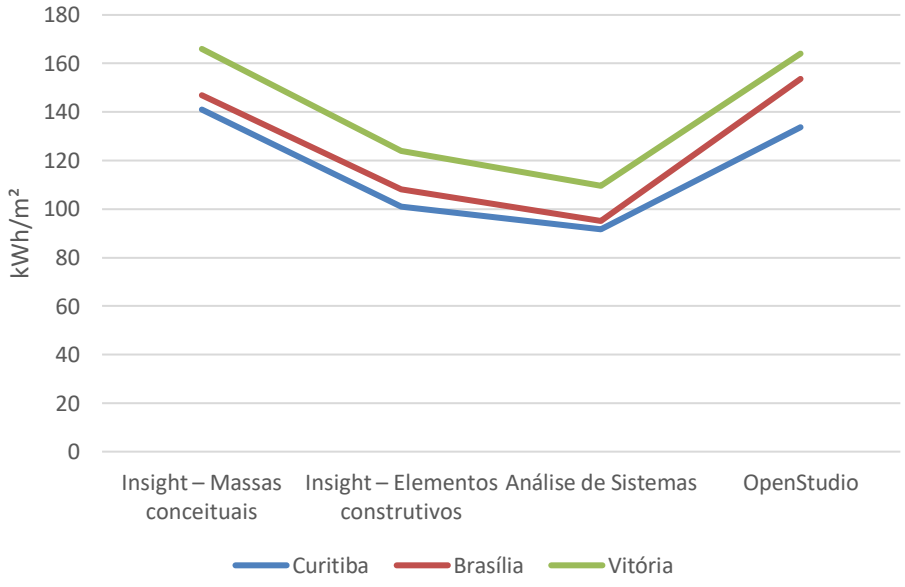


Figura 20 –Variação do consumo de energia total de acordo com a localização

4.5.2 Consumo de energia de acordo com o PAF

A Tabela 28 apresenta os resultados de consumo de energia total no edifício com a variação do PAF para cada metodologia utilizada.

Tabela 28 - Comparativo do consumo total de energia de acordo com o PAF

Localização: Brasília	PAF	
Programa	22%	80%
Insight – Massas conceituais	147,0 kWh/m²	149,0 kWh/m²
Insight – Elementos construtivos	108,0 kWh/m²	117,0 kWh/m²
Análise de Sistemas	95,1 kWh/m²	103,5 kWh/m²
OpenStudio	153,6 kWh/m²	156,0 kWh/m²

A Figura 21 mostra que o comportamento dos resultados foi similar ao caso anterior. O modelo de massas conceituais e do *OpenStudio* apresentaram os maiores valores, que foram próximos, apresentando diferença de menos de 5%. O modelo de elementos construtivos teve diferença de cerca de 13% entre os resultados do *Insight* e Análise de sistemas. A maior diferença entre o maior e menor resultado (massas conceituais e análise de sistemas) chegou a 55%.

Apesar da diferença, a tendência dos resultados se mostrou coerente. Em todos casos o PAF de 80% resultou em maior consumo de energia pelo edifício. A influência do PAF foi pequena, devido ao tipo de vidro selecionado.

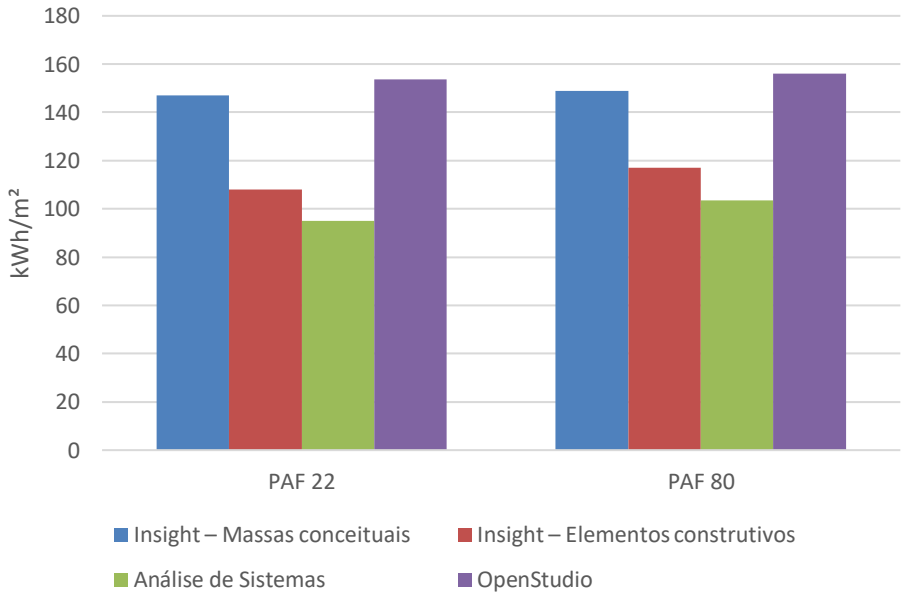


Figura 21 - Comparativo do consumo de energia na edificação para cada PAF e programa

A Figura 22 mostra que houve uma pequena variação positiva no consumo de energia total no edifício com o aumento do PAF.

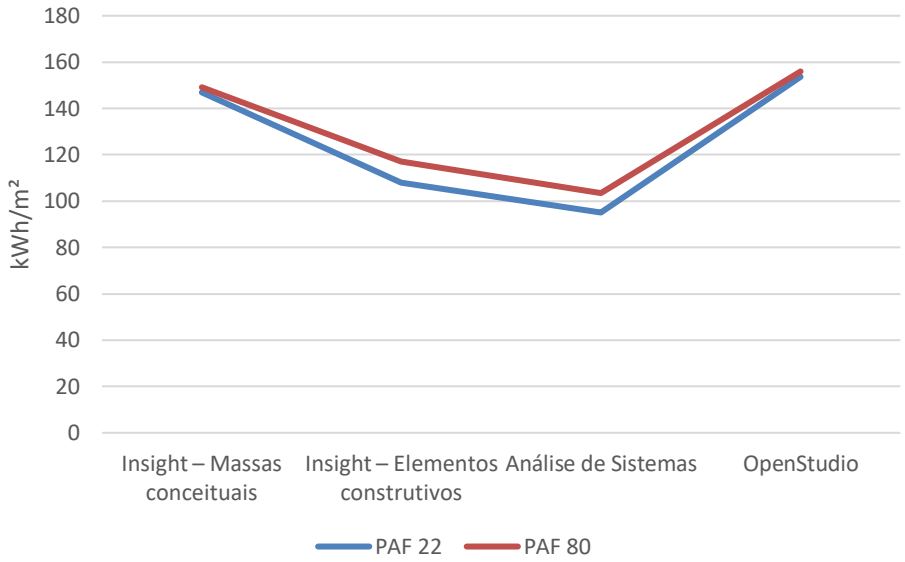


Figura 22 - Variação do consumo de energia total de acordo com o PAF

4.5.3 Consumo de energia de acordo com a carga de iluminação

A Tabela 29 mostra os resultados do consumo de energia total do edifício para cada uma das cargas de iluminação nos diferentes programas de simulação.

Tabela 29 - Comparativo do consumo total de energia de acordo com a carga de iluminação

Localização: Brasília	Carga de Iluminação	
	9,70 W/m²	20,45 W/m²
Insight – Massas conceituais	147,0 kWh/m²	187,0 kWh/m²
Insight – Elementos construtivos	108,0 kWh/m²	175,0 kWh/m²
Análise de Sistemas	95,1 kWh/m²	132,6 kWh/m²
OpenStudio	153,6 kWh/m²	197,9 kWh/m²

As Figura 23 e 24 mostram o comparativo dos resultados de consumo energético total do edifício de acordo com a carga de iluminação.

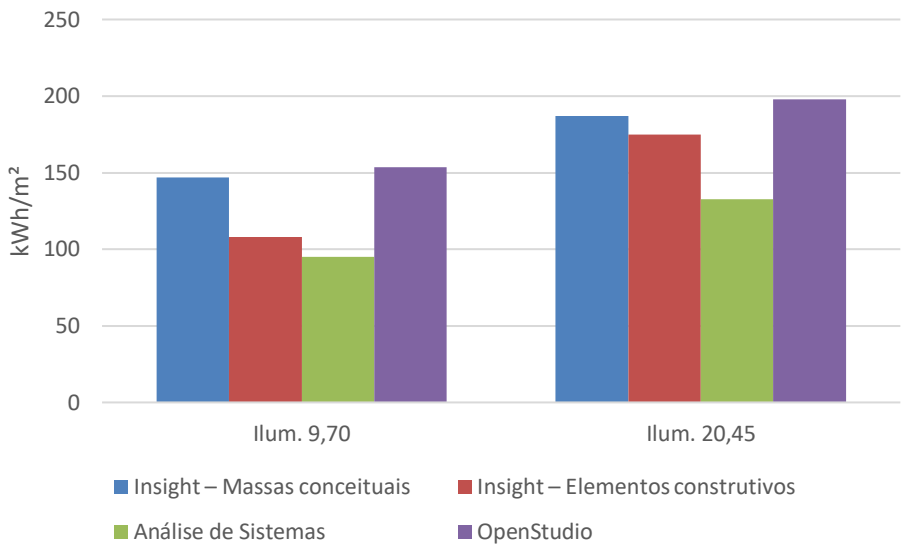


Figura 23 – Comparativo do consumo de energia na edificação com a carga de iluminação e programa

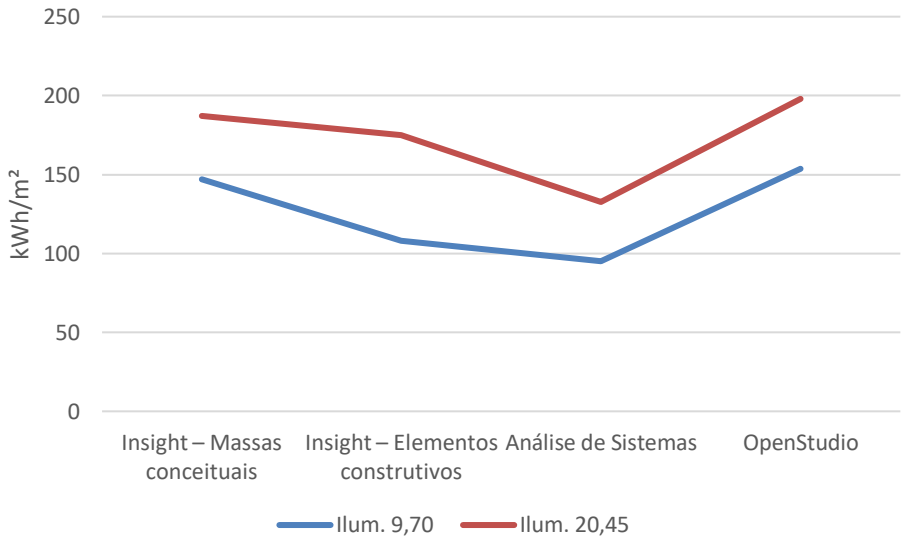


Figura 24 – Variação do consumo de energia total de acordo com a carga de iluminação

As diferenças nos resultados dos diferentes programas de simulação devem-se às diferentes suposições feitas por cada programa, devido às limitações das possibilidades de configuração de cada um deles. Entretanto, os programas apresentaram coerência na tendência dos resultados e influência da alteração de cada parâmetro.

De forma geral, o *Insight* utilizando massas conceituais e o *OpenStudio* apresentaram resultados mais elevados. As simulações do *Insight* utilizando elementos construtivos e Análise de Sistemas foram

realizadas utilizando exatamente o mesmo modelo. Ainda assim houve uma ligeira diferença entre os resultados, sendo maiores na análise do *Insight*.

Cada um dos programas foi desenvolvido com diferentes objetivos na análise energética de edifícios. Os programas adotam diferentes suposições para o cálculo do consumo energético e possuem diferentes opções de configurações de energia, o que faz com que os resultados não sejam iguais em todos os programas para cada cenário simulado.

Entretanto, durante o desenvolvimento do projeto, o objetivo principal das simulações é comparar a eficiência das soluções construtivas. O consumo real o edifício pode ser bastante diferente do consumo estimado em projeto, pois depende fortemente das condições de uso e manutenção da edificação e do comportamento do usuário.

4.6 Exportação do modelo de energia para outras ferramentas BEM

Nesta parte do estudo, foi verificada a interoperabilidade dos modelos de energia criados no *Revit* com os programas *OpenStudio* e *EnergyPlus*. Os modelos foram exportados em formato gbXML diretamente pelo menu do *Revit*, que possui dois métodos para a criação de arquivos gbXML: com base nas Configurações de Energia ou baseado em Volumes de Espaços.

Outra forma de exportar os modelos de energia é através da interface do *Insight*, onde podem ser descarregados arquivos nos formatos gbXML, formato para DOE-2 e formato IDF para o *EnergyPlus*. Neste estudo, foi verificada a utilização do arquivo IDF gerado pelo *Insight* para o *EnergyPlus*.

4.6.1 Modelo de massas conceituais pelo método de configurações de energia

O modelo criado a partir de massas conceituais só pode ser exportado em formato gbXML pelo método de configurações de energia, que utiliza a geometria do modelo de energia criado pelo Revit. O método de volumes de espaços se baseia nos espaços que são definidos pelos elementos construtivos, por isso não é possível utilizar esta opção para modelos de massas conceituais.

Os espaços e zonas térmicas do modelo foram identificados, porém na geometria foram criadas somente as paredes externas do modelo (Figura 25), não existindo superfície vertical divisória entre as zonas térmicas, o que inviabiliza o uso do modelo. O *OpenStudio* importou apenas informações sobre os materiais das superfícies, entretanto não identificou nenhuma informação sobre cargas internas (pessoas, iluminação e equipamentos), cronogramas de operação (*schedules*), tipos de espaço ou sistema AVAC.

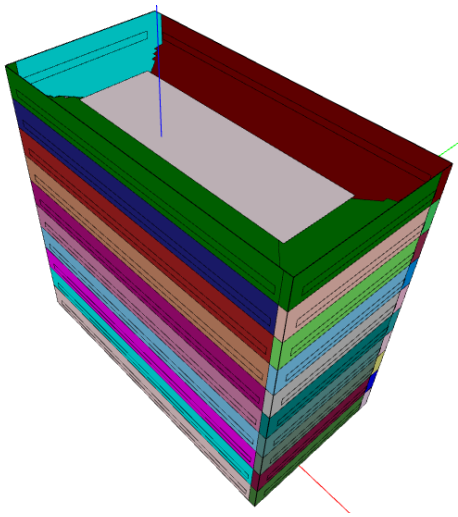


Figura 25 - Geometria importada do modelo de massas conceituais

4.6.2 Modelo de elementos construtivos pelo método configurações de energia

O modelo de elementos construtivos foi exportado para gbXML primeiramente utilizando o método de configurações de energia. O arquivo criado foi importado no *OpenStudio*. O programa identificou erros ao realizar a leitura do arquivo, como mostra a Figura 26.

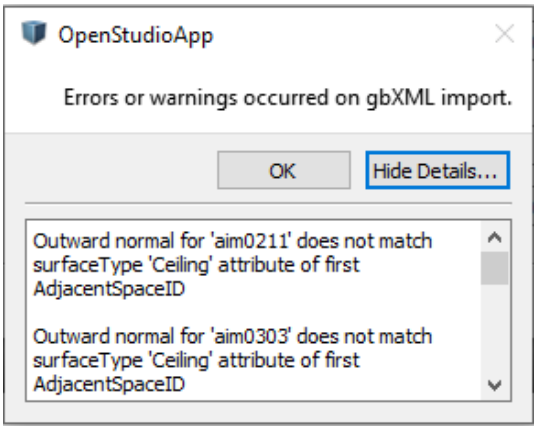


Figura 26 - Janela de erro ao abrir o arquivo gbXML no *OpenStudio*

O erro deve-se ao fato da superfície correspondente ao teto do espaço '*Ceiling*' ter sido identificado como do tipo '*floor*', como mostra a Figura 27.



Figura 27 – Identificação do erro na importação do arquivo gbXML para o OpenStudio

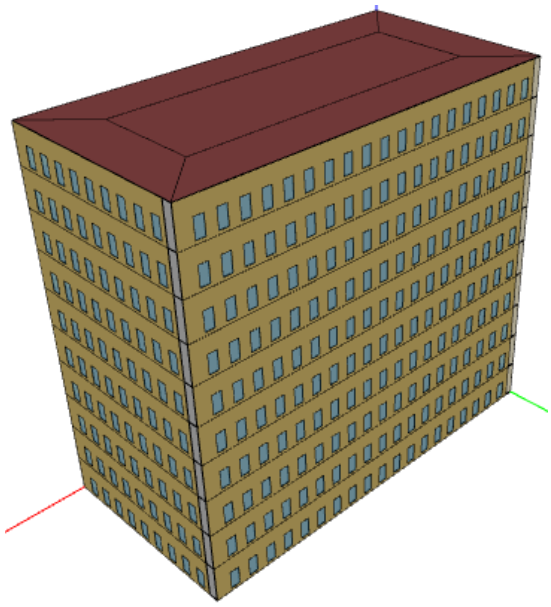


Figura 28 - Geometria importada no *OpenStudio*

O *OpenStudio* não importou nenhuma informação sobre a localização do projeto. Para realizar a simulação foi necessário inserir um Arquivo Climático que contém a localização. Também não foi importada nenhuma informação sobre os perfis de utilização, cargas internas, sistema AVAC ou tipos de espaço do edifício. As informações sobre os materiais construtivos foram importadas, porém alguns materiais foram duplicados. O material do piso do primeiro andar foi duplicado, apesar de ser o mesmo dos outros andares.

A geometria do modelo exportado para o *OpenStudio* pelo método de Configurações de Energia apresenta diversas desconformidades nas superfícies criadas, podendo causar falha na simulação energética. A Figura 29 mostra que há falhas na criação da geometria das paredes, pois estas não criam um ambiente totalmente fechado.

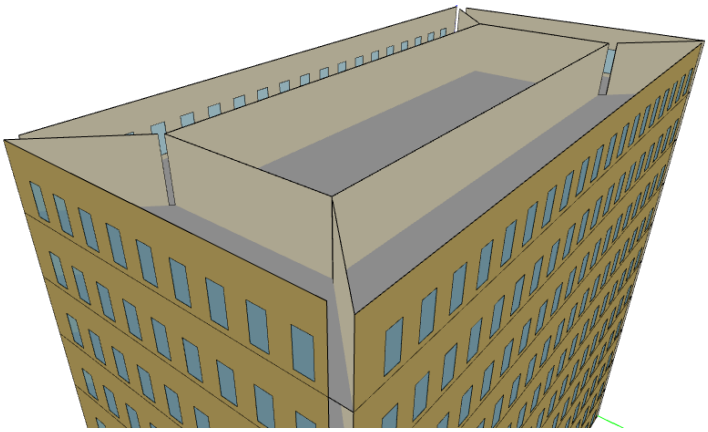


Figura 29 - Falhas na geometria importada

Os Espaços foram identificados corretamente, porém com o nome criado com o modelo de energia, e não pelo modelo de Arquitetura/MEP. A única propriedade dos espaços identificada foi a zona térmica. Todos os espaços possuem 6 superfícies, que foram nomeadas automaticamente. Foi criada uma zona térmica para cada espaço condicionado e uma única zona térmica para todos os espaços não condicionados (Figura 30).

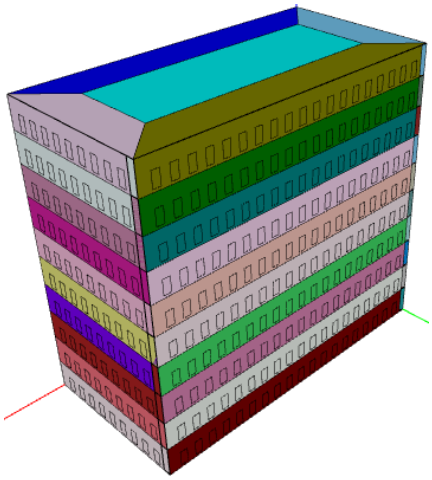


Figura 30 - Zonas térmicas

4.6.3 Modelo de elementos construtivos pelo método de volumes de espaços

O *OpenStudio* novamente erros na leitura do arquivo. Desta vez algumas as superfícies que representam o piso do primeiro pavimento não puderam ser transferidas. Assim como no método anterior, nenhuma informação sobre as tabelas de operação, cargas internas e tipos de espaço foi importada. O material das paredes internas e piso foram identificados, e novamente alguns foram duplicados. Utilizando este método, a geometria das paredes foi criada corretamente, porém, ocorreu um erro na identificação do piso do primeiro pavimento e esta superfície não foi criada, como mostra a Figura 31.

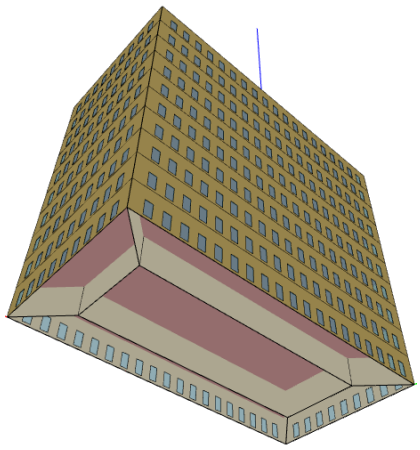


Figura 31 - Problema na importação do piso do primeiro pavimento

Os espaços foram identificados corretamente com o nome criado no *Revit* no modelo de Arquitetura/MEP. Apenas os espaços do primeiro pavimento não tiveram todas as superfícies identificadas. As Zonas Térmicas foram importadas da forma correta como foram criadas no *Revit*, com uma zona para cada orientação e uma para a zona não condicionada, como mostra a Figura 32. Porém, nenhuma informação sobre o sistema AVAC foi identificada.

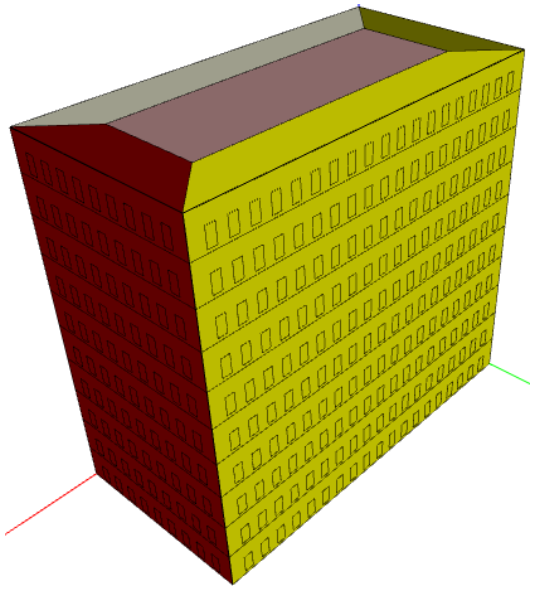


Figura 32 - Zonas térmicas do modelo de elementos construtivos

4.6.4 Arquivos IDF

O *Insight* disponibiliza o modelo de energia para *download* em diversos formatos para serem utilizados em outros programas, como o formato IDF para o EnergyPlus. Porém, ao baixar os arquivos e importar para o *EnergyPlus* e *OpenStudio* o arquivo não pode ser lido devido a incompatibilidade de versões. O arquivo IDF gerado pelo *Insight* é da Versão 8.5, porém as versões do *EnergyPlus* 8.6 e anteriores não estão mais disponíveis.

A segunda opção seria converter o arquivo para uma versão mais recente, utilizando o conversor de versões do EnergyPlus, porém o programa não realizou a conversão com sucesso. Desta forma, não foi possível realizar a interoperabilidade do modelo de energia criado no Revit para o programa EnergyPlus.

4.6.5 Resumo dos problemas de interoperabilidade identificados

Nesta seção foram destacados os problemas de interoperabilidade identificados entre os programas *Revit* e *OpenStudio*. Os problemas encontram-se indicados na Tabela 30.

O *OpenStudio* não foi capaz de importar nenhuma informação a respeito da localização do projeto, tipos de espaço, cargas térmicas (pessoas, iluminação e equipamentos), tabelas de operação (*schedules*) e sistemas AVAC, ainda que estas informações estejam presentes no arquivo gbXML. As informações importadas corretamente foram as propriedades térmicas dos materiais, espaços e zonas térmicas.

Quanto à geometria, cada um dos métodos apresentou diferentes problemas na identificação de algumas superfícies. Os problemas de geometria dos modelos criados pelo método de configurações de energia, são originados no próprio *Revit*, pela forma como são criadas as superfícies. O método utilizando volume de espaços foi o que apresentou a geometria mais próxima do ideal. Ainda assim, não foi possível realizar nenhuma simulação bem-sucedida no *OpenStudio* com estes arquivos.

Tabela 30 - Problemas de interoperabilidade identificados

	Modelo de massas conceituais	Modelo de elementos construtivos	
	Configurações de energia	Configurações de energia	Volumes de espaço
Localização	Sem informação	Sem informação	Sem informação
Geometria	Superfícies de divisão interna das zonas térmicas inexistente	A geometria das paredes não forma espaços fechados.	Falta o piso do primeiro pavimento
Materiais	✓	Criados, porém alguns foram duplicados	Criados, porém alguns foram duplicados
Tipos de espaço	Sem informação	Sem informação	Sem informação
Espaços	✓	✓	✓
Zonas térmicas	✓	✓	✓
Cargas térmicas	Sem informação	Sem informação	Sem informação
Tabelas de operação	Sem informação	Sem informação	Sem informação
Zonas AVAC	Sem informação	Sem informação	Sem informação

Estes resultados demonstram que a interoperabilidade entre programas BIM e BEM ainda não é completa. Existe um grande desafio de tornar estas ferramentas compatíveis para que todas as informações possam ser compartilhadas entre os programas.

5. CONCLUSÕES

5.1 Conclusões gerais

Para alcançar uma maior eficiência energética no setor da construção, é necessário integrar a análise de energia desde a fase inicial do processo de projeto dos edifícios. Para a criação de um modelo de energia são necessárias informações das diversas disciplinas, como arquitetura, estruturas, sistemas elétricos, mecânicos, hidráulico e de ar condicionado, além dos cronogramas de utilização das instalações, arquivo climático da localização do projeto.

Na metodologia de projeto tradicional, estas informações muitas vezes se encontram dispersas e são inconsistentes. A modelação e simulação de energia nestas condições consomem tempo e recursos do projeto, sendo normalmente deixada para a fase de certificação do empreendimento, quando todo o *layout* e soluções construtivas já estão definidos. Desta forma, não é possível tirar proveito da análise energética para a melhoria do desempenho do edifício.

A metodologia BIM (*Building Informatin Modeling*) oferece diversas vantagens para a análise energética de edifícios, já que as informações se encontram centralizadas e é utilizado o processo de projeto integrado, no qual os projetistas trabalham em conjunto durante todas as fases do desenvolvimento. A análise energética deve ser um processo iterativo e que auxilie na tomada de decisões de projeto.

O trabalho teve como objetivo explorar as potencialidades da plataforma BIM *Autodesk Revit* para a análise energética de edificações em diferentes estágios de desenvolvimento de um projeto.

A plataforma BIM *Autodesk Revit* é uma das mais utilizadas atualmente e possui no seu sistema capacidades para a criação de modelos para análise de energia a partir do BIM. Foi verificado que o programa permite criar modelos para diferentes níveis de desenvolvimento do projeto. O programa também facilita a criação de modelos pois assume valores padrão para parâmetros que ainda não estejam definidos, possui uma biblioteca que abrange tanto soluções conceituais como detalhadas.

Foi utilizado como estudo de caso um edifício de escritórios hipotético, que representa as características médias desse tipo de construção no Brasil. Foram avaliados alguns cenários para a edificação, considerando como localização do edifício as cidades de Brasília, Curitiba e Vitória, por estarem localizadas em diferentes zonas climáticas, o que permitiu avaliar a influência do ambiente no comportamento do edifício. Também foi avaliado o impacto da alteração do PAF (Percentual de Abertura da Fachada) e da carga interna de iluminação no consumo energético do edifício.

Neste trabalho foi realizada uma simplificação do projeto do edifício, não sendo considerada a influência dos projetos detalhados de estruturas, AVAC, hidráulico, elétrico e de iluminação. A consideração destas características poderá influenciar consideravelmente o comportamento térmico e o consumo energético da estrutura. Porém, o objetivo principal do trabalho foi a avaliação da utilização das ferramentas, e não a análise da influência destas variáveis.

O primeiro modelo do estudo foi desenvolvido a partir a função de massas conceituais, que permitiu modelar a volumetria do edifício de forma simplificada. O Revit permitiu atribuir configurações de energia genéricas ao modelo, que são limitadas para uma análise detalhada, mas se mostraram suficientes para uma análise preliminar do projeto. A utilização de modelos de massas é adequada para a fase conceitual do projeto, quando se deseja ter uma estimativa genérica do consumo de energia da edificação.

O segundo modelo foi criado utilizando as funções de elementos construtivos. Este método permitiu a inserção de espaços analíticos e configuração individual das características de uso de cada um deles. Também foi possível configurar as características da envolvente de maneira mais personalizada, como propriedades de paredes e posicionamento de aberturas. Desta forma, o programa permite criar modelos de energia com diferentes níveis de desenvolvimento, dependendo dos objetivos e informações de projeto disponíveis. Com este método de criação de modelos foi possível criar arquivos gbXML de duas formas: utilizando Configurações de Energia e Volumes de Espaços.

Os dois modelos foram então simulados utilizando a ferramenta *Insight*, que permite avaliar a influência de diversos parâmetros no modelo, como orientação, tamanho, sombreamento e tipo de vidro das aberturas, material construtivo das paredes externas e cobertura, cargas internas de ocupação, iluminação e equipamentos, taxa de infiltração, tabelas de operação e sistemas AVAC.

O Insight se mostrou uma ferramenta ideal para a fase inicial de projeto, pois permite ao projetista perceber quais são as variáveis mais importantes no consumo de energia do edifício e permite comparar diversos cenários. Porém, os resultados apresentados pelo programa são bastante genéricos, e as opções de configuração são limitadas. O *Insight* não mostra o consumo energético de acordo com o uso final, como iluminação, equipamentos, ar condicionado e água quente. Também não permite avaliar outros tipos de dispositivos de sombreamento, como abas verticais, brise-soleil, venezianas internas ou externas ou outros sistemas móveis.

O modelo de elementos construtivos foi simulado também utilizando a função Análise de Sistemas do *Revit*, que realiza uma análise do consumo anual de energia. Esta função gera um relatório de análise detalhado do consumo de energia do edifício, e pode ser utilizada no dimensionamento do sistema AVAC

(Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado). A função Análise de Sistemas apresenta os resultados de consumo de energia anual e mensal, categorizados por uso final, fonte energética, espaços, entre outras informações.

A função Análise de Sistemas permite avaliar o consumo de energia do edifício de forma mais detalhada, porém, inviabiliza a comparação de um número muito grande de variáveis, devido ao tempo de simulação e forma de apresentação dos resultados. O método é adequado para comparar algumas poucas alternativas de projeto de forma mais precisa e dimensionar o sistema AVAC. Entretanto a função também possui suas limitações, pois não apresenta resultados de comportamento térmico dos ambientes e superfícies e não permite a análise do conforto térmico utilizando ventilação natural.

Também foi criado um modelo de energia do edifício utilizando o programa OpenStudio, que permite inserir as configurações de forma detalhada. Ao comparar os resultados de consumo de energia entre as metodologias de análise utilizadas, os resultados são diferentes devido às suposições de cada programa. Porém a variação dos resultados considerando os diferentes cenários propostos apresentaram comportamento semelhante.

O Insight permite a visualização de diversos cenários e é adequado para a fase inicial de projeto, quando se deseja comparar muitas variáveis e identificar quais características construtivas ou de utilização irão impactar mais fortemente no desempenho energético do edifício. Nesta fase, como ainda há muitas variáveis indefinidas no projeto, os resultados podem não ser condizentes com o consumo real do edifício, porém são validos para avaliar comparativamente a eficiência de diferentes soluções em estudo.

Nesta fase, o uso de ferramentas mais complexas dificultaria a comparação de muitos cenários, devido ao tempo necessário para realizar as simulações, e ainda assim não seria possível garantir que os resultados representam o consumo real do edifício, pois muitas das variáveis não estarão definidas.

A ferramenta análise de sistemas é adequada para a fase do projeto onde se deseja dimensionar os sistemas de ar condicionado e ter uma estimativa de consumo energético mais refinada, com a definição de todos os sistemas e o uso de cada espaço da edificação.

Já as ferramentas mais complexas, como o OpenStudio, serão mais adequadas para fase de operação e manutenção, quando o consumo real pode ser medido, pode ser feita a calibração do modelo e avaliação do funcionamento dos sistemas.

O presente trabalho teve também como objetivo, avaliar o grau de interoperabilidade entre os modelos criados no *Revit* com outras ferramentas de análise de energia. Os modelos foram exportados em formato

gbXML, diretamente através do menu do *Revit* e importados para o programa *OpenStudio*. Esperava-se que o modelo BIM fosse capaz de transmitir as informações ao programa, porém, boa parte das informações foi perdida.

Os arquivos foram exportados usando as duas maneiras possíveis no *Revit*, utilizando Configurações de Energia e Volumes de espaço. Os dois métodos apresentam problemas quanto à geometria, o que os torna inadequados para a exportação de modelos para outros programas. O método de Configurações de Energia gerou um modelo contendo diversos desencontros na união das superfícies. O método de Volumes de Espaços gerou menos erros de geometria, porém as superfícies do piso do primeiro pavimento estavam faltando.

Muitas das informações exportadas para o arquivo gbXML, como cargas internas, tabela de padrão de utilização não foram lidas pelo programa de análise energética *OpenStudio*. É assim necessário melhorar a integração das ferramentas BIM e BEM, seja utilizando os formatos para interoperabilidade, como gbXML, ou com a integração direta dos softwares, como da função de análise de sistemas do *Revit*.

O Revit possui grande potencial para ser utilizado no desenvolvimento de projetos de edifícios com melhor desempenho energético. A ferramenta Insight facilita a comparação de diferentes cenários e os resultados são consistentes em termos comparativos. Porém, o Revit ainda possui considerável limitação na exportação do modelo para outras ferramentas de análise de energia mais avançadas, devido a inconformidades de geometria e perdas de informação.

A criação de modelos de energia automaticamente a partir dos modelos BIM representa uma grande economia de tempo e a transferência automática de informações evita erros devido a inserção manual. O Revit possui configurações de energia predeterminadas que agilizam muito o processo de criação dos modelos, apesar destas configurações não apresentarem muitos detalhes de uso do edifício.

5.2 Principais contribuições do estudo

Este estudo demonstrou que é possível inserir as análises energéticas no fluxo de trabalho desde as fases iniciais do desenvolvimento do projeto de um edifício utilizando a plataforma BIM *Autodesk Revit*. Adicionalmente, este estudo demonstrou que é possível utilizar diferentes ferramentas de simulação em cada etapa, de acordo com os resultados pretendidos.

O estudo também mostrou que ainda há a necessidade de melhorar a interoperabilidade entre ferramentas BIM e os programas de simulação, utilizando o formato gbXML.

5.3 Limitações do estudo

Foram avaliadas as ferramentas de análise de energia *Insight* e Análise de Sistemas integradas à plataforma Revit e a interoperabilidade dos modelos criados com o programa OpenStudio e EnergyPlus, porém, existem outros programas de análise de energia que não foram avaliados no estudo.

O estudo se limitou ao estudo de uma única tipologia de edifício de escritórios e foi analisada apenas a influência do percentual de abertura da fachada, da carga de iluminação e do clima das cidades selecionadas. Além disso, não foram considerados os projetos detalhados de estruturas, AVAC, elétrico, hidráulico e de iluminação.

5.4 Trabalhos futuros

Aplicação das ferramentas em diferentes casos de estudo, estudar diferentes tipologias de edifícios, considerar diferentes soluções construtivas, estudar a influência do clima de outras cidades Brasileiras.

Exportar os modelos do Revit para outras ferramentas de análise de energia, verificar se são perdidas as mesmas informações e desenvolver ferramentas para corrigir os erros de interoperabilidade.

Avaliar a influência das características dos projetos de estruturas, AVAC, elétrico, hidráulico e de iluminação detalhados no comportamento térmico e consumo de energia do edifício.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abanda, F. H., & Byers, L. (2016). An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling). *Energy*, *97*, 517–527. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2015.12.135

Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. (2017). *Guia 5 - Avaliação de desempenho energético em Projetos BIM: Coletânea Guias BIM ABDI-MDIC*. Brasília, DF.

American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2010). ASHRAE Standard 55-2010: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *ASHRAE Inc.* https://doi.org/ISSN 1041-2336

American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2012). *ASHRAE 169 - Climatic Data for Building Design Standards*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações: parte 1: definições, símbolos e unidades. In *Associação Brasileira de Normas Técnicas*. Rio de Janeiro, RJ.

Attia, S., Gratia, E., De Herde, A., & Hensen, J. L. M. (2012). Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy and Buildings*, *49*, 2–15. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2012.01.028

Batiz, E. C., Goedert, J., Morsch, J. J., Kasmirski Junior, P., & Venske, R. (2009). Avaliação do conforto térmico no aprendizado: estudo de caso sobre influência na atenção e memória. *Production*, *19*(3), 477–488. https://doi.org/10.1590/S0103-65132009000300006

Beazley, S., Heffernan, E., & McCarthy, T. J. (2017). Enhancing energy efficiency in residential buildings through the use of BIM: The case for embedding parameters during design. *Energy Procedia*, *121*, 57–64. https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.07.479

Bigois, L., Basso, K., & Souza, J. V. R. (2017). A Influência da Música e Temperatura Ambiente Sobre o Comportamento do Consumidor no Varejo. *Revista de Administração de Roraima - RARR*. https://doi.org/10.18227/2237-8057rarr.v7i1.3317

Brugnera, R. R. (2018). *Análise Integrada de Desempenho Energético, Impacto Ambiental e Custo: Estudo de Soluções de Fachada para Edifícios de escritório no Brasil*. Universidade de São Paulo.

BuildingSmart Finland. (2012a). *Common BIM Requirements - Series 1: General part*.

https://doi.org/10.1007/978-0-85729-817-1_22

BuildingSmart Finland. (2012b). *Common BIM Requirements - Series 10: Energy Analysis*.

BuildingSmart Finland. (2012c). *Common BIM Requirements - Series 9: Use of models in MEP analyses*.

Caires, B., Azenha, M., Lino, J. C., & Lacerda, N. (2014). Um plano de execução BIM de apoio ao projeto colaborativo entre o Engenheiro de Estruturas e o Arquiteto. *5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, 1–18.

Câmara Brasileira da Indústria da Construção. (2016). Volume 1 - Fundamentos BIM : Implementação do BIM para Construtoras e Incorporadoras. *CBIC- Câmara Brasileira Da Indústria Da Construção*, *1*, 124. https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.7b01429

Chong, H.-Y., Lee, C.-Y., & Wang, X. (2017). A mixed review of the adoption of Building Information Modelling (BIM) for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 4114–4126. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.09.222

Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. (2014). *Desempenho Energético Operacional em Edificações*. 8–11.

Dias, A. A. C. (2013). *Ana Alexandra Cunha Dias Avaliação da perceção da influência do conforto térmico na produtividade*.

Eletrobras/Procel, INMETRO, & CB3E/UFSC. (2013). *Introdução ao Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações*. 12. Retrieved from http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B89E211C6-61C2-499A-A791-DACD33A348F3%7D%5Cnhttp://bit.ly/1BwjT6V

Empresa de Pesquisa Energética. (2018a). *Balanço Energético Nacional 2018: Ano Base 2017*. Rio de Janeiro, RJ.

Empresa de Pesquisa Energética. (2018b). *Nota Técnica EPE 030/2018 - Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética*. Retrieved from http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT EPE 030_2018_18Dez2018.pdf

European Environment Agency. (2013). Environment and Human Health. In *Report EUR 25933 EN*. https://doi.org/10.2800/9092

Farzaneh, A., Monfet, D., & Forgues, D. (2019). Review of using Building Information Modeling for building energy modeling during the design process. *Journal of Building Engineering*, *23*, 127–135.

https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.01.029

Frota, A. B., & Schiffer, S. R. (2001). *Manual de Conforto Térmico* (5th ed.). São Paulo: Studio Nobel.

Gao, H., Koch, C., & Wu, Y. (2019). Building information modelling based building energy modelling: A review. *Applied Energy*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.032

Garber, R. (2009). Optimisation stories: The impact of building information modelling on contemporary design practice. *Architectural Design*, *79*(2), 6–13. https://doi.org/10.1002/ad.842

Garwood, T. L., Hughes, B. R., Oates, M. R., O'Connor, D., & Hughes, R. (2018). A review of energy simulation tools for the manufacturing sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*, 895–911. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.08.063

Guelli, A., & Zucchi, P. (2005). A influência do espaço físico na recuperação dos pacientes e os sistemas e instrumentos de avaliação. *Revista de Administração Em Saúde*, *7*(11), 43–50.

International Energy Agency. (2018a). 2018 Energy Efficiency Indicators Highlights. *International Energy Agency*, 191. https://doi.org/10.1080/10511482.1993.9521135

International Energy Agency. (2018b). Electricity Information 2018: Overview. *IEA Statistics*, 1–708. https://doi.org/http://dx.doi.org.ezproxy.lib.ryerson.ca/10.1787/electricity-2011-en

International Energy Agency. (2018c). *Energy Efficiency 2018*. Retrieved from https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2018

International Energy Agency. (2019a). *CO2 emissions from fuel combustion: Overview*. Retrieved from https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuel-combustion-2019

International Energy Agency. (2019b). *World energy balances: An Overview*. Retrieved from https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-2019

Isolani, P. (2008). *Eficiência energética nos edifícios residenciais*. 48. Retrieved from http://www.prestenergia.com/ficheiros/conteudos/files/EE_EdRes_enerbuilding.pdf

Jin, R., Zhong, B., Ma, L., Hashemi, A., & Ding, L. (2019). Integrating BIM with building performance analysis in project life-cycle. *Automation in Construction*, *106*, 102861. https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2019.102861

Kamel, E., & Memari, A. M. (2018). Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions. *Automation in Construction*, *97*, 164–180. https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2018.11.008

Kim, S., Zadeh, P. A., Staub-French, S., Froese, T., & Cavka, B. T. (2016). Assessment of the Impact of Window Size, Position and Orientation on Building Energy Load Using BIM. *Procedia Engineering*, *145*, 1424–1431. https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.04.179

Leavitt, A. (2019). *Energy Modeling with Revit and Insight*. Retrieved from https://www.autodesk.com/autodesk-university/class/Energy-Modeling-Revit-and-Insight-2019#handout

Lino, J. C., Azenha, M., & Lourenço, P. (2012). Integração da metodologia BIM na engenharia de estruturas. *Encontro Nacional Betão Estrutural -BE2012*, 1–10.

Maile, T., Fischer, M., & Bazjanac, V. (2007). Building Energy Performance Simulation Tools - a Life-Cycle and Interoperable Perspective. *Center for Integrated Facility Engineering*, (December), 1–49. Retrieved from cife.stanford.edu/sites/default/files/WP107.pdf

Ministério da Indústria Comércio Exterior e Serviços. (2018). *Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling - BIM*. 1–33. Retrieved from http://www.mdic.gov.br/images/REPOSITORIO/sdci/CGMO/26-11-2018-estrategia-BIM-BR-2.pdf

Ministério de Minas e Energia. (2019). Potencial de empregos gerados na área de Eficiência Energética no Brasil de 2018 até 2030. *Projeto "Sistemas de Energia Do Futuro,"* (GIZ, Mitsidi Projetos, and IEI Brasil).

Nações Unidas. (n.d.). No Title. Retrieved February 13, 2019, from https://sustainabledevelopment.un.org/milestones/humanenvironment

Nações Unidas. (2015). Adoption of the Paris Agreement. *Conference of the Parties on Its Twenty-First Session*, *21932*(December), 32. Retrieved from http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf

Nações Unidas. (2019). A ONU e a mudança climática. Retrieved February 13, 2019, from https://nacoesunidas.org/acao/mudanca-climatica/

Pezeshki, Z., Soleimani, A., & Darabi, A. (2019). Application of BEM and using BIM database for BEM: A review. *Journal of Building Engineering*. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.021

Pretti, A. L. M. (2018). *Interoperabilidade BIM e BEM: Avaliação de Eficiência do Sistema na análise energética de edifícios* (Universidade Federal do Espírito Santo). Retrieved from http://repositorio.ufes.br/handle/10/10689

Queiróz, G. R. de. (2016). *Análise Da Interoperabilidade Entre Os Programas Computacionais Autodesk Revit E Energyplus Para a Simulação Térmica De Edificações*. Retrieved from https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7939

Sampaio, A. V. C. de F., & Chagas, S. S. (2009). Avaliação De Conforto E Qualidade De Ambientes Hospitalares. *Simpósio Brasileiro de Qualidade Do Projeto No Ambiente Construído*, 491–502. https://doi.org/10.4237/sbqp.09.143

Sanhudo, L., Ramos, N. M. M., Poças Martins, J., Almeida, R. M. S. F., Barreira, E., Simões, M. L., & Cardoso, V. (2018). Building information modeling for energy retrofitting – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *89*, 249–260. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.03.064

Santos, L. M., & Couto, J. P. (2015). Ferramentas e processos BIM de avaliação e otimização energética em edifícios. *BIM Tools and Procedures for Energy Evaluation and Optimization in Buildings ISSN Para ISBN*, 174–178. https://doi.org/10.14684/SHEWC.15.2015.174-178

Sartori, T., & Calmon, J. L. (2019). Analysis of the impacts of retrofit actions on the life cycle energy consumption of typical neighbourhood dwellings. *Journal of Building Engineering*, *21*, 158–172. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2018.10.009

Schwartz, Y., & Raslan, R. (2013). Variations in results of building energy simulation tools, and their impact on BREEAM and LEED ratings: A case study. *Energy and Buildings*, *62*, 350–359. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.03.022

Silva, L. B. da. (2001). *Análise da relação entre produtividade e conforto térmico: o caso dos digitadores do centro de processamento de dados e cobrança da Caixa Econômica Federal do Estado de Pernambuco*.

Simanic, B., Nordquist, B., Bagge, H., & Johansson, D. (2019). Predicted and measured user-related energy usage in newly built low-energy schools in Sweden. *Journal of Building Engineering*, 101142. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.101142

Singh, P., & Sadhu, A. (2019). Multicomponent energy assessment of buildings using building information modeling. *Sustainable Cities and Society*, *49*, 101603. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2019.101603

Sterling, T. D., Collett, C., Rumel, D., D, T., Saúde, R., & Paulo, S. (1991). *A epidemiologia dos " edifícios doentes "*. 56–63.

Suzer, O. (2019). Analyzing the compliance and correlation of LEED and BREEAM by conducting a criteria-based comparative analysis and evaluating dual-certified projects. *Building and Environment*, *147*, 158–170. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.09.001

Szucko, A. S. (2018). Governança Climática Europeia : Pacotes 2020 e 2030 e o Acordo De Paris. *Associação Portuguesa de Estudos Europeus*, *5*(2018), 150–169.

Teixeira, D. B., Brionizio, J. D., Rodrigues, L. J. P., & Mainier, F. B. (2005). *Síndrome dos Edifícios Doentes em Recintos com Ventilação e Climatização Artificiais: Revisão de Literatura*.

U.S. Department of Energy. (2018). *EnergyPlus: Getting started*. https://doi.org/10.1007/978-3-540-44397-1_3

U.S. General Services Administration's. (2015). GSA BIM Guide 05 - Energy Performance. *National 3D-4D-BIM Program*, 76.

UNFCCC. (2019). UNFCCC Process and meetings. Retrieved from https://unfccc.int/process-and-meetings

Wakefield, K. L., & Baker, J. (1998). Excitement at the mall: Determinants and effects on shopping response. *Journal of Retailing*, *74*(4), 515–539. https://doi.org/10.1016/S0022-4359(99)80106-7

Zhang, Y., Bai, X., Mills, F. P., & Pezzey, J. C. V. (2018). Rethinking the role of occupant behavior in building energy performance: A review. *Energy and Buildings*, *172*, 279–294. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.05.017