



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

ANDRÉ FERREIRA DO VALE

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL E ANÁLISE TÉRMICA DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS EM
CLIMAS TROPICAIS: estudo de caso – edifício corporativo localizado na Cidade de
Recife/PE**

Recife
2020

ANDRÉ FERREIRA DO VALE

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL E ANÁLISE TÉRMICA DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS EM
CLIMAS TROPICAIS: estudo de caso – edifício corporativo localizado na Cidade de
Recife/PE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Processos e Sistemas Térmicos.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Santana Magnani.

Recife

2020

V149d	Vale, André Ferreira do. Desenvolvimento de uma metodologia de simulação computacional e análise térmica de edifícios de escritórios em climas tropicais: estudo de caso – edifício corporativo localizado na Cidade de Recife/PE / André Ferreira do Vale. - 2020. 64 folhas, il., gráfs., tabs. Orientador: Prof. Dr. Fabio Santana Magnani. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2020. Inclui Referências e Apêndice. 1. Engenharia mecânica. 2. Edifício. 3. Openstudio. 4. Simulação. 5. Carga térmica. 6. Análise paramétrica. I. Magnani, Fabio Santana (Orientador). II. Título. UFPE 621 CDD (22. ed.) BCTG/2021-52
-------	---

ANDRÉ FERREIRA DO VALE

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL E ANÁLISE TÉRMICA DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS EM
CLIMAS TROPICAIS: estudo de caso – edifício corporativo localizado na Cidade de
Recife-PE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 27/10/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fabio Santana Magnani (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Alvaro Antonio Ochoa Villa (Examinador Interno)
Instituto Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Monica Carvalho (Examinadora Externa)
Universidade Federal da Paraíba

Dedico o presente trabalho a minha família,
que sempre esteve presente nos momentos
mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Santana Magnani pelo seu apoio e suas orientações que contribuíram na realização deste trabalho e a Universidade Federal de Pernambuco pelos fomentos do programa de bolsas da Capes.

Aos amigos, Filipi Maciel, Tairine Ellen, Cássia Oliveira, Bruna Macêdo e a muitos outros que apoiaram nesses anos do mestrado.

Aos meus tios Cássia e José Bonifácio, e primos, Moacir, Jéssica e Larissa que sempre me ajudaram e para meus padrinhos Carmem e Ribamar pelo carinho e apoio.

Aos meus pais, Clea e Elias, minha irmã Cynthia, e a minha sobrinha Clarissa, pelo amor, compreensão e apoio nos momentos mais difíceis e alegria nas horas boas.

E a todos que me ajudaram direta ou indiretamente para realização deste trabalho.

Em toda e qualquer era, haverá humanos bons e humanos maus. Nesta espiral do tempo, a vida humana é longa demais para a reprodução. Já ao aprendizado é curta. Talvez por isso que os humanos sucumbam aos desejos e anseiem o desapego. Sendo que a vida se completa sob o Sol, sobre a terra e junta à poesia.

RESUMO

Implementar um modelo de simulação energética de edifícios em um estágio de projeto sempre se demonstrou um desafio ofuscado por uma falta de resultados precisos, quando os números dos modelos previstos são comparados com o uso real pós-ocupação. Com o impulso mundial para edifícios mais eficientes, essa percepção de precisão se torna ainda mais importante. Na indústria da construção, a maioria dos modelos de simulação são elaborados em conformidade com padrões e regulamentações nacionais, como a ASHRAE nos EUA, o RTQ-R no Brasil, ou a partir de um sistema de classificação como o LEED. Isso é feito no estágio inicial, antes que a construção tenha começado, já que a conformidade geralmente deve ser mostrada como parte do planejamento regulatório e do processo inicial de projeto. A presente investigação centrou-se principalmente no estudo de um modelo de simulação em um edifício calibrado pós-ocupação. Foi realizada uma análise da literatura a fim de identificar os parâmetros influentes na carga térmica além de uma análise paramétrica para determinar quão sensíveis essas variáveis podem ser nas simulações de consumo de energia térmica em comparação ao real. O prédio analisado se trata do Centro de Operação do Sistema (COS) da Chesf, situa-se em Recife ao lado do prédio sede da companhia. Os dados da carga térmica real desse edifício foram obtidos na literatura. Esse mesmo edifício foi modelado através do Sketchup e simulado no Openstudio. Na análise computacional do sistema foram considerados parâmetros como: Zona climático (tipo 1A) correspondente a região de Recife; Dados climáticos (INMET, IWECA, SWERA, TRY); Ganhos internos de equipamentos 6,89 W/m²; Lâmpadas fluorescentes e iluminância mínima de 8,3 W/m²; Parâmetros de ocupação 0,051129 pessoas/m²; Orientação solar de 90° em relação ao norte. Na análise paramétrica foram considerados fatores como: arquivos climáticos, luminância, orientação solar e materiais construtivos. Dentre os resultados obtidos pode-se afirmar que o modelo simulado apresenta boas proximidades com as das medições reais, com erros entre 0,05% e 16,6% dependendo do arquivo climático utilizado. Além disso, a análise paramétrica demonstrou a iluminância como o fator mais relevante dentre as variáveis estudadas, com discrepâncias de até 21,5% entre os limites permitidos pela norma. A metodologia utilizada provou-se adequada para prever o comportamento térmico de um edifício corporativo.

Palavras-chave: Edifício. Openstudio. Simulação. Carga térmica. Análise paramétrica.

ABSTRACT

Implementing an energy simulation model for buildings at a design stage has always proved a challenge overshadowed by a lack of accurate results, when the numbers of the predicted models are compared with the actual post-occupation usage. With the worldwide push for more efficient buildings, this perception of accuracy is becoming an important issue. In the construction industry, most simulation models are designed in accordance with national standards and regulations, such as ASHRAE in USA, RTQ-R in Brazil, or from a classification system such as LEED. This is done at the initial stage, before construction has started, as compliance must generally be shown as part of the regulatory planning and initial design process. The present investigation focused mainly on the study of a simulation model in a building calibrated after occupation. An analysis of the literature was carried out in order to identify the parameters influencing the thermal load in addition to a parametric analysis to determine how sensitive these variables can be in simulations of thermal energy consumption compared to the real one. The building analyzed is the Chesf System Operation Center (COS), located in Recife next to the company's headquarters building. The data of the actual thermal load of this building were obtained in the literature. This same building was modeled using Sketchup and simulated in Openstudio. In the computational analysis of the system, parameters were considered such as: Climatic zone (type 1A) corresponding to the region of Recife; Climatic data (INMET, IWECA, SWERA, TRY); Internal equipment gains 6,89 W/m²; Fluorescent lamps and a minimum illuminance of 8,3 W/m²; Occupancy parameters 0,051129 people/m²; 90° solar orientation in relation to the north. In the parametric analysis, factors such as: climatic archives, luminance, solar orientation and construction materials were considered. Among the results obtained, it can be stated that the simulated model presents good proximity to those of the real measurements, with errors between 0,05% and 16,6% depending on the climatic file used. In addition, parametric analysis demonstrated illuminance as the most relevant factor among the variables studied, with discrepancies of up to 21,5% between the limits allowed by the standard. The adopted methodology proved to be adequate to predict the thermal behavior of a corporate building.

Keywords: Building. Openstudio. Simulation. Thermal load. Parametric analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Demanda global de energia e tendências de emissões de CO ₂ no cenário de políticas declaradas, 2019-2030	14
Figura 2 – Emissões Antropogênicas totais de gases no efeito estufa (GtCO ₂ eq/ano) por setores econômicos	15
Figura 3 – Consumo de energia residencial como parcela do consumo total final de energia em 2017	16
Figura 4 – Vista frontal do prédio do COS.....	32
Figura 5 – Diagrama do Uso das Ferramentas Computacionais para Simulação.....	34
Figura 6 – Informações de entrada da modelagem.....	35
Figura 7 – Zoneamento climático brasileiro.....	36
Figura 8 – Geometria projetada da edificação.....	37
Figura 9 – Ferramentas de atributos de espaço e modos de renderização.	38
Figura 10 – Modelagem em SketchUp do edifício em estudo.	38
Figura 11 – Seleção dos arquivos climáticos em OpenStudio®.	41
Figura 12 – Edição de cronogramas no OpenStudio®.....	41
Figura 13 – Edição de materiais no OpenStudio®.....	42
Figura 14 – Simulação do modelo analisado.....	43
Figura 15 – Gráfico do consumo anual real da carga térmica	44
Figura 16 – Gráfico do consumo de energia elétrica simulada.	45
Figura 17 – Gráfico do consumo de carga térmica real versus simulada.	45
Figura 18 – Gráfico de médias mensais das temperaturas de bulbo seco e umidade relativa. .	48
Figura 19 – Gráfico da irradiação solar mensal dos arquivos climáticos.....	49
Figura 20 – Gráfico do efeito da iluminação na carga térmica.	51
Figura 21 – Efeito da orientação solar na carga térmica.	52
Figura 22 – Efeito dos materiais construtivos na carga térmica.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BEM	Building energy modeling
BEM	Balanco Energético Nacional
BTO	Departamento de Construção de Tecnologias
CAD	Computer Aided Design
COP	Coeficiente de desempenho
COS	Centro de Operação do Sistema
DOE	Departamento de Energia
EIA	Agência de Informação de Energia
EPA	Agência de Proteção Ambiental
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning
IEA	International Energy Agency
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IWEC	International Weather for Energy Calculations
LEED	Leadership in Energy e Environmental Design
LOST	Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos
NREL	National Renewable Energy Laboratory
OSB	Oriented Strand Board
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
SDK	Kit de desenvolvimento de software
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment
TRY	Test Reference Year
UH	Unidades habitacionais autônomas
USGBC	United States Green Building Council

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES	19
2.2	POR QUE UTILIZAR SIMULAÇÃO?	21
2.3	ANÁLISE DE VARIÁVEIS INFLUENTES NA SIMULAÇÃO.....	23
2.3.1	Arquivos Climáticos	25
2.3.2	Iluminância.....	27
2.3.3	Orientação Solar	28
2.3.4	Materiais Construtivos	29
3	METODOLOGIA DE ANÁLISE DA CARGA TÉRMICA.....	32
3.1	MONITORAMENTO DA DEMANDA TÉRMICA REAL	32
3.2	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS.....	33
3.3	MODELAGEM PREDIAL EM SKETCHUP	34
3.4	SIMULAÇÃO DA CARGA TÉRMICA	39
3.4.1	Configurações em Openstudio®	39
3.4.2	Simulação em EnergyPlus™.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	MEDIÇÃO DA CARGA TÉRMICA REAL.....	44
4.2	SIMULAÇÃO DO EDIFÍCIO	44
4.3	ANÁLISE TÉRMICA DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS	47
4.4	ANÁLISE PARAMETRICA.....	49
4.4.1	Arquivos Climáticos	50
4.4.2	Iluminância.....	50
4.4.3	Orientação Solar	51
4.4.4	Materiais Construtivos	52
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
5	CONCLUSÃO.....	54
5.1	CONTRIBUIÇÕES PARA A SOCIEDADE	55
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
	REFERÊNCIAS	56

APÊNDICE A – MEDIÇÃO E RESULTADOS DA ANÁLISE

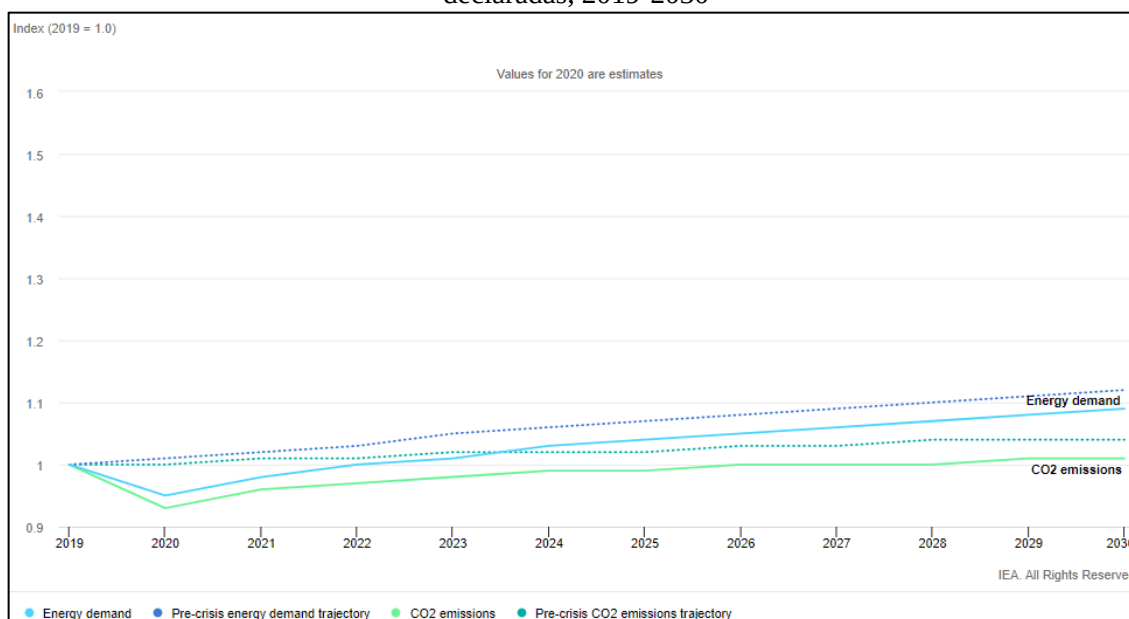
PARAMÉTRICA.....	62
-------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

O rápido crescimento do uso mundial de energia vem levantado grandes preocupações sobre as dificuldades de suprimento, exaustão de recursos energéticos e impactos ambientais (efeito estufa, depreciação da camada de ozônio, aquecimento global, mudanças climáticas etc.).

De acordo com a IEA (2020), as medidas de lockdown e as consequências econômicas da Covid-19 significam que as emissões de CO₂ deverão diminuir em 7% em 2020 e os investimentos em energia limpa deverão cair 8%. No cenário de políticas declaradas, a demanda total de energia retornará ao nível anterior à crise no início de 2023, como mostrado na figura 1, embora as tendências e o tempo variem entre os países. As emissões de CO₂ se recuperam em 2021, excedem os níveis de 2019 em 2027 e aumentam para 36 Gt em 2030. Isso está longe do pico imediato e da queda nas emissões necessárias para cumprir as metas climáticas, incluindo as do Acordo de Paris.

Figura 1 – Demanda global de energia e tendências de emissões de CO₂ no cenário de políticas declaradas, 2019-2030

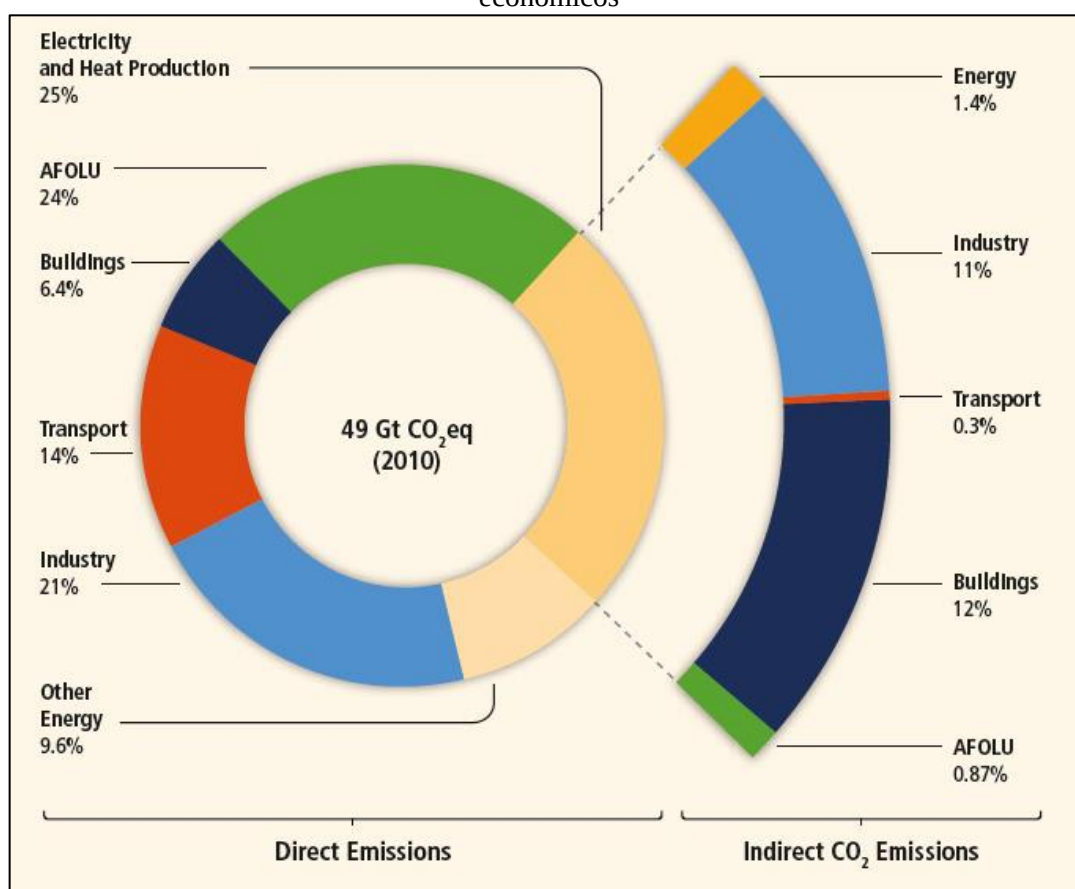


Fonte: IEA (2020).

Segundo o IPCC (2015), o setor de edificações respondeu em 2010 por 32% do uso final de energia e 8.8 GtCO₂ de emissões, incluindo emissões diretas e indiretas, o que representa 18,4% das emissões globais, como demonstra a figura 2. O relatório projeta que a demanda de energia deve quase dobrar; e as emissões de CO₂, aumentar entre 50 e 150% por

volta do meio do século, ao se considerarem os possíveis cenários. As emissões diretas referem-se àquelas oriundas de fontes fisicamente situadas nas próprias edificações (em caldeiras, na cocção, de gases fluorados de refrigeradores, etc.), enquanto as emissões indiretas referem-se àquelas oriundas da produção de eletricidade e aquecimento urbano para uso nas edificações.

Figura 2 – Emissões Antropogênicas totais de gases no efeito estufa (GtCO₂eq/ano) por setores econômicos



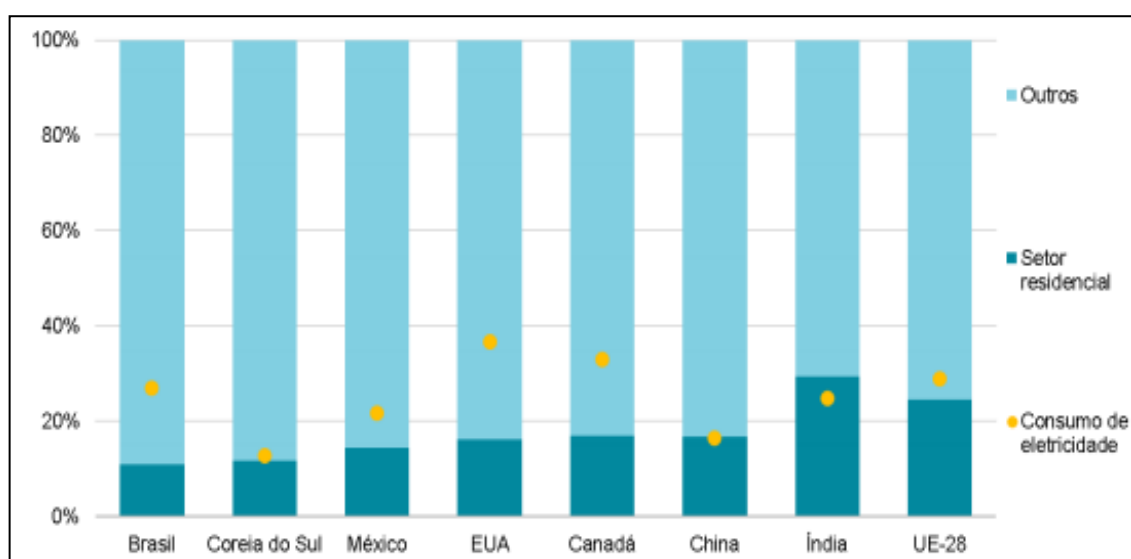
Fonte: IPCC (2015).

A contribuição global dos edifícios para o consumo de energia, tanto residencial quanto comercial, aumentou de forma constante, alcançando valores entre 20% e 40% nos países desenvolvidos, e ultrapassou os outros setores principais: industrial e de transporte (Pérez-Lombard, Ortiz, & Pout, 2008). Nos EUA, os relatórios da perspectiva de energia anual de 2018 da Agência de Informação de Energia (EIA) estima que a energia entregue ao setor de edificações (residencial e comercial) cresce 0,3%/ano de 2017 a 2050 nos casos de referência, respondendo por 27% do total de energia consumida nos EUA em 2017 e 26% em 2050 (EIA, 2018). Segundo Levy (2009) os edifícios produzem 30% de toda a produção de

resíduos dos EUA (aproximadamente 136 milhões de toneladas por ano) além de serem responsáveis por 30% das emissões de gases de efeito estufa.

De acordo com a IEA (2019) o setor residencial no Brasil representou quase 10% do consumo final total de energia em 2017 e 25% do consumo de eletricidade, como ilustrado na figura 3. Na maioria dos países, as famílias respondem por uma parcela maior do consumo de eletricidade do que do consumo total final de energia, devido ao papel dos aparelhos elétricos e da iluminação na prestação de serviços de energia doméstica.

Figura 3 – Consumo de energia residencial como parcela do consumo total final de energia em 2017



Fonte: IEA (2019).

Numerosos países e regiões desenvolveram programas de construções ecológicas destinados a promover edifícios mais sustentáveis, como O LEED, ou Leadership in Energy and Environmental Design, que é o programa de construções sustentáveis mais utilizado no mundo, com 96.275 projetos registrados e certificados em mais de 167 países e territórios (GBC, 2018). O sistema de classificação de edifícios foi concedida pela organização não governamental United States Green Building Council (USGBC) e incentiva uma abordagem de projeto integrado, com um esquema de pontos que atribui créditos para recursos de projeto de construção considerados para melhorar a sustentabilidade, o que inclui reduções no uso de energia e melhorias na qualidade do ambiente interno.

Nos Estados Unidos, foi lançado em 1992 o Energy Star® que é um programa conjunto da Agência de Proteção Ambiental (EPA) e do Departamento de Energia (DOE). Seu objetivo é ajudar os consumidores, as empresas e a indústria a economizar dinheiro e

proteger o meio ambiente através da adoção de produtos e práticas com eficiência energética. A etiqueta Energy Star identifica produtos, residências e edifícios com melhor desempenho e baixo custo.

No Brasil, existe o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) e o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) criados pelo PROCEL-EDIFICA. Ambos os regulamentos avaliam as edificações em cinco níveis: desde A (mais eficiente) até E (menos eficiente).

O RTQ-R especifica requisitos para a classificação da eficiência energética de unidades habitacionais autônomas (UH), edificações unifamiliares, edificações multifamiliares e áreas de uso comum, sendo uma compilação de normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) aplicáveis à construção, projeto e desenvolvimento deste tipo de empreendimento. A etiquetagem de eficiência energética para cada um dos itens acima é feita avaliando-se os requisitos relativos ao desempenho térmico ou da eficiência do sistema dependendo da zona habitacional analisada (INMETRO, 2012).

O RTQ-C aplica-se a edifícios condicionados, parcialmente condicionados ou não condicionados e especifica requisitos técnicos e métodos para a classificação de edifícios comerciais, de serviços e públicos, a análise da edificação é realizada com base principalmente na envoltória, nos sistemas de iluminação e no sistema de condicionamento de ar. O método presente no regulamento adota um processo de avaliação e etiquetagem, declarando quão eficiente é o edifício analisado. Pode-se avaliar um projeto pelo método prescritivo (baseado na análise de simulações de um número limitado de casos através de regressão) ou pelo método de simulação (INMETRO², 2012).

Visto isso, é importante destacar que os estudos no consumo energético de edifícios representam uma excelente oportunidade para alcançar reduções de energia em grande escala. Se levarmos em conta toda a vida útil de uma edificação, um estudo energético pode assegurar uma minimização do impacto ambiental além de prover uma análise sobre o futuro comportamento térmico da habitação o que possibilita garantir as condições de conforto pretendidas, com reduzidos gastos energéticos. Além do mais, a obtenção da demanda térmica de edifícios pode auxiliar outros estudos energéticos como projetos de sistemas combinados de calor e eletricidade, onde o consumo de energia é tomado como dado de entrada de um modelo de otimização.

Segundo Dorigo (2010) a construção civil, sobretudo no Brasil, se apresenta como uma das principais causadoras de danos ambientais, tendo grande participação nos problemas

relacionados ao esgotamento dos recursos naturais. A maior parte da energia gasta em uma edificação, seja qual for a sua função, ocorre no decorrer de sua vida útil, o que aponta para a necessidade de edificações bem planejadas e que apresentem sistemas racionais e sustentáveis capazes de atender ou auxiliar o seu próprio consumo.

Uma edificação que influencia negativamente na carga térmica, contribuindo com o aumento no consumo de energia, pode trazer grandes prejuízos se considerarmos o tempo de vida do edifício. Para reduzir a pegada ambiental deixada pelos edifícios, novas edificações precisam usar menos energia em sua construção e operação do que os prédios anteriores de tamanho e formato semelhantes, enquanto ainda proporcionam um ambiente interno satisfatório para seus ocupantes.

Neste trabalho foram realizadas simulações térmicas para um edifício de escritórios situado na cidade de Recife para fins de comparação com as medições reais de carga térmica do mesmo. A metodologia empregada para esse estudo constituiu na modelagem computacional através do programa SketchUp e na realização de simulações através dos programas e OpenStudio® e EnergyPlus™. Além disso, foram realizadas simulações alterando-se parâmetros que influenciam na carga térmica.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é utilizar técnicas de modelagem simplificada e simulação computacional a fim de comparar e validar dados térmicos simulados com medições reais de um edifício corporativo.

Esse trabalho tem como objetivos específicos:

- a) Realizar uma análise térmica dos arquivos climáticos disponíveis na região com a intenção de identificar quais os mais apropriados para simulação e que fatores influenciam na escolha do mesmo;
- b) Executar uma análise exaustiva da literatura a fim de identificar parâmetros de entrada da simulação que influenciam na carga térmica;
- c) Efetuar uma análise paramétrica com variações de alguns fatores e determinar quais variáveis têm forte influência na simulação de energia de edifícios;
- d) Explorar as incertezas nos dados para observar onde é necessário realizar a análise de sensibilidade em uma variedade de valores.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentada uma revisão dos assuntos relacionados à elaboração deste trabalho. Para isso, divide-se o capítulo em três partes principais: eficiência energética em edificações; relevância da utilização de simulação energética e análise das variáveis influentes em uma simulação.

2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

Na literatura existem diversos trabalhos relacionados com o estudo energético de edificações. Estudos como os de Newsham (2009) e Scofield (2009) analisam sistemas de classificação verde a partir de médias de consumo de energia nacionais e regionais publicadas para edifícios comerciais como fonte de dados (benchmarking), Heinonen (2014) utiliza dados semelhantes para analisar os padrões de consumo de energia e os requisitos gerais de energia da habitação de famílias urbanas e rurais.

Anderson (2017) utilizou o processo de avaliação da viabilidade do uso de perfis de carga de eletricidade doméstica como uma ferramenta para inferir as principais características de consumo do agregado familiar. Usando um conjunto de dados do tipo medidor inteligente, puderam gerar uma série de indicadores de perfil de carga que resumem os principais recursos dos perfis das residências, permitindo a diferenciação entre elas.

Outros trabalhos como os de Jradi (2018) utilizaram uma metodologia de simulação energética para modelos reais a fim de realizar uma análise e avaliação de renovação energética com o objetivo de melhorar o desempenho energético de edifícios da Dinamarca. Mazdak (2020) apresentou uma ferramenta de software para gerar múltiplos cenários de projeto e avaliá-los, combinando simulação de energia e análises econômicas, no projeto esquemático e nas fases iniciais de desenvolvimento de projetos de construção, com foco em parâmetros arquitetônicos, densidade de potência de iluminação, aquecimento, ventilação e ar condicionado.

No Brasil, existem grupos de pesquisa como o Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos (LOST) da Universidade Federal de Pernambuco que vem realizando estudos de otimização a mais de uma década. Dentre os trabalhos desenvolvidos pelo grupo podemos destacar o de Freitas (2016) que procurou analisar dados de consumo energético disponíveis no Anuário Estatístico de Energia Elétrica e dados de destinação de energia elétrica encontrados no Plano de Energia 2030 para estimar o consumo de energia em

shopping centers em Pernambuco. Além de estudos como os de Macedo (2007) que utilizou procedimentos de medições in-loco para definir o perfil de consumo de um edifício.

Existem também pesquisas como as de Mazzaferro (2015), que realizou simulações através do software EnergyPlus com o intuito de analisar recomendações de normas americanas relacionadas a envoltória de edificações comerciais, além de serem impostas variações nos dados de entrada do modelo de referência a fim de verificar seus impactos no consumo de energia elétrica da edificação. Valdivia (2019) também utilizou o EnergyPlus para estudar a variação do controle de automação de temperaturas em um sistema de água gelada em diferentes cidades brasileiras. Os resultados obtidos permitiram definir uma configuração com melhor eficiência energética que as demais.

Melhorar a eficiência energética é uma estratégia importante para garantir o uso sustentável de entidades de uso final de energia, o impacto ao meio ambiente também é uma consideração importante. Em relação a isso, o benchmarking da eficiência energética é utilizado para promover esse fim.

O uso de diferentes metodologias ocasionalmente leva a conclusões diferentes para o mesmo estudo, destacando a importância de padronização dos benchmarks usados para avaliar o desempenho energético de edifícios. Segundo Chung (2011) para conseguir isso, precisamos desenvolver um sistema de benchmarking (ou modelo de simulação) de uma amostra de edifícios de referência para obter "edifícios similares". O sistema deve levar em consideração diversos fatores, pois os diferentes desempenhos da eficiência energética de um edifício podem ser afetados por:

- a) fatores aleatórios, como condições climáticas incomuns;
- b) características físicas como idade, número de pavimentos, cobertura, insolação, etc.;
- c) incentivos fiscais enfrentados pela administração predial ou pelos proprietários; e
- d) diferenças em como os ocupantes do edifício utilizam os equipamentos e dispositivos de energia.

Os desempenhos reais de uso de energia dos edifícios de referência devem ser normalizados considerando os fatores acima. Podemos, assim, classificar os edifícios de referência de acordo com o desempenho de uso de energia usando os resultados normalizados. Os sistemas de benchmarking funcionam como uma medida pública do desempenho do uso de energia em edifícios.

Para Federspiel (2002) o problema com os métodos de benchmarking existentes é que eles não consideram suficientemente os diferentes requisitos funcionais dos edifícios. Este problema é particularmente grave em edifícios de laboratórios, onde os requisitos

funcionais são únicos e variam consideravelmente de um laboratório para outro. Outro problema é que todos os benchmarks atuais são baseados no desempenho de outros edifícios, eles não refletem até que ponto a eficiência energética poderia ser melhorada pelo fato da população poder estar fazendo um uso ineficaz da energia.

Graças à velocidade de computação rápida, ao baixo custo e à fácil modificação, a simulação da energia de edifícios se tornou cada vez mais popular e fornece ricos conjuntos de dados em energia para várias aplicações. Além de conter dados de eficiência do sistema, informações de isolamento, horários de operação e consumo de energia por hora etc. Simulações também podem gerar amostras de dados energéticos em diferentes situações.

De acordo com Turner (2008), levando em conta uma base de previsão específica do projeto, a proporção de uso real e previsto de energia varia amplamente entre os projetos, mesmo dentro de um nível de certificação LEED. Em outras palavras, a precisão das previsões individuais de uso de energia é muito inconsistente. Em uma base de projeto individual, isso sugere que a modelagem de energia é uma má preditora do desempenho energético específico do projeto. O consumo de energia medido, para mais da metade dos projetos, desviam-se em mais de 25% das projeções de design, sendo 30% significativamente melhores e 25% significativamente piores.

Segundo Ye (2019) existem quatro atributos para as diferenças entre os dados de pesquisa e os dados de simulação: 1) dificuldades para explicar o comportamento dos ocupantes, 2) efeitos interativos entre sistemas, 3) incerteza nas entradas do modelo e 4) ineficiências em edifícios reais.

Apesar de suas diferenças, cada método tem suas próprias vantagens e desvantagens, tanto dados de levantamentos como dados de simulação podem ser usados para benchmarks de desempenho energético, previsões de uso de energia, reconhecimento de contribuintes de energia predial e desenvolvimento de políticas e padrões de eficiência energética. Além disso, dados de simulação podem ser usados para realizar modelagem em escala urbana. Devido às vantagens e desvantagens dos dados de levantamento e simulação, as aplicações combinadas dos dois tipos de dados também são utilizadas em algumas pesquisas. Ao fazer isso, os dois tipos de dados podem se complementar.

2.2 POR QUE UTILIZAR SIMULAÇÃO?

Conseguir um ambiente interno de alta qualidade a um custo aceitável sempre apresentou um desafio para a indústria da construção. Com aspectos do desenvolvimento

sustentável agora sendo adicionados à lista de requisitos e o crescimento dos materiais e de sistemas disponíveis que podem ser empregados, esse desafio deve se tornar ainda maior. Para aumentar os problemas dos projetistas, determinar a vantagem de uma configuração sobre outra é uma tarefa árdua que exige alguns meios para traduzir as inúmeras interações físicas em informações sobre custo e desempenho relacionados à adequação à finalidade, uso de energia e impacto ambiental.

A simulação computacional representa uma possível solução para o dilema da complexidade, permitindo avaliações abrangentes e integradas das opções de projeto em condições operacionais realistas. Através dos programas de simulação, pode-se avaliar o desempenho térmico e energético de edificações para diferentes alternativas de projeto, sejam elas opções do desenho arquitetônico, componentes construtivos, sistemas de iluminação ou sistemas de condicionamento de ar. Dando aos profissionais a capacidade de apreciar o comportamento subjacente de um sistema e, assim, tomar medidas criteriosas para melhorar o desempenho em todos os critérios relevantes.

O método de simulação representa uma mudança de paradigma de vasto potencial, dando origem a um processo de design mais barato, melhor e mais rápido. E proporcionará resultados que melhor atendam às aspirações da sociedade por práticas sustentáveis, proteção ambiental e mitigação das mudanças climáticas.

A simulação computacional pode ser usada em qualquer estágio do projeto para abordar questões relevantes como:

- a) Quais são as máximas demandas de aquecimento, refrigeração e iluminação e onde e quando elas ocorrem?
- b) Quais são os principais fatores influentes na eletricidade e na carga térmica?
- c) Qual será a contribuição de tecnologias específicas - isolamento, cobertura, vidros avançados, controle inteligente, etc. - quando implantadas de forma independente ou em conjunto?
- d) Sistemas de energia limpa e renovável podem ser usados para atender à demanda e/ou operar em cooperação com o fornecimento público de eletricidade sem perda da qualidade da energia? e assim por diante.

Essa técnica permite que os usuários entendam a inter-relação entre os parâmetros de design e desempenho, identifiquem possíveis áreas problemáticas e, assim, implementem e testem as modificações apropriadas no projeto. O design resultante é mais consciente da energia, com melhores níveis de conforto e qualidade do ar.

2.3 ANÁLISE DE VARIÁVEIS INFLUENTES NA SIMULAÇÃO

O processo de identificação para categorizar as variáveis críticas com base em sua contribuição energética não afeta apenas o consumo total do edifício, mas também altera os processos de transferência de calor associados e a subsequente complexidade do modelo.

Segundo Shiel (2018) a comunidade de pesquisa nas arenas de simulação predial, nos setores de modelo do projeto e calibração concentrou-se predominantemente nas questões que envolvem as propriedades físicas dos edifícios, incluindo a envoltória, o clima e os serviços dos edifícios. Tem sido difícil quantificar os efeitos das influências do fator humano, incluindo operações e manutenção, comportamento humano e condições ambientais internas de qualquer maneira generalizada. Esses fatores variam de prédio para prédio e de local para local.

Para Clarke (2001), um edifício pode ser caracterizado por parâmetros como: nível de ocupação, taxa de ventilação, grau de isolamento, localização, tipo de vidraça, HVAC, etc. Compreendendo, assim, vários domínios termodinâmicos (movimento do ar, troca de radiação, fluxo de umidade, fluxo de energia elétrica, distribuição da luz do dia, etc.) cada um dos quais pode interagir com os outros de maneira não trivial. Por exemplo, o simples ato de ajustar a posição de um dispositivo de sombreamento de janela terá efeitos em cascata sobre o brilho, o nível da luz interna, requisitos de iluminação artificial, ganho de calor da luminária, resfriamento do espaço, etc.

Vários pesquisadores identificaram importantes parâmetros de entrada de simulação como a principal causa de erro ou os mais sensíveis. A lista de referência mostrada no quadro 1 é composta de estudos que identificaram os parâmetros sensíveis nas execuções de simulação ou identificados como tendo o maior efeito sobre o uso de energia predial real ou operacional.

Quadro 1 – Grupos paramétricos influentes identificados na literatura.

Estudo	Parâmetros de simulação identificados/examinados
(Ourghi, Al-Anzi, & Krarti, 2007)	Forma construtiva, porcentagem de envidraçamento (e seu coeficiente de ganho de calor solar), tipo de vidro e clima
(KiranKumar, Saboor, & Babu, 2017)	Material das paredes e tipos de vidro
(Pérez-Lombard, Ortiz, & Pout, 2008)	Tempo, horário de ocupação, iluminação, refrigeração e equipamentos eletrodomésticos
(Dalong, Wenqin, & Jiaping, 2017)	Radiação solar global, exposição à luz do dia, temperatura externa, umidade relativa do ar e velocidade do vento
(Jentsch, Bahaj, & James, 2008)	Arquivos climáticos e temperatura de bulbo seco
(Bazjanac, 2010)	Limites espaciais e geometria construtiva
(Forkaides, Maxoulis, Panayiotou, Neophytou, & Kalogirou, 2011)	Comportamento dos ocupantes, cargas de aquecimento e resfriamento e cronograma de operação da planta
(Molin, Rohdin, & Moshfegh, 2011)	Infiltração, ganhos de calor interno, orientação das janelas, ocupação, velocidade do vento, ganhos internos e eficiência do trocador
(Heidarinejad, et al., 2017)	Geometria do edifício, zonas térmicas e cronogramas de operação
(Wilde, 2014)	Temperatura externa (dependente do tempo, clima e uso do edifício)
(A.Boccalatte, M.Fossa, L.Gaillardb, & C.Menezob, 2020)	Microclima e Morfologia Urbana
(Anderson, Wulfhorst, & Lang, 2015)	impactos operacionais, materiais, forma da construção, propriedades e desempenho térmico (massa térmica e ponte térmica)

Fonte: O Autor (2020).

Os fatores listados não representam análises de sensibilidade ou um ranking de parâmetros por influência, mas aqueles identificados como influentes pelos pesquisadores na realização de seus estudos.

De acordo com Heidarinejad (2017) os processos de transferência de calor que permitem classificar as entradas do modelo de energia de construção podem ser divididos em três categorias: entradas internas, externas e do sistema. As variáveis de entrada são geralmente o principal impulsionador da precisão das simulações de energia do edifício dominadas pela carga interna.

As cargas internas não reguladas, como as cargas de iluminação, tomadas e os horários associados, podem mudar significativamente com o padrão de uso de um edifício e, em última análise, influenciar a precisão da simulação de energia do edifício. Entradas externas, como a forma e as propriedades térmicas da envolvente do edifício, são as variáveis mais influentes para a precisão de construções dominadas pela carga externa.

Entradas do sistema podem afetar significativamente as cargas internas e externas do edifício. Embora as variáveis nessas três categorias não sejam independentes, essa categorização pode focar os esforços de modelagem de energia do edifício. As interfaces atuais e os menus de seleção de entrada nas ferramentas existentes de simulação de energia do edifício de última geração geralmente se assemelham a essa categorização.

Os insumos externos abrangem diferentes categorias como geometria do edifício, dados meteorológicos reais, características térmicas da envolvente do edifício e a influência do bairro urbano. Variáveis meteorológicas podem influenciar significativamente a precisão das simulações, essas variáveis são geralmente consideradas baseadas nos impactos do microclima ao ar livre no consumo de energia do edifício. As variáveis dentro da geometria do edifício e as características térmicas da envolvente do edifício geralmente permanecem constantes a menos que haja um retrofit do edifício principal.

Neste estudo, foram selecionadas algumas categorias de dados de entrada para classificar as variáveis críticas em uma simulação da carga térmica. São elas:

2.3.1 Arquivos Climáticos

O conhecimento das condições climáticas é de extrema importância, pois representam os requisitos básicos para o projeto de sistemas de condicionamento de ar, cálculos simplificados do consumo de energia e para as simulações termo energéticas de edificações. Um fator importante na seleção do arquivo de dados meteorológicos é o local

onde o arquivo climático é coletado. A proximidade da estação meteorológica determina se o arquivo climático é apropriado para o local de construção específico.

Atualmente, existem diferentes tipos de arquivos climáticos que podem ser utilizados em programas de simulação computacional. Porém, muitos destes tipos apresentam dados somente para um respectivo país. Dentre os diferentes tipos de arquivos climáticos existentes para o uso em simulação computacional, na região em estudo destacam-se:

- a) Test Reference Year (TRY) - Segundo Goulart, et al. (1998), o Test Reference Year é formado por dados horários organizados em formato padronizado, contendo informações climáticas para as 8760 horas do ano. O procedimento utilizado para selecionar o ano climático para um local específico, é baseado na eliminação de anos de dados, os quais contém temperaturas médias mensais extremas (altas ou baixas), até permanecer um ano, somente. Os dados do TRY podem ser utilizados para gerar uma Carta Bioclimática, material que associa informações sobre a zona de conforto térmico, o comportamento climático do local e as estratégias de projeto indicadas para cada período do ano, a fim de adaptar a edificação ao clima da cidade. Para o projeto proposto a estação de coleta para esse arquivo climático fica localizada no aeroporto Gilberto Freyre de Recife, a aproximadamente 7,5 km do edifício estudado e o ano de referência é 2005.
- b) Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA) - O projeto SWERA teve início em 2001 com o objetivo de disponibilizar informações solares e de vento. A pesquisa começou através de um estudo piloto, financiado por empresas e parcerias no mundo. O objetivo era fornecer informações sobre dados de recursos energéticos renováveis para diversas regiões do mundo, os produtos do projeto SWERA incluem uma série de informações que possuem desde mapas das diversas componentes da radiação solar até dados detalhados de infraestrutura e parâmetros socioeconômicos para algumas regiões do planeta. Os dados estão disponíveis gratuitamente e destinam-se a apoiar o trabalho dos projetistas, analistas e investidores. Para o projeto proposto a estação de coleta para esse arquivo climático fica localizada a latitude -8.07 e longitude -34.85, a aproximadamente 8,9 km do edifício estudado e consiste de dados medidos entre 1979 e 1996.
- c) International Weather for Energy Calculations (IWEC) - O IWEC é o resultado do Projeto de Pesquisa 1015 da ASHRAE, realizado pela Numerical Logics e Bodycote Materials Testing Canada para o comitê técnico da ASHRAE Technical Committee 4.2 Weather Information. Os arquivos de dados IWEC são arquivos climáticos

“típicos”, adequados para uso em programas de simulação de energia de edifícios. Os dados climáticos são complementados por radiação solar estimada a cada hora a partir da geometria terra-sol e elementos climáticos horários, particularmente informações sobre a quantidade de nuvens. Para o projeto proposto a estação de coleta para esse arquivo climático fica localizada a latitude -8.100 e longitude -34.883, a aproximadamente 6,9 km do edifício estudado e consiste de dados medidos entre 1983 e 1995.

- d) INMET - A missão do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, é prover informações meteorológicas à sociedade brasileira e influir construtivamente no processo de tomada de decisão, contribuindo para o desenvolvimento sustentável do país. O sistema de coleta e distribuição de dados meteorológicos do instituto é dotado de estações de sondagem de ar superior (radiossonda); estações meteorológicas de superfície, operadas manualmente, e a maior rede de estações automáticas da América do Sul. A partir delas são obtidos parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, etc), que integra os valores observados minuto a minuto e os disponibiliza automaticamente a cada hora. Para o projeto proposto a estação de coleta para esse arquivo climático fica latitude -8.05 e longitude -34.88, a aproximadamente 5,9 km do edifício estudado e consiste de dados medidos entre 2006 e 2007.

2.3.2 Iluminância

Em geral, os sistemas de iluminação são responsáveis por consumir cerca de 25,5% da energia elétrica conforme relatado pelo Departamento de Energia dos EUA (DOE, 2008). O tipo e a potência das luminárias devem ser obtidos a partir do projeto de iluminação.

A norma brasileira NBR 5413 (1992) determina requisitos de iluminação em ambientes de trabalho. A norma se baseia no nível de iluminância para cada ambiente e atividade, e também abrange outros aspectos como a cor da iluminação (temperatura de cor) e o limite para efeitos como cintilação. O quadro 2 apresenta os níveis de iluminância definidos pela Norma Brasileira.

Quadro 2 – Iluminâncias por classe de tarefas visuais.

Classe	Iluminância (lux)	Tipo de atividade
A – Iluminação geral para áreas usadas interruptamente ou com tarefas visuais simples.	20 – 30 – 50	Áreas públicas com arredores escuros
	50 – 75 – 100	Orientação simples para permanência curta
	100 – 150 – 200	Recintos não usados para trabalho contínuo;
	200 – 300 – 500	Tarefas com requisitos visuais limitados. trabalho bruto de maquinaria, auditórios
B – Iluminação geral para área de trabalho	500 – 750 – 1000	Tarefas com requisitos visuais normais. trabalho médio de maquinaria, escritórios
	1000 – 1500 – 2000	Tarefas com requisitos especiais, gravação manual, Inspeção, indústria de roupas.
C – Iluminação adicional para tarefas visuais difíceis	2000 – 3000 – 5000	Tarefas visuais exatas e prolongadas, eletrônica de tamanho pequeno
	5000 – 7500 – 10000	Tarefas visuais muito exatas, montagem de microeletrônica
	10000 – 15000 – 20000	Tarefas visuais especiais, cirurgia depósitos

Fonte: ABNT (1992).

2.3.3 Orientação Solar

A energia solar é concentrada na faixa visível da luz e na região infra-vermelha do espectro da radiação. Somente 1,373 kW/m² da radiação, alcança a superfície da terra quando a direção dos raios solares é vertical, para um céu limpo (sem nuvens). A radiação celeste é um tipo de radiação difusa, cuja presença constitui o ganho de calor na terra; a ela é adicionada à radiação solar direta, que é maior quando a atmosfera está translúcida.

O guia da ASHRAE (2017) estabelece equações para avaliar o total de radiação recebida do céu pela superfície da terra. A quantidade recebida depende das variações sazonais da constante de umidade, da distância sol-terra, da variação angular com as vizinhanças e das superfícies refletoras mais relevantes. Como o plano equatorial da terra é

inclinado em relação ao plano orbital a declinação solar varia ao longo do ano. Essa variação causa as estações do ano com seus períodos desiguais de luz do dia e escuridão.

Isso demonstra que o ganho de calor externo em um edifício varia de intensidade conforme as horas do dia e época do ano, pois depende da orientação solar, da mudança de temperatura externa e da mudança de radiação solar o que resulta em uma variação no total de carga térmica incidida no ambiente e, por isso, o estudo da orientação é relevante no desempenho térmico. Sabe-se que, para regiões tropicais, o ideal é que os ambientes de permanência prolongada absorvam pouca carga térmica e, para isso, esses ambientes precisam estar expostos ao menor número de horas à radiação solar (BARBOSA, 2017).

2.3.4 Materiais Construtivos

A radiação solar é o fator mais importante na carga térmica e é responsável por 40% a 70% da carga de resfriamento nos edifícios (KiranKumar, Saboor, & Babu, 2017). A minimização do ganho de calor solar através das paredes e janelas pode reduzir uma quantidade substancial de consumo de energia para o sistema de climatização.

De acordo com Specht (2010) um projeto de edificações energeticamente eficientes necessita de conhecimentos sobre a transferência de calor do ambiente externo para o interior das edificações, a fim de criar soluções que associem diferentes materiais e dimensões de camadas às condições desejadas de conforto térmico. A produção desse conhecimento via construção de protótipos, além de onerosa, apresenta dificuldades com relação à variação dos materiais e dimensões das camadas.

A pesquisa com modelagem matemática é uma alternativa para contornar esse problema. Nessa alternativa a teoria de transferência de calor é associada a experimentos de laboratório, resultando em programas computacionais que podem ser usados como ferramenta de análise e projeto.

Nesse contexto, nesse estudo foram realizadas simulações com os tipos de construções mais utilizadas no Brasil, no qual podemos destacar:

- a) Alvenaria estrutural com blocos de concreto – é um sistema construtivo racionalizado, no qual os elementos que desempenham a função estrutural são de alvenaria, ou seja, os próprios blocos de concreto. No sistema convencional de construção, as paredes apenas fecham os vãos entre pilares e vigas, encarregados de receber o peso da obra. Para Mohamad (2015) a alvenaria estrutural possui diversas vantagens, na qual a econômica é uma das principais, em virtude da otimização de tarefas na obra, por

meio de técnicas executivas simplificadas e facilidade de controle nas etapas de produção e eliminação de interferências, gerando uma redução no desperdício de materiais produzido pelo constante retrabalho. Como consequência, o sistema construtivo em alvenaria estrutural conseguiu proporcionar uma flexibilidade no planejamento das etapas de execução das obras no Brasil.

- b) Alvenaria convencional de tijolos de cerâmica – é considerado um processo rápido e de qualidade, já que ao mesmo tempo em que as paredes são erguidas, também é criada a estrutura de sustentação de toda a estrutura. Os blocos cerâmicos têm função de vedação e proporcionam bom isolamento termoacústico, possuindo acabamentos de textura fina ou ranhurada. No Brasil, segundo Ramalho (2003) a alvenaria com blocos cerâmicos vem expandindo sua força com o surgimento de fornecedores confiáveis, que buscam atender todas as exigências normativas, com produtos de resistências superiores a 10 MPa. Pode-se admitir, num futuro próximo, que os blocos cerâmicos passarão a concorrer com os blocos de concreto em uso para edificações com mais de 10 pavimentos, apresentando um bom desempenho.
- c) Drywall – é um modo de construção a seco, composto por uma estrutura rígida, composta por perfis metálicos e placas cimentícias de gesso pré-moldado e industrializado. As paredes de gesso acartonado podem ser definidas como um sistema constituído por perfis de chapas de aço zincado leves e placas de gesso acartonado de alta resistência mecânica e acústica, fixadas por meio de parafusos especiais com tratamento de juntas e arestas. De acordo com Nunes (2015), a técnica do drywall é uma alternativa sustentável e viável, uma forma de construção enxuta e altamente industrializada que substitui a limitada forma convencional, feita a base de projetos detalhados e integrados, com racionalização dos seus processos que traz diminuição de perdas e prazos na obra.
- d) Steel framed – é um sistema construtivo pré-fabricado que utiliza o aço galvanizado ou aço galvalume em sua estrutura principal, gerando elementos de baixo peso. É produzido a partir de chapa de aço com espessura reduzida, gerando rapidez na execução da obra, redução no peso do edifício, redução de custos e desperdícios. A influência do aço neste tipo de sistema, mantém a estrutura leve, sendo destaque para edifícios com determinado número de pavimentos, além de sua resistência a determinados tipos de agentes externos. Desenvolvido e utilizado principalmente nos países desenvolvidos ele vem ganhando cada vez mais espaço no mercado brasileiro,

inicialmente utilizado em construções comerciais e agora nas construções residenciais. É um dos métodos de construção seca mais utilizados no país.

- e) Wood framed – é um sistema no qual a estrutura é composta por perfis de madeira que em conjunto com as placas de OSB (Oriented Strand Board) constituem painéis estruturais capazes de suportar às cargas verticais, perpendiculares e de corte transmitindo as cargas até a fundação. O sistema permite a utilização de qualquer tipo de fundação, mas por sua estrutura leve e distribuição uniforme de cargas, os dois tipos mais utilizados são radier e sapata corrida. O sistema wood framed permite a construção de edificações de até cinco pavimentos com total controle dos gastos já na fase de projeto, devido à possibilidade de industrialização do sistema.

3 METODOLOGIA DE ANÁLISE DA CARGA TÉRMICA

A avaliação de desempenho térmico de uma edificação pode ser feita tanto na fase de projeto, quanto após a construção. Em relação à edificação construída, a avaliação pode ser feita através de medições locais de variáveis representativas do desempenho, na fase de projeto esta avaliação pode ser feita por meio de simulação computacional ou através da verificação do cumprimento de diretrizes construtivas.

O presente estudo buscou analisar dados reais das demandas de carga térmica obtidos pelo monitoramento do edifício em estudo a fim de comparar com os resultados da simulação do mesmo. Em seguida foram realizadas simulações paramétricas com o intuito de estimar a influência dos dados de entrada na demanda de carga térmica. Os tópicos a seguir apresentam a metodologia escolhida para obter esses resultados.

3.1 MONITORAMENTO DA DEMANDA TÉRMICA REAL

O prédio analisado se trata do Centro de Operação do Sistema (COS) da Chesf mostrado na figura 4, situa-se em Recife ao lado do prédio sede da companhia. Possuindo três pavimentos (sendo um o térreo) sua escolha se deu por razões logísticas uma vez que seriam necessárias longas campanhas de medição de energia além de levantamentos internos à edificação.

Figura 4 – Vista frontal do prédio do COS



Fonte: Google Maps (2020).

A coleta dos dados para a determinação do perfil da carga térmica da central de água gelada do sistema de ar condicionado seguiu dados colhidos por Macedo (2007) onde foram realizadas medições in-loco dos componentes do sistema de refrigeração do edifício do COS. O procedimento adotado consistiu nas seguintes atividades:

- a) Medição a cada minuto do consumo elétrico da central de água gelada por um ano obtendo-se o perfil de consumo elétrico médio horário do chiller;
- b) Medição a cada minuto das temperaturas de saída do condensador e do evaporador, tendo como resultado dados das temperaturas do evaporador de junho a setembro. Apenas esse período do ano foi considerado devido a indisponibilidade de sensores e equipamentos de medição.
- c) Medições da vazão de água gelada;
- d) Cálculo da carga térmica do sistema de refrigeração a partir das medições de temperatura do evaporador e da vazão de água gelada;
- e) Cálculo do coeficiente de desempenho (COP) do sistema a cada minuto;
- f) Avaliação da incerteza associada a cada uma das grandezas;
- g) Estimativa dos valores máximo, mínimo e intermediário do COP ao longo do ano a partir de dados obtidos com a metodologia acima;
- h) Determinação do perfil anual horário da carga térmica do sistema a partir do perfil anual de consumo elétrico e dos valores de COP estimados.

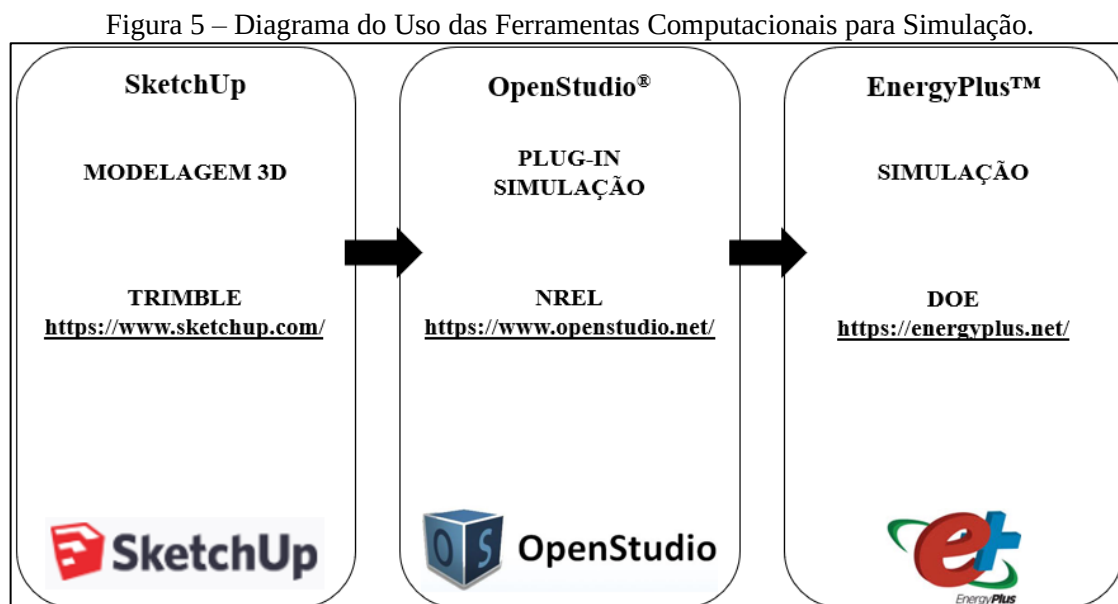
3.2 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS

A evolução recente do ramo informático e potencialidades associadas permitiu o desenvolvimento de uma nova área de avaliação do comportamento térmico de edifícios, onde a realização de simulações computacionais em ferramentas específicas permitem uma crítica análise das soluções elaboradas e respectivo desempenho energético dos mesmos (Costa, 2012).

Devido à capacidade de processamento simultâneo, as ferramentas computacionais possibilitam a análise dos processos em regime dinâmico, na qual se efetua uma contínua interação entre o interior da habitação com o envolvente ambiental ao longo do período de análise.

A metodologia utilizada neste trabalho para a realização da simulação computacional é baseada no conjunto de softwares SketchUp, OpenStudio e EnergyPlus, os

quais possuem funções variadas durante a modelagem e simulação, ilustradas conforme a figura 5.



Fonte: O Autor (2020).

Também foi realizado um estudo dos arquivos climáticos através do software Climate Consultant 6.0 que é um programa de computador baseado em gráficos, simples de usar, que usa arquivos climáticos anuais no formato EPW que são disponibilizados gratuitamente pelo DOE para milhares de estações meteorológicas em todo o mundo. O Climate Consultant traduz esses dados e disponibiliza todos os valores em formato CVS para todas as horas, dias ou meses do ano.

3.3 MODELAGEM PREDIAL EM SKETCHUP

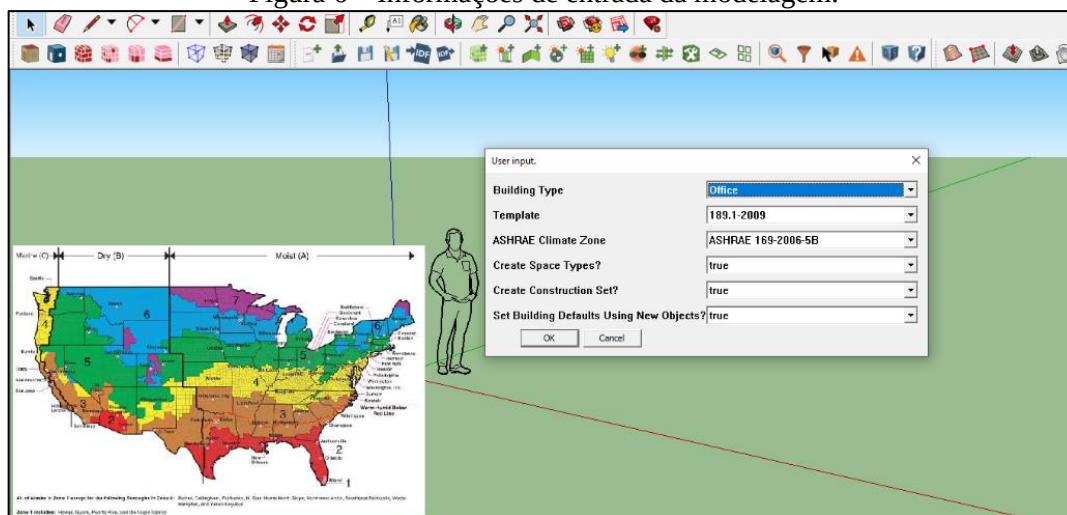
Criado para proporcionar uma experiência próxima do desenho à mão e de modelagem com objetos reais, o SketchUp se destaca pela rapidez e facilidade de criação de objetos e estudos volumétricos. A qualidade da apresentação, bastante original, que foge de padrões usados normalmente, e a capacidade de trocar dados entre vários programas do segmento Computer Aided Design (CAD) também são diferenciais importantes. O programa apresenta funcionalidades como a integração com o Google Earth e a disponibilização de várias bibliotecas gratuitamente.

Foi originalmente desenvolvido pela At Last Software, uma empresa estadunidense com sede em Boulder, Colorado, a qual foi adquirida pela Google em 2006. Em 2012 a Trimble Navigation adquiriu o programa. O SketchUp está disponível em duas versões: a versão profissional, Pro, e a versão gratuita, Make, (para uso privado, não comercial).

O SketchUp Pro oferece funcionalidade extra para as pessoas que precisam exportar seu trabalho para CAD, para programas de renderização ou para outros aplicativos de software profissionais, além de incluir o LayOut, que é um programa que permite criar apresentações completas a partir de seus modelos do SketchUp. Extremamente prático, o programa auxilia o profissional em seu desenvolvimento de projeto em todas as escalas possíveis, desde um encaixe de uma marcenaria de um mobiliário, uma reforma de um apartamento até num planejamento urbano de uma cidade. Nesse estudo ele foi utilizado para modelagem 3D e configuração dos elementos da edificação em estudo.

O primeiro passo em uma modelagem pelo Sketchup é escolher o tipo de template que irá ser utilizado, a zona climática e o tipo da construção como mostrado na figura 6.

Figura 6 – Informações de entrada da modelagem.



Fonte: O Autor (2020).

Os climas do mundo são classificados diretamente por diversos autores, dependendo das variações ambientais, como temperatura do ar, umidade, ventos, radiação solar e precipitação de cada região do planeta. A nível de simulação energética pelo EnergyPlus, os critérios para escolha da zona climática brasileira correspondente podem ser feitos de acordo com a Ashrae (2013) (Climate Data for Building Desing Standards), que

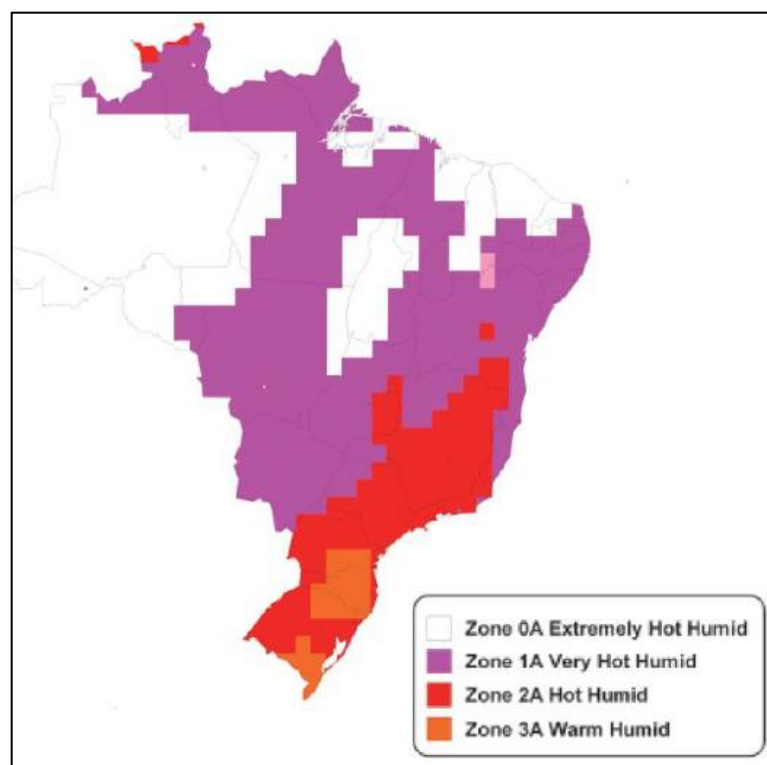
disponíveis de dados climáticos para normas de projetos de edificações, como mostrado no Quadro 3, sendo HDD (heating degree day) o número de graus-dia para aquecimento e CDD (cooling degree day) o número de graus-dia para resfriamento.. A norma realiza a divisão do território brasileiro de acordo com a figura 7.

Quadro 3 – Definições de zonas térmicas

Thermal Zone	Name	I-P Units	SI Units
0	Extremely hot	$10,800 < CDD50^{\circ}F$	$6000 < CDD10^{\circ}C$
1	Very hot	$9000 < CDD50^{\circ}F \leq 10,800$	$5000 < CDD10^{\circ}C \leq 6000$
2	Hot	$6300 < CDD50^{\circ}F \leq 9000$	$3500 < CDD10^{\circ}C \leq 5000$
3	Warm	$CDD50^{\circ}F \leq 6300$ and $HDD65^{\circ}F \leq 3600$	$CDD10^{\circ}C < 3500$ and $HDD18^{\circ}C \leq 2000$
4	Mixed	$CDD50^{\circ}F \leq 6300$ and $3600 < HDD65^{\circ}F \leq 5400$	$CDD10^{\circ}C < 3500$ and $2000 < HDD18^{\circ}C \leq 3000$
5	Cool	$CDD50^{\circ}F \leq 6300$ and $5400 < HDD65^{\circ}F \leq 7200$	$CDD10^{\circ}C \leq 3500$ and $3000 < HDD65^{\circ}C \leq 4000$
6	Cold	$7200 < HDD65^{\circ}F \leq 9000$	$4000 < HDD18^{\circ}C \leq 5000$
7	Very Cold	$9000 < HDD65^{\circ}F \leq 12600$	$5000 < HDD18^{\circ}C \leq 7000$
8	Subarctic/arctic	$12600 < HDD65^{\circ}F$	$7000 < HDD65^{\circ}C$

Fonte: Ashrae (2013).

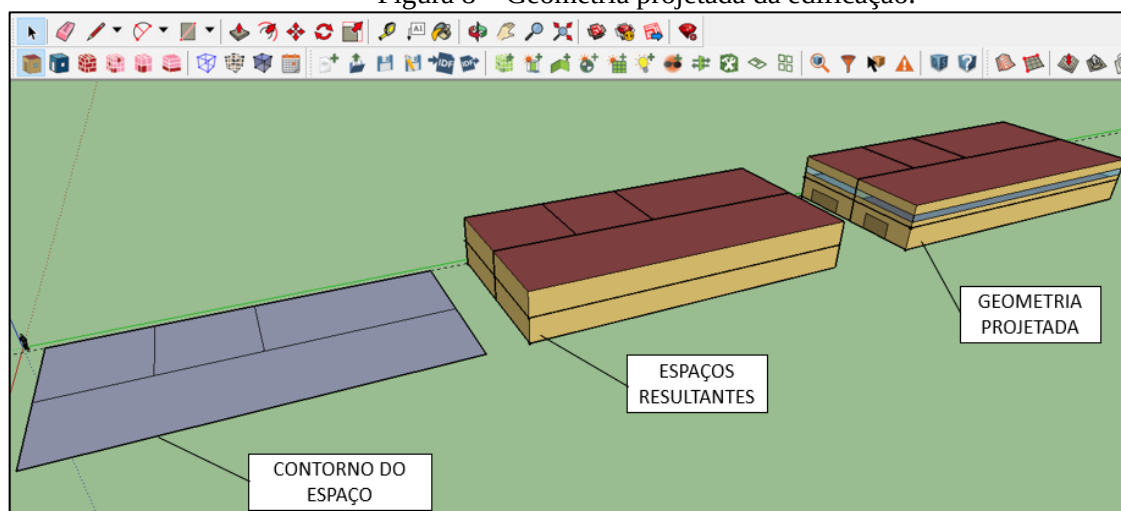
Figura 7 – Zoneamento climático brasileiro



Fonte: Ashrae (2013).

Depois de usar as ferramentas nativas do SketchUp para desenhar um contorno de espaço, podemos usar a ferramenta “Spaces From Diagram” para projetar o diagrama em uma construção de vários andares. Embora a geometria seja gerada automaticamente a partir do diagrama, ela pode ser editada usando as ferramentas do SketchUp como mostrado na Figura 8. Também é possível adicionar detalhes da construção como sombreamento, portas, janelas, subsuperfícies, etc. Ferramenta importante para detalhamento de diretrizes para condicionamento térmico passivo.

Figura 8 – Geometria projetada da edificação.

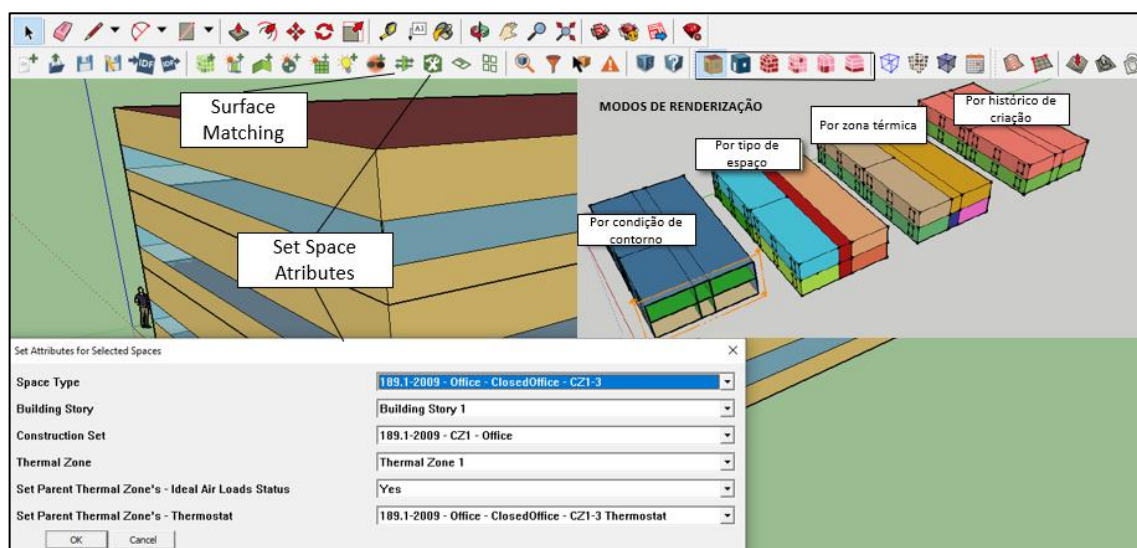


Fonte: O Autor (2020).

Após definir a geometria da edificação podemos usar a ferramenta “Surface Matching” para definir as condições de contorno. Isso permitirá conexões térmicas entre os espaços e informará o OpenStudio® sobre qual construção aplicar a simulação.

Em seguida, podemos usar a ferramenta de atributos de espaço para definir várias características a um espaço como; tipo de espaço (corredor, sala de reunião, refeitório, escritório, etc), tipo de zona térmica, temperatura de termostato, etc. Há um modo de renderização correspondente para cada atributo de espaço. Para aplicar essa utilidade, escolhemos um ou mais espaços selecionamos a ferramenta “Set Space Attributes” como mostrado na figura 9.

Figura 9 – Ferramentas de atributos de espaço e modos de renderização.

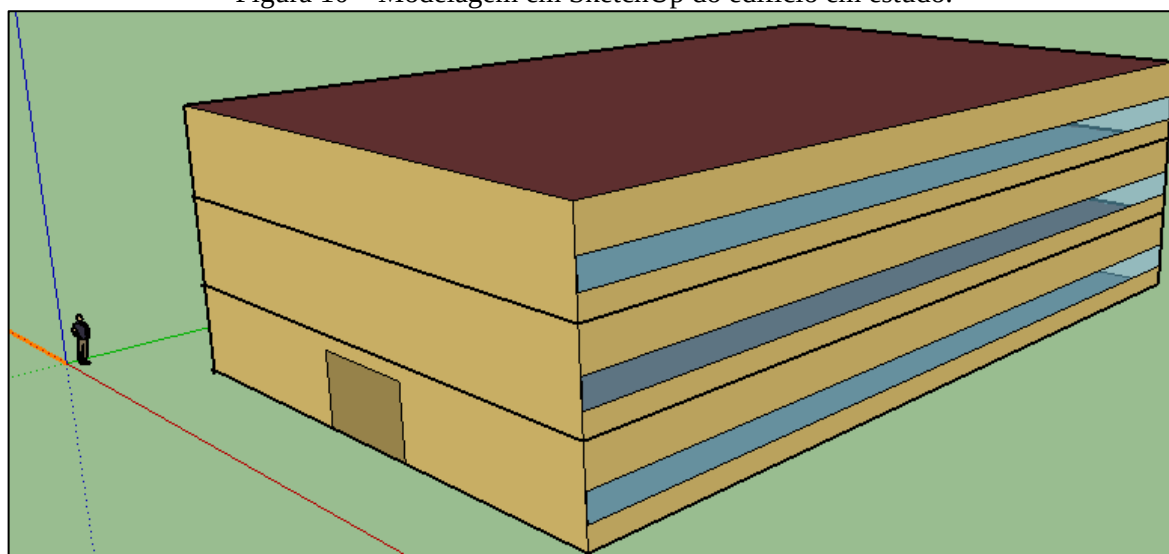


Fonte: O Autor (2020).

O edifício modelado pelo Sketchup é apresentado na figura 10, e seguiu uma metodologia sugerida por Heidarinejad (2017) onde afirma que o formato da maioria das edificações podem ser simuladas como formas geométricas básicas, procedimento que representa uma maneira para tornar o processo de modelagem mais rápido.

A forma básica, o número de pisos, a altura do piso, a profundidade da zona do perímetro, as proporções entre janelas e o tipo de janela são tudo o que é necessário para gerar rapidamente a geometria para um modelo de energia com a API do OpenStudio.

Figura 10 – Modelagem em SketchUp do edifício em estudo.



Fonte: O Autor (2020).

3.4 SIMULAÇÃO DA CARGA TÉRMICA

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos (LOST) da Universidade Federal de Pernambuco, onde a partir dos dados operacionais e construtivos do edifício fornecidos pela companhia Chesf, foi possível definir parâmetros como:

- a) Volume total do edifício de 5600 m³;
- b) Janelas de vidro comum com 3 mm, emissividade de 0,9, transmitância térmica de 3,122 W/(m².k) e fator solar 0,2325;
- c) Parede em drywall com espessura de 76 mm em gesso, 25,4 mm de reboco e com transmitância térmica resultante de 5,549 W/(m².k);
- d) Cronograma de atividades considerando os domingos operando entre as 18 e 24h e os sábados sem operações;
- e) Tipo de espaço (edifício de escritórios).

Para entender melhor o comportamento do edifício em um ano típico, uma avaliação do desempenho energético foi realizada usando o modelo de simulação de construção no OpenStudio® para um edifício monitorado na região de Recife-PE que se encontra no clima litorâneo úmido. Na análise computacional do sistema foram considerados parâmetros como:

- a) Zona climática do tipo 1A para clima muito quente e úmido segundo a Ashrae (2013) e zoneamento bioclimático tipo 8 correspondente a região de Recife de acordo com a NBR 15220 (2003);
- b) Arquivos climáticos da região de Recife (INMET, IWEC, SWERA, TRY);
- c) Ganhos internos de equipamentos 6,89 W/m²;
- d) Lâmpadas fluorescentes e luminosidade mínima de 8,3 W/m² de acordo com a norma NBR 5413 (1992);
- e) Parâmetros de ocupação 0,051129 pessoas/m²;
- f) Orientação solar de 90° em relação ao norte.

3.4.1 Configurações em Openstudio®

O OpenStudio® é um projeto de código aberto desenvolvido pela Alliance for Sustainable Energy. Foi lançado pela primeira vez em abril de 2008 pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL), uma parte do Departamento de Energia dos EUA. É um

componente estratégico nos esforços do DOE para aumentar o uso efetivo de building energy modeling (BEM) avançado, especificamente com o EnergyPlus. Os aplicativos gráficos incluem o plug-in OpenStudio® SketchUp, o aplicativo OpenStudio®, o ResultsViewer e a ferramenta de análise paramétrica. O plug-in OpenStudio SketchUp é uma extensão da ferramenta de modelagem SketchUp 3D que permite aos usuários criar rapidamente a geometria necessária para o EnergyPlus.

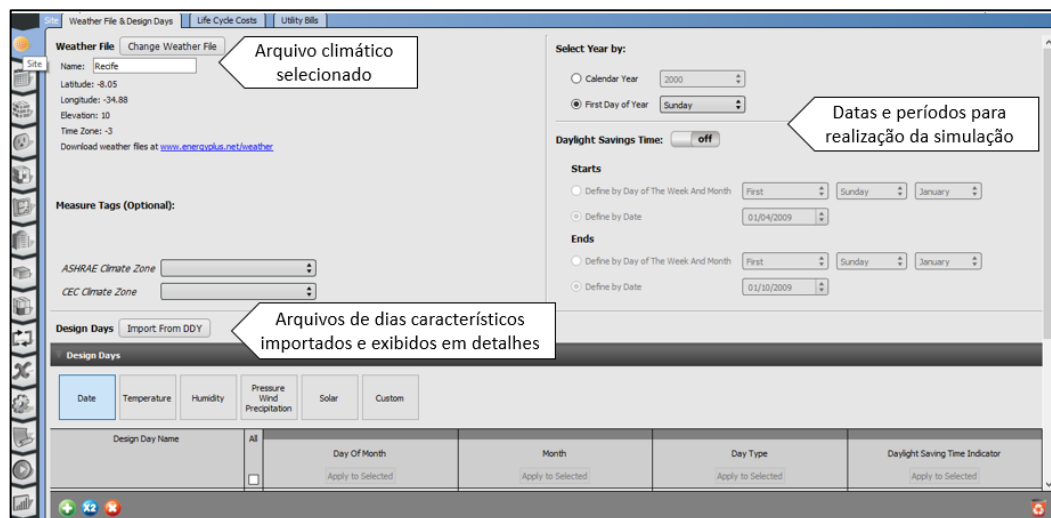
O kit de desenvolvimento de software (SDK) do OpenStudio® é uma biblioteca que mantém uma representação detalhada do modelo de energia do prédio e os resultados da simulação e fornece funções que são comuns a muitas aplicações BEM (Roth, Goldwasser, & Parker, 2016). Dentre suas vastas gamas de funções, temos:

- a) Criação das características dos materiais aplicados na edificação;
- b) Descrição das camadas para composição de superfícies;
- c) Fragmentação das áreas por zonas térmicas (grupo de ambientes que combinam o uso de um mesmo sistema de climatização);
- d) Detalhamento das cargas elétricas da edificação: equipamentos e sistemas de iluminação por zona;
- e) Especificação do perfil de ocupação da construção por zona.

Com isso, é possível exportar as informações para o EnergyPlus e complementar com modelos mais complexos de sistemas HVAC, por exemplo, para assim alcançar resultados da performance energética do edifício de modo mais detalhado.

Após ter realizado a modelagem do edifício e atribuído as respectivas características as zonas e superfícies podemos realizar a simulação da edificação no OpenStudio®. A guia inicial “Site” permite definir o arquivo climático (em .EPW) que deseja-se utilizar na simulação. O arquivo meteorológico é armazenado no arquivo OSM como um caminho. Também é possível vincular os dias característicos (Em .DDY) no qual se pode visualizar e editar informações como: temperatura, umidade, pressão, velocidade do vento, etc. Ainda é possível escolher as datas e o período onde será realizada a simulação como é mostrado na figura 11.

Figura 11 – Seleção dos arquivos climáticos em OpenStudio®.

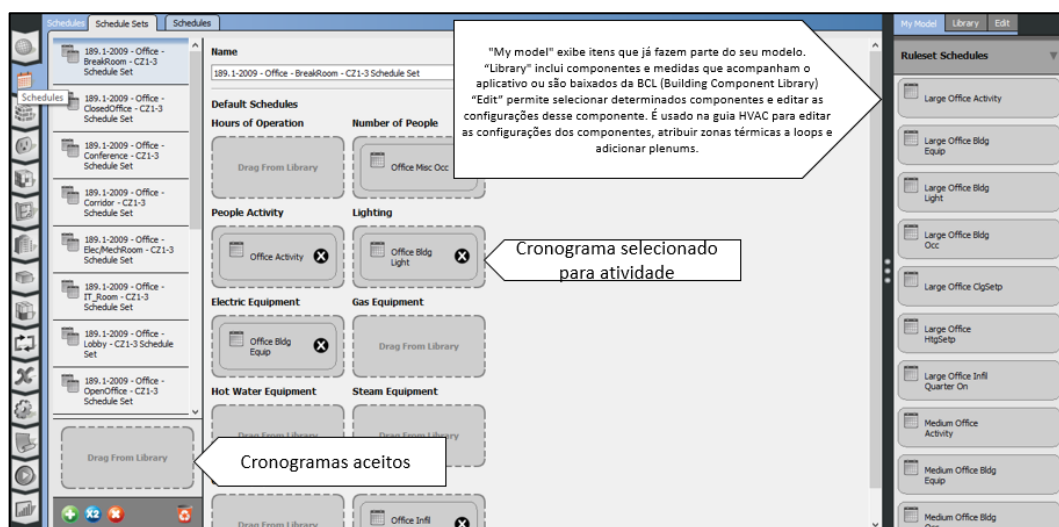


Fonte: O Autor (2020).

A figura 12 demonstra a guia “Schedules” do OpenStudio® possui uma coleção de cronogramas para a realização de atividades como; horas em operação, número de pessoas, atividades, luzes, equipamentos elétricos, infiltração, etc. Um cronograma pode ser aplicado a um edifício inteiro, uma história, um tipo de espaço ou a um espaço individual.

Na subguia é possível selecionar dois tipos de zonas de entrada, onde é possível selecionar cronogramas do seu modelo próprio ou da biblioteca na parte inferior do painel esquerdo ou selecionar cronogramas individuais nas zonas próprias do corpo principal. Também é possível criar cronogramas personalizados para qualquer atividade.

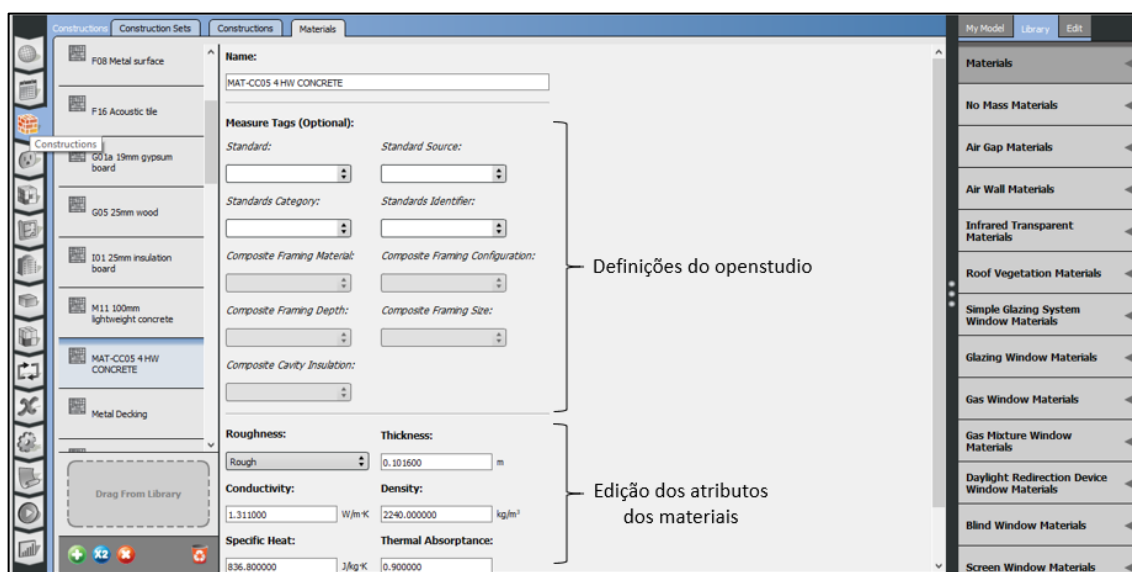
Figura 12 – Edição de cronogramas no OpenStudio®.



Fonte: O Autor (2020).

A guia “Constructions” lista os objetos de construção que estão no modelo. Uma construção consiste em uma ou mais camadas de material. Pode-se adicionar materiais arrastando-os do “Meu modelo” ou da “Biblioteca” para a zona suspensa. A subguia “Materials”, mostrada na figura 13, serve para modificar e criar novos materiais onde pode-se inspecionar os tipos de paredes, portas, janelas, etc.

Figura 13 – Edição de materiais no OpenStudio®.



Fonte: O Autor (2020).

Outras guias permitem a edição de vários parâmetros utilizados no modelo, como a guia “Loads” que contém definições de carga internas de pessoas, luzes, luminárias, equipamento elétrico, equipamento a gás, etc. A guia “Facility” permite definir a orientação da construção em relação ao eixo norte. Pode-se variar perfis aquecimento e definir pontos de ajuste de resfriamento sem ter que definir um HVAC detalhado para o sistema com a guia “Thermal Zones” além de poder definir termostatos e padrões de cargas térmicas ideais. A guia “HVAC systems” é usada para criar, inspecionar e editar a planta de ventilação, exaustão e ar condicionado do modelo.

As últimas cinco guias são referentes aos procedimentos de simulação e resultados do software. Na guia “output variables” pode-se definir uma lista de variáveis com base no tipo de objetos que constituem o modelo podendo ativá-las ou desativá-las e definir a frequência dos relatórios. Essas variáveis preenchem o arquivo gerado pelo EnergyPlus com dados de resultados anuais de séries temporais. A guia “simulation settings” permite inspecionar e personalizar muitas das configurações de simulação usadas pelo EnergyPlus.

3.4.2 Simulação em EnergyPlus™

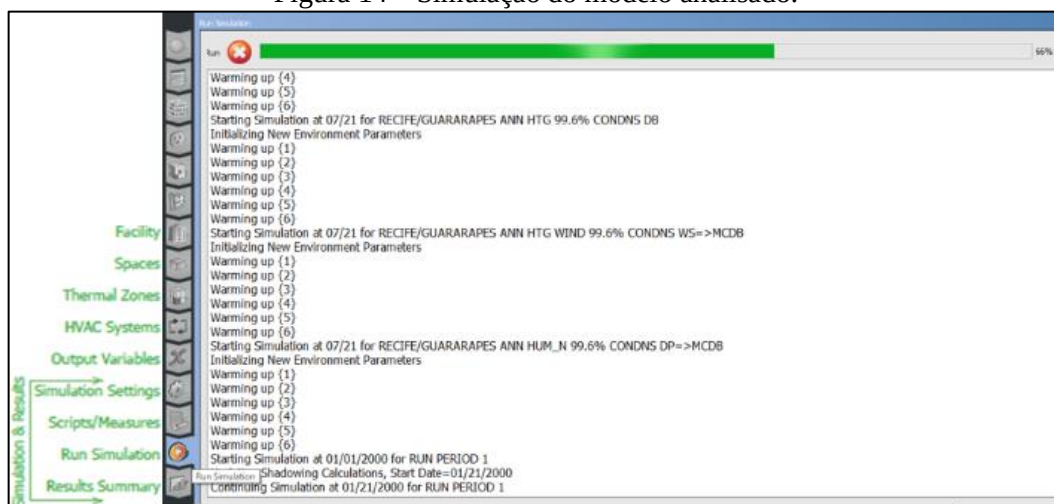
O EnergyPlus™ é gratuito, de código aberto e multiplataforma (é executado nos sistemas operacionais Windows, Mac OS X e Linux). Seu desenvolvimento é financiado pelo Departamento de Construção de Tecnologias (BTO) do Doe. Juntamente com o OpenStudio, o EnergyPlus faz parte do portfólio do programa de modelagem de energia de construção da BTO.

Para Crawley (2000) o EnergyPlus™ é uma ferramenta de simulação computacional de análise energética e simulação da carga térmica em edifícios que utiliza uma abordagem do tipo dinâmica no fenômeno de transferência de energia entre o edifício e o meio exterior, na qual o interior da habitação se encontra em constante interação com o meio exterior ao longo do período de simulação. Baseado na introdução de dados associados à geometria do edifício, soluções construtivas, sistemas mecânicos e outros, o programa estima as necessidades de aquecimento e arrefecimento, consumo de energia de equipamentos, fluxo de ar interior, e outros parâmetros de simulação desejados para avaliar a eficácia energética do edifício.

Na realização deste tipo de abordagem, o programa aplica ficheiros climáticos com a definição detalhada de parâmetros relacionados com o comportamento do meio ambiente local, temperatura exterior, umidade, radiação e orientação solar, entre outros.

Após ser feita a modelagem 3D e as configuração da simulação do edifício em estudo foram realizadas simulações das 8760h do ano para todos os arquivos climáticos disponíveis como mostrado na figura 14.

Figura 14 – Simulação do modelo analisado.



Fonte: O Autor (2020).

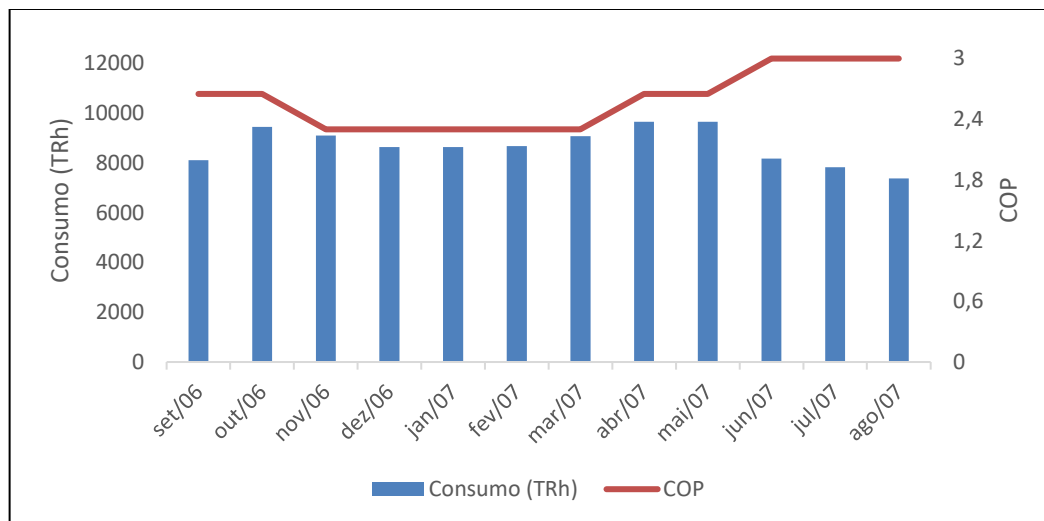
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados do trabalho. Entre os resultados, estão incluídos os gráficos, tabelas e as considerações relativas à medição da carga térmica, simulação do edifício, estudo dos arquivos climáticos e à análise paramétrica posteriormente realizada a partir do modelo de referência.

4.1 MEDIÇÃO DA CARGA TÉRMICA REAL

Os dados do monitoramento da carga térmica do edifício fornecidos por Macedo (2007) são apresentados mensalmente para o período de setembro de 2006 a agosto de 2007. Na figura 15, são demonstrados o consumo térmico do sistema de refrigeração obtido a partir das medições de temperatura do evaporador e da vazão de água gelada. Também é apresentado o valor do COP utilizado em cada mês, assim como o perfil mensal de consumo térmico do edifício.

Figura 15 – Gráfico do consumo anual real da carga térmica



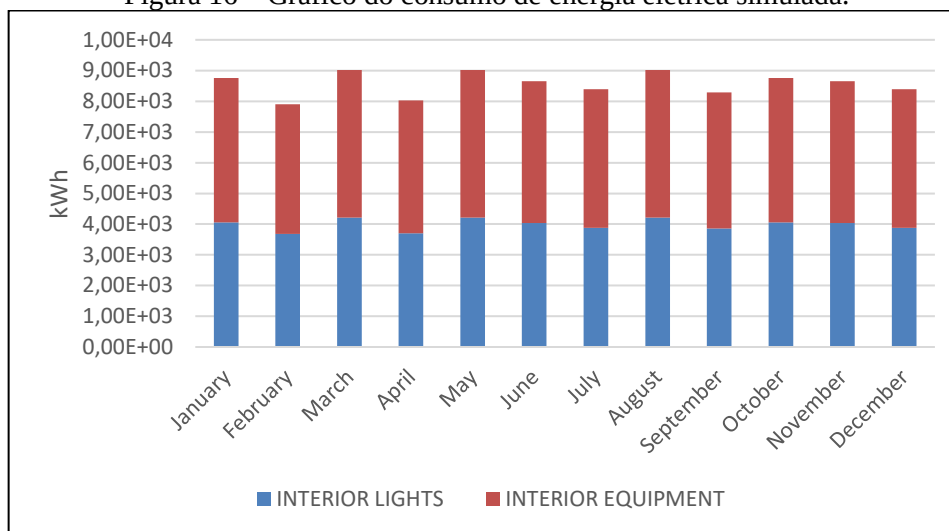
Fonte: Macedo (2007).

4.2 SIMULAÇÃO DO EDIFÍCIO

A partir dos dados adquiridos e das considerações feitas sobre o edifício foi possível realizar a modelagem e a simulação do mesmo. Os consumos elétricos mensais com iluminação e equipamentos internos são representados na figura 16, os mesmos serão iguais

para todas as simulações, pois todas apresentam a mesma densidade de carga interna. As diferenças no consumo de energia elétrica para cada mês simulado são dadas pelas variações das quantidades de dias e de finais de semana que cada mês possui.

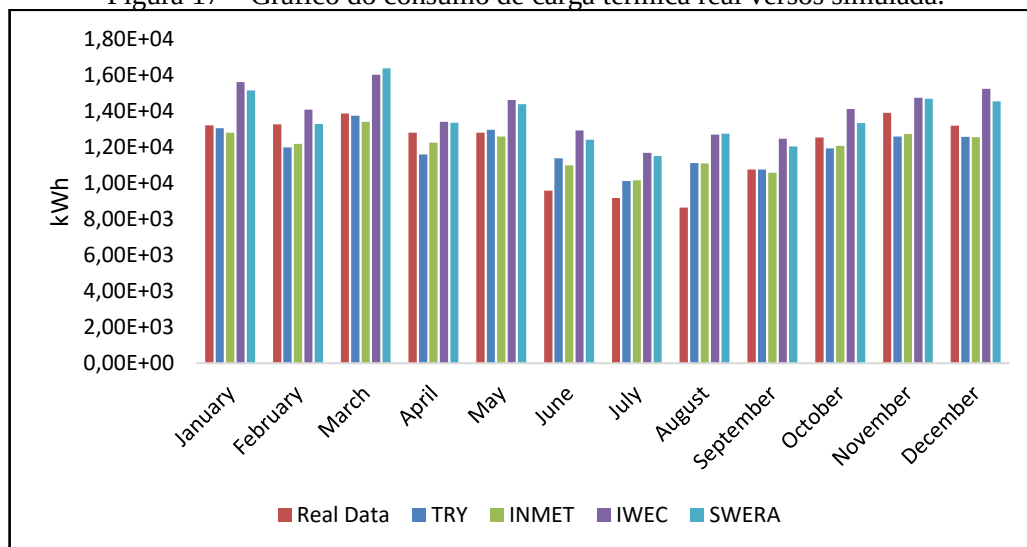
Figura 16 – Gráfico do consumo de energia elétrica simulada.



Fonte: O Autor (2020).

Para cada arquivo climático adotado, o modelo de referência foi avaliado por meio do consumo total de energia térmica (kWh). A comparação dos dados da simulação com o consumo real é apresentada na figura 17 para os quatro tipos de arquivos climáticos disponíveis na região (TRY, INMET, IWEC e SWERA).

Figura 17 – Gráfico do consumo de carga térmica real versus simulada.



Fonte: O Autor (2020).

Apesar de apresentar um erro percentual no consumo anual muito baixo (com o melhor valor de 0,05% para os dados TRY e o pior de 16,6% para os dados IWEC) os meses de junho, julho e agosto apresentaram erros elevados em todas as simulações variando de 10,39% a 47,4% dependendo do arquivo climático, tais divergências podem estar relacionadas com o fato de que os referidos meses representam períodos de férias, onde ocorreram mudanças no cronograma habitual de atividades do edifício. Também é interessante observar que os arquivos climáticos TRY e INMET, que são formados por dados medidos nos anos mais próximos aos da medição real, foram os que obtiveram as simulações que mais se aproximaram da carga térmica real.

Pode-se alegar que para região estudada no período em questão o arquivo climático TRY foi o que melhor se ajustou a simulação pois foi o que apresentou o melhor perfil de consumo anual e mensal apesar das divergências no trimestre citado. Tais resultados demonstram que o método de análise utilizado nesse trabalho é viável para simulações de eficiência energética mesmo utilizando uma metodologia de geometria simplificada para a modelagem do edifício.

A tabela 1 apresenta os picos de demanda térmica mensal e os dias associados as essas medições para cada arquivo climático citado, em relação a demanda de aquecimento todas as simulações apresentaram demandas irrisórias ou inexistentes.

Tabela 1 – Demandas e dias característicos dos picos mensais de refrigeração do edifício em W.

Month	INMET		IWECC	
January	58266,83	27-JAN-05:10	92806,87	04-JAN-05:10
February	59918,94	13-FEB-07:10	98884,04	27-FEB-05:10
March	58744,49	20-MAR-07:10	102865,2	27-MAR-05:10
April	59491,65	14-APR-07:10	94686,11	03-APR-05:10
May	57105,68	02-MAY-07:10	67688,65	19-MAY-05:10
June	58329,24	16-JUN-07:10	59420,35	09-JUN-07:10
July	55585,86	12-JUL-07:10	57484,58	06-JUL-07:10
August	52596,03	10-AUG-07:10	55196,07	03-AUG-12:00
September	53583,33	19-SEP-07:10	54851,34	27-SEP-13:00
October	52595,01	16-OCT-07:10	72657,73	23-OCT-05:10
November	57369,5	16-NOV-07:10	80787,02	06-NOV-05:10
December	69894,91	18-DEC-05:10	91067,79	14-DEC-05:10
Month	SWERA		TRY	
January	88446,62	23-JAN-05:10	67381,95	30-JAN-05:10
February	89256,96	27-FEB-05:10	71651,66	20-FEB-05:10
March	101027,4	06-MAR-05:10	83562,73	06-MAR-05:10
April	92089,65	07-APR-05:10	59108,57	04-APR-05:10
May	64588,52	03-MAY-07:10	70062,81	01-MAY-05:10
June	65565,01	13-JUN-13:00	54229,33	13-JUN-07:10
July	61753,93	18-JUL-15:20	54021,29	28-JUL-14:00
August	58873,06	16-AUG-07:10	49758,79	15-AUG-07:10
September	57507,36	15-SEP-07:10	51928,13	08-SEP-07:10
October	66001,51	02-OCT-05:10	55082,85	30-OCT-07:10
November	81065,52	06-NOV-05:10	57706,24	27-NOV-05:10
December	89412,06	11-DEC-05:10	63651,62	18-DEC-05:10

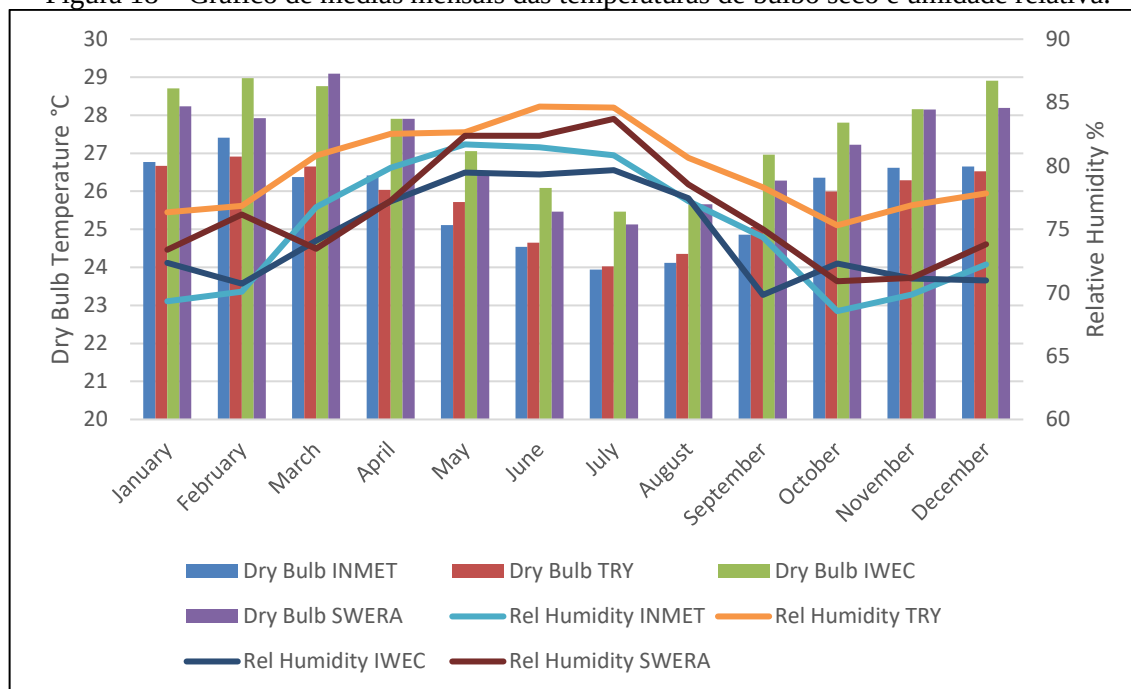
Fonte: O Autor (2020).

As demandas mínimas de refrigeração se encontram entre os meses de agosto e outubro em todas as simulações. A simulação com arquivo climático INMET foi a única que apresentou a demanda máxima no mês de dezembro, enquanto nas demais a mesma aparece no mês de março.

4.3 ANÁLISE TÉRMICA DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS

Uma análise adicional dos arquivos climáticos foi realizada através do software Climate Consultant 6.0 e permitiu verificar características específicas de cada ficheiro e analisar possíveis inconsistências nos dados. A Figura 18 apresenta os dados de médias mensais das temperaturas de bulbo seco e umidade relativa dos arquivos climáticos utilizados.

Figura 18 – Gráfico de médias mensais das temperaturas de bulbo seco e umidade relativa.

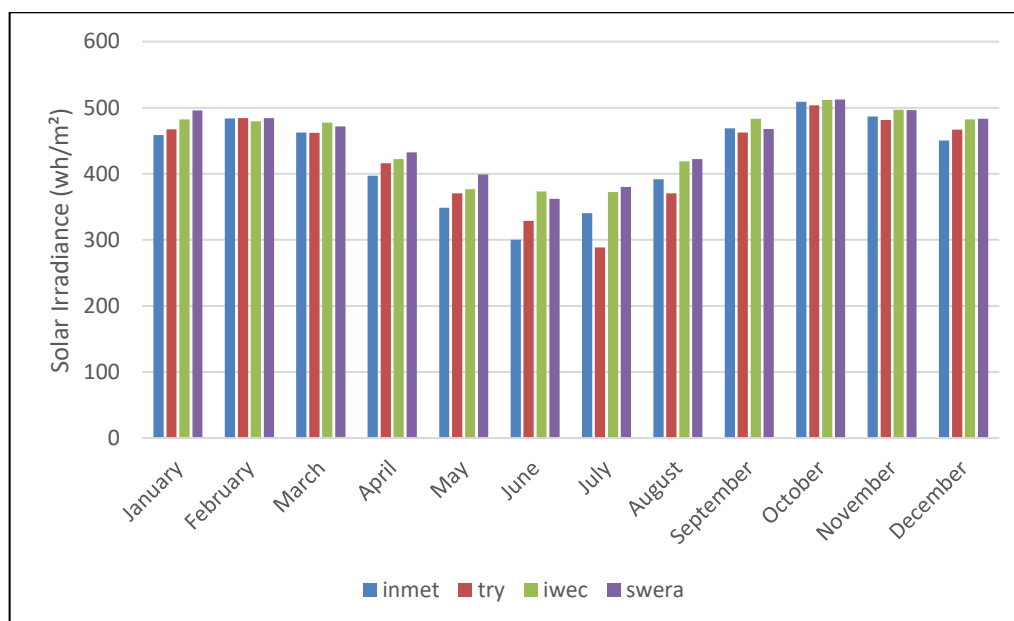


Fonte: O Autor (2020).

Os arquivos IWEK e SWERA apresentaram temperaturas mensais médias variando de 27,9°C a 29°C durante o verão (dezembro a março) e entre 25,1°C a 27°C durante o inverno (junho a setembro). Os arquivos TRY e INMET apresentaram temperaturas mensais médias variando de 26,3°C a 27,4°C durante o verão e entre 23,9°C a 24,6°C durante o inverno. A média mensal da umidade relativa do ar variou predominantemente entre 68,5% e 84,7% dependendo do arquivo climático adotado.

Também foram levantados dados sobre a irradiação solar mensal presente nos arquivos climáticos adotados, como mostrado na figura 19.

Figura 19 – Gráfico da irradiação solar mensal dos arquivos climáticos.



Fonte: O Autor (2020).

Os dados levantados desta forma possibilitam compreender a magnitude das diferenças de temperatura e umidade entre os arquivos climáticos, assim como o perfil de irradiação solar para cada arquivo analisado. Através de um cálculo utilizando o coeficiente de correlação de Pearson, foi possível entender a relação entre as variáveis climáticas analisadas. O estudo mostrou que a carga térmica é diretamente proporcional as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido com uma taxa média de correlação de 81,5% entre os arquivos climáticos. Também foi observado uma taxa média de correlação de 92,4% entre os dados de umidade e radiação solar. Com isso, pode-se determinar que o perfil de temperatura dos arquivos climáticos se assemelha ao perfil do consumo de carga térmica.

4.4 ANÁLISE PARAMETRICA

O edifício estudado tem uma alta demanda de refrigeração de ambientes em comparação com outras construções convencionais e a importância relativa de parâmetros como zonas térmicas, iluminação, orientação solar e materiais da estrutura são ainda mais importantes se a construção deve funcionar como planejado. Uma análise paramétrica foi incluída para estudar como esses diferentes componentes no balanço energético afetam a simulação em termos de ganhos de carga térmica.

Para análise das variáveis influentes na simulação os seguintes procedimentos foram adotados:

- a) Foram feitas simulações com variação dos arquivos climáticos da região em estudo (INMET, IWEC, SWERA e TRY);
- b) Segundo a (NBR 5413, 1992), a iluminância em um ambiente de escritórios pode variar de 500 a 1000 lux. Esse parâmetro foi utilizado para conhecer o efeito da variação da luminosidade na simulação da carga térmica do edifício estudado;
- c) Foram realizadas simulações rotacionando o edifício de 0 a 180° em relação ao eixo norte. Parâmetro utilizado para conhecer o efeito do posicionamento do edifício na simulação da carga térmica;
- d) As configurações de parede utilizadas para determinar a influência do tipo de material na carga térmica do sistema foram: Drywall, Steel Framed, Wood Framed, alvenaria convencional de blocos de cerâmica e alvenaria estrutural de blocos de concreto.

4.4.1 Arquivos Climáticos

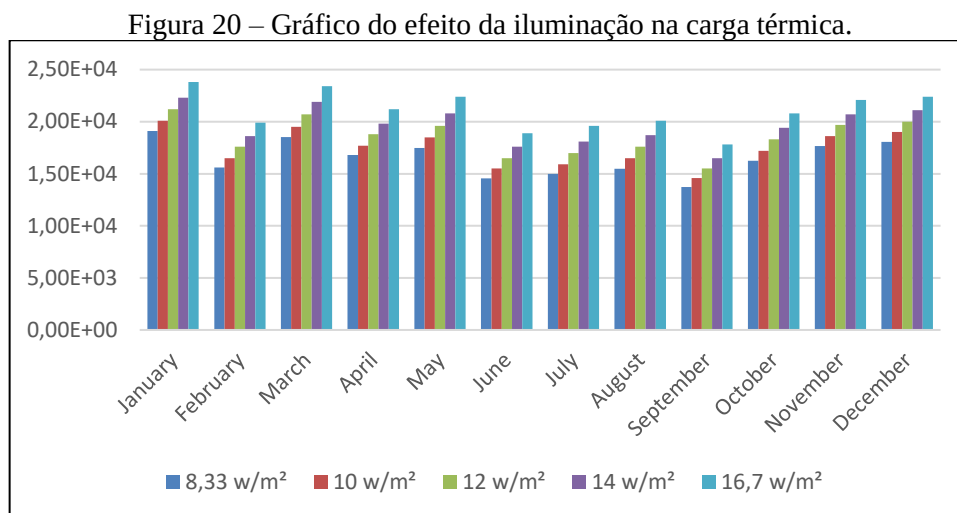
A figura 17 demonstra o consumo térmico anual por tipo de arquivo climático. Pode-se observar que o consumo térmico anual varia em até 14,43% com a mudança de arquivo climático, os dados apresentam um coeficiente de variação entre 7% e 10,4% dependendo do mês selecionado. Vale ressaltar que os dados TRY e INMET se assemelham entre si no perfil de consumo da mesma forma que os dados IWEC e SWERA, com uma diferença média de aproximadamente $1,65 \times 10^3$ kWh entre os meses.

Por apresentarem diferenças nos métodos de tratamento dos dados, anos e locais de medições, a mudança do arquivo climático varia na carga térmica de acordo com o tipo utilizado, mesmo que a região em estudo seja a mesma. Recomenda-se utilizar numa simulação arquivos atualizados da estação meteorológica mais próxima do local em estudo ou de uma região com clima similar a mesma.

4.4.2 Iluminância

A figura 20 demonstra o consumo térmico com a variação da iluminância no ambiente. Pode-se observar que o consumo térmico varia linearmente com o aumento da iluminância podendo variar em até 21,5% entre os limites pré-estabelecidos pela norma, os dados apresentam um coeficiente de variação entre 8,5 e 10,6% dependendo do mês

selecionado. É importante observar que as parcelas não variam com a mudança climática, só com o aumento da carga térmica interna causada pelo consumo dos equipamentos.



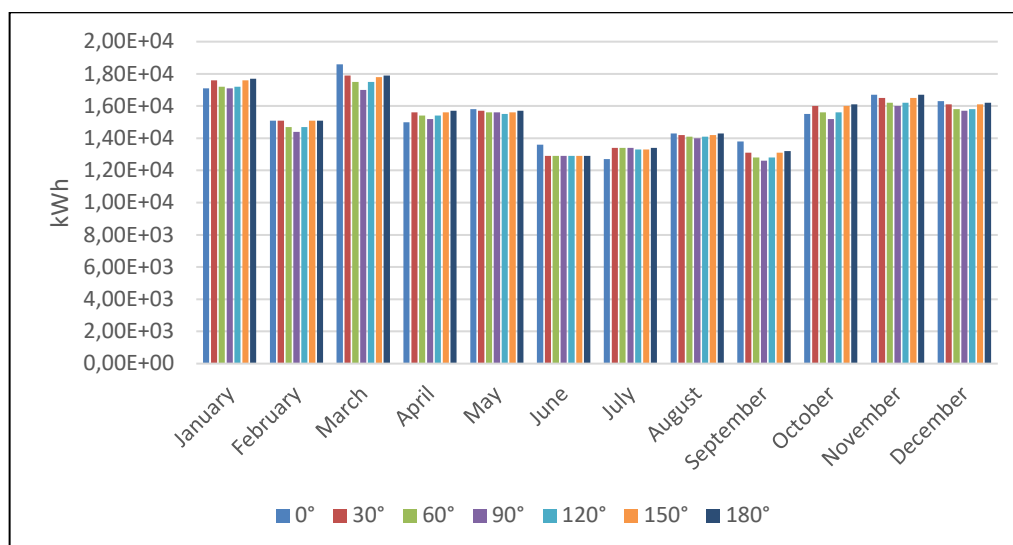
Fonte: O Autor (2020).

Vale ressaltar que as simulações de iluminância foram feitas considerando lâmpadas fluorescentes, essa parcela pode mudar de acordo com o tipo de luz utilizada no projeto. O aumento de energia para a iluminação artificial causa uma variação da carga térmica devido a maior quantidade de calor gerada dentro do ambiente em razão do aumento de uso de equipamentos de iluminação.

4.4.3 Orientação Solar

A figura 21 demonstra o consumo térmico com a rotação o edifício de 0 a 180° em relação ao eixo norte. Pode-se observar que o consumo térmico pode variar cerca de 3,2% com a mudança da posição do edifício, os dados apresentam um coeficiente de variação entre 0,62 e 3% dependendo do mês selecionado. É interessante observar que os meses de março e setembro foram os que mais apresentaram variações na carga térmica com a rotação do edifício enquanto os meses de maio, junho, julho e agosto apresentaram um perfil de consumo similar independente do ângulo adotado.

Figura 21 – Efeito da orientação solar na carga térmica.



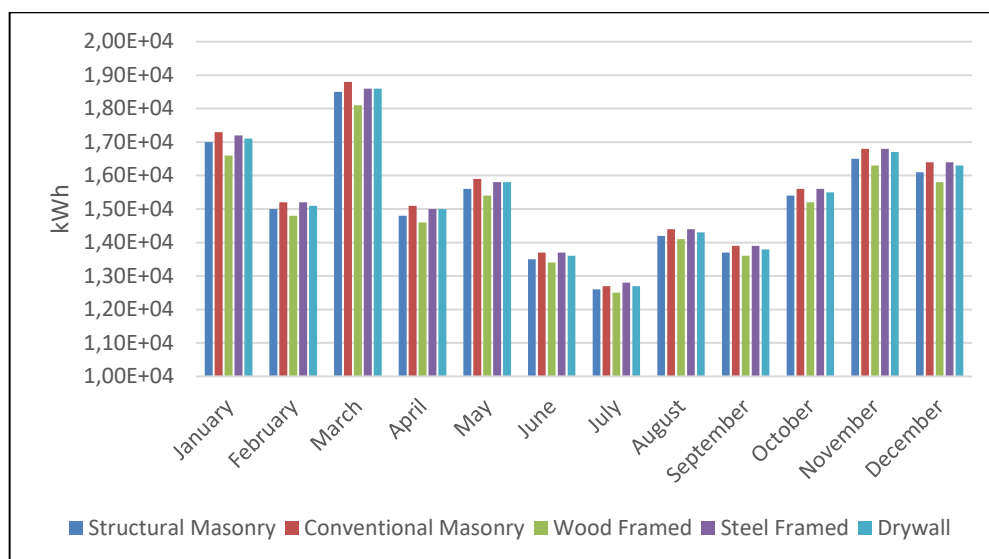
Fonte: O Autor (2020).

O posicionamento da edificação a 90° foi o que apresentou os menores resultados de consumo anual enquanto a 180° apresentou os maiores. O edifício em estudo possui um modelo arquitetônico simétrico em suas fachadas, o que justifica a baixa mudança no consumo da carga térmica com a variação da sua orientação solar. O controle da radiação solar incide é obtida através da adoção correta da orientação, do dimensionamento das fachadas, da vegetação, da disposição dos elementos de proteção, dentre outros parâmetros. Ressalta-se que, para optar pelo controle adequado, deve-se conhecer a radiação incidente em cada plano externo da edificação.

4.4.4 Materiais Construtivos

A figura 22 demonstra o consumo térmico da edificação com a variação dos materiais construtivos das paredes. Pode-se observar que o consumo térmico pode variar até cerca de 3% com a mudança do material construtivo do edifício, os dados apresentam um coeficiente de variação entre 0,9 e 1,59% dependendo do mês selecionado. Os meses de janeiro e dezembro foram o que apresentaram as maiores variações com as mudanças construtivas enquanto os meses de julho e agosto apresentaram as menores.

Figura 22 – Efeito dos materiais construtivos na carga térmica.



Fonte: O Autor (2020).

Apesar de não apresentarem mudanças significativas no consumo da carga térmica, dentre os materiais construtivos mais utilizados no Brasil o wood framed foi o que apresentou melhores resultados para esse quesito. Vale ressaltar que as simulações feitas consideraram as mesmas condições climáticas para todos os materiais, o que justifica o fato de todos os materiais apresentarem um perfil de consumo similar ao longo dos meses.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As simulações realizadas com o objetivo de comparar a carga térmica real com os dados simulados se demonstraram eficazes quando os valores de consumo anuais foram conferidos com os reais. Foi observado que os arquivos climáticos que mais se adequaram as simulações foram os que eram formados por anos mais próximos aos anos que ocorreram a medição. Vale observar também que o perfil de carga térmica se assemelha ao perfil de temperaturas, como demonstrou a análise térmica dos arquivos climáticos.

A análise paramétrica demonstrou a influência de uma série de variáveis nas simulações. Em um modelo de referência para um consumo mínimo de energia podemos afirmar que a configuração de edificação que consumiria a menor carga térmica seria: Iluminância mínima de 500 lux, Orientação solar a 90° e wood framed como material construtivo.

5 CONCLUSÃO

Esse projeto foi desenvolvido com o intuito de ampliar a discussão sobre a utilização de simulação computacional para previsão da demanda de carga térmica em edifícios de escritórios. Para tanto, foi necessário realizar uma modelagem computacional de uma edificação já existente a fim de comparar os dados de consumo real com os simulados. Também foi realizado um estudo térmico dos arquivos climáticos disponíveis na região além de uma revisão bibliográfica e um estudo paramétrico com foco em identificar e estudar os efeitos de certas variáveis de entrada nos resultados das simulações.

A metodologia de simulação utilizada se mostrou adequada para prever o comportamento térmico de um edifício na região de Recife, além de demonstrar que a abordagem de simplificação da modelagem de zonas térmicas em geometrias simples pode ser utilizada em simulações energéticas com um bom índice de resultados (0,05% de erro percentual no melhor caso e 16,6% no pior). É importante ressaltar que os resultados obtidos e conclusões estão relacionados a uma tipologia de edificações de escritórios. Adotando as mesmas medidas definidas nesse trabalho, os consumos de outras tipologias podem apresentar uma tendência diferente.

Com a análise dos arquivos climáticos foi possível observar que as simulações que mais se aproximaram carga térmica real foram a que utilizavam arquivos climáticos de anos próximos ao ano de coleta. Também foi possível concluir que o perfil de temperaturas é semelhante ao da carga térmica com uma correlação de 81,5%, da mesma forma pode-se observar uma correlação de 92,4% entre os dados de umidade relativa e radiação solar.

Através de uma revisão da literatura foi possível encontrar uma certa quantidade de parâmetros que são influentes na simulação de carga térmica. Uma análise paramétrica de alguns desses parâmetros demonstrou os seguintes resultados:

- a) A mudança de arquivos climáticos foi a que apresentou a maior variação entre os dados (até 10,4%) e a segunda maior no consumo energia térmica (até 14,43%).
- b) A iluminância é o fator que mais influência na carga térmica dentre os parâmetros analisados (até 21,5%), apesar de ser um fator que não depende do clima só do consumo interno do edifício.
- c) A orientação solar e os materiais da construtivos foram os fatores que obtiveram menor variação no consumo térmico (3,2 e 3% respectivamente), sendo que o wood framed foi o material que apresentou os menores resultados nesse quesito.

Através dos resultados obtidos ficou clara a importância da avaliação do desempenho térmico de uma edificação no que se refere a pós-construção da habitação, a fase de ocupação e utilização. As edificações devem ser projetadas não somente pensando na energia que será despendida para construir aquele empreendimento, mas principalmente o quanto de energia será consumido após a construção.

5.1 CONTRIBUIÇÕES PARA A SOCIEDADE

Ao usar este documento, vários usuários e pesquisadores acadêmicos podem utilizar dessa mesma metodologia para seu próprio trabalho; Proprietários e gerentes de edifícios podem selecionar fontes de dados para benchmarking e usar os casos existentes como referência; Os modeladores de energia podem seguir a pesquisa mencionada neste documento para prever o consumo de energia nos edifícios de escritório no Brasil; Os desenvolvedores de produtos podem usar essas diretrizes para avaliar o potencial do mercado; Os formuladores de políticas podem atualizar e validar os padrões de energia em edifícios usando fontes de dados simulados e os softwares relacionados mencionados pelo documento como base.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros, outros parâmetros podem ser analisados como o tamanho e o material das janelas, infiltração, influência do bairro urbano, velocidade do vento, geometria construtiva, tipo de iluminação, etc. Por outro lado, também seria interessante o estudo de outros tipos de construção (habitacionais, comerciais, industriais) para conhecer até que dimensão é viável a modelagem através da simplificação da geometria do edifício, além de incluir uma análise de custo econômico ou o período de retorno do investimento relacionado ao uso de energias renováveis, variação de material da envoltória ou substituição de vidros.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Brasília: ANEEL, 2012. p. 50.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5413** - Iluminância de interiores. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220** - Desempenho térmico de edificações parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- A.Boccalatte, M.Fossa, L.Gaillardb, & C.Menezob. (2020). Microclimate and urban morphology effects on building energy demand in different European cities. *Energy and Buildings*, 224. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110129>
- Anderson, B., Lin, S., Newing, A., Bahaj, A., & James, P. (2017). Electricity consumption and household characteristics: Implications for census-taking in a smart metered future. *Computers, Environment and Urban Systems*, 63(58-67). Fonte: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.06.003>
- Anderson, J. E., Wulforst, G., & Lang, W. (2015). Energy analysis of the built environment—A review and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44(149-158). doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.027>
- ANEEL. (2012). *Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012*.
- ASHRAE. (2017). *Fundamental Handbook*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2017). *Handbook - Fundamentals*. Georgia.
- ASHRAE. (2019). *90.1 - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*. Atlanta.
- ASHRAE, S. 1. (2013). *Climatic Data for Building Design Standards*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- AYOADE, J. (1996). *Introdução a climatologia para os trópicos*. (4 ed.). (M. J. Santos, Trad.) São Paulo: DIFEL.
- BARBOSA, K. H. (2017). *Avaliação Da Influência Da Orientação Solar, Associada Ao Comportamento Do Usuário, No Desempenho Térmico De Uma Tipologia De Residência Unifamiliar Em Goiânia*. Florianópolis.

- Bazjanac, V. (2010). *Space boundary requirements for modeling of building geometry for energy and other performance simulations*. Lawrence Berkeley National Laboratory. Fonte: <http://www.e3lab.org/upl/website/publication11111/spaceboundary.pdf>
- BEN. (2019). *BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL*. Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro. Fonte: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>
- Chung, W. (2011). Review of building energy-use performance benchmarking methodologies. *Applied Energy*, 88(1470-1479). Fonte: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.022>
- Clarke, J. A. (2001). *Energy Simulation in Building Design* (Vol. 2). Scotland, Reino Unido.
- Costa, F. S. (2012). Desempenho energético de edifícios residenciais no contexto da regulamentação térmica com recurso ao Energy Plus e TRNSYS. Fonte: <https://run.unl.pt/handle/10362/7021>
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Pedersen, C. O., & Winkelmann, F. C. (2000). EnergyPlus: Energy Simulation Program. *ASHRAE JOURNAL*. Fonte: https://www.researchgate.net/profile/Drury_Crawley/publication/230606369_EnergyPlus_Energy_Simulation_Program/links/56f03dad08ae0dcdafd6a68b/EnergyPlus-Energy-Simulation-Program
- Dalong, L., Wenqin, W., & Jiaping, L. (2017). Sensitivity Analysis of Meteorological Parameters on Building Energy Consumption. *Energy Procedia*, 132(634-639). doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.700>
- DOE. (2008). *Energy Efficiency Trends in Residential and Commercial Buildings*. Department of Energy.
- Dorigo, A. L., Pinto, C. L., & Santos, C. B. (2010). Utilização de fontes renováveis de energia no campus da Universidade Tuiuti. *Universidade Tuiuti do Paraná*. Fonte: http://a3p.mma.gov.br/wp-content/uploads/Biblioteca/Artigos/Documentos/Revista-UTP-n42-art_12.pdf
- EIA. (2018). *Annual Energy Outlook, With Projections to 2050*. Government Printing Office, Washington, D.C. Fonte: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2018.pdf>
- Federspiel, C., Zhang, Q., & Arens, E. (2002). Model-based benchmarking with application to laboratory buildings. *Energy and Buildings*, 34(203-214). Fonte: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00092-5)
- Forkaides, P. A., Maxoulis, C. N., Panayiotou, G. P., Neophytou, M. K., & Kalogirou, S. A. (2011). Comparison between measured and calculated energy performance for

- dwellings in a summer dominant environment. *Energy and Buildings*, 43(3099-3105). doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.005>
- Freitas, L. A. (2016). *Estudo Energético e Econômico de Sistemas Térmicos de Fornecimento de Eletricidade e Água Gelada: o Caso dos Shopping Centers de Pernambuco*. Recife, Brasil.
- Gasprede, J. L., Masada, G. Y., & Moon, T. J. (2014). A Simulink-Based Building Load-Ground Source Heat Pump Model Used to Assess Short-and Long-Term Heat Pump and Ground Loop Performance. *J. Thermal Sci. Eng. Appl.*
- GBC, B. (2018). <https://www.gbcbrasil.org.br/brasil-ocupa-o-4o-lugar-no-ranking-mundial-de-construcoes-sustentaveis-certificadas-pela-ferramenta-internacional-leed/>. Fonte: <https://www.gbcbrasil.org.br/>.
- Heidarinejad, M., Mattise, N., Dahlhausen, M., Sharma, K., Benne, K., Macumber, D., . . . Srebric, J. (2017). Demonstration of reduced-order urban scale building energy models. *Energy and Buildings*, 156(17-28). doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.086>
- Heidarinejad, M., Mattise, N., Sharma, K., & Srebric, J. (2017). Creating Geometry with Basic Shape Templates in OpenStudio. *Procedia Engineering*.
- Heinonen, J., & Junnila, S. (2014). Residential energy consumption patterns and the overall housing energy requirements of urban and rural households in Finland. *Energy and Buildings*, 76(295-303). Fonte: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.079>
- IEA. (2019). *Atlas de Eficiência Energética*.
- IEA. (2020). *World Energy Outlook 2020*. IEA, Paris. Fonte: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
- INMETRO. (2012). *Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais*. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Rio de Janeiro.
- INMETRO². (2012). *Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos*. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Rio de Janeiro.
- IPCC. (2015). *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change Summary for Policymakers and Technical Summary*. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Acesso em 24 de 05 de 2020, disponível em <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>

- Jentsch, M. F., Bahaj, A. S., & James, P. A. (2008). Climate change future proofing of buildings—Generation and assessment of. *Energy and Buildings*, 40(2148-2168). doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.005>
- Jradi, M., Veje, C., & Jørgensen, B. (2018). A dynamic energy performance-driven approach for assessment of buildings energy Renovation—Danish case studies. *Energy and Buildings*, 158. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.094>
- KiranKumar, G., Saboor, S., & Babu, T. P. (2017). Thermal Analysis of Wall and Window Glass Materials for Cooling Load Reduction in Green Energy Building Design. *Materialstoday: Proceedings*, 9514–9518(4). Fonte: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.215>
- Lamberts, R., Dutra, L., & Pereira, F. O. (1997). *Eficiência Energética na Arquitetura* (3 ed.). São Paulo.
- Levy, S. M. (2009). *Construction Process Planning and Management: An Owner's Guide to Successful Projects*. Butterworth-Heinemann. doi:<https://doi.org/10.1016/C2009-0-19302-9>
- Macedo, N. G. (2007). *Avaliação Econômica da Substituição de um Chiller de Compressão por um Chiller de Absorção Alimentado por Coletores Solares com Base em Medições de um Prédio da Chesf em Recife*. Recife, Brasil.
- Maps, G. (30 de 10 de 2020). *Google Maps*. Fonte: <https://goo.gl/maps/L2eJ1ZKDHcWYibm66>
- Mazzaferro, L. (2015). *ANÁLISE DAS RECOMENDAÇÕES DA ASHRAE STANDARD 90.1 PARA A ENVOLTÓRIA DE EDIFICAÇÕES COMERCIAIS*. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL, Florianópolis.
- Mohamad, G. (2015). *Construções em Alvenaria Estrutural – Materiais, projeto e desempenho*. São Paulo: Edgard Blucher Ltda.
- Molin, A., Rohdin, P., & Moshfegh, B. (2011). Investigation of energy performance of newly built low-energy buildings in Sweden. *Energy and Buildings*, 43(2822-2831). doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.041>
- NBR 15220, A. (2003). *Desempenho térmico de edificações parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social*. Rio de Janeiro.
- NBR 5413, A. (1992). *Iluminância de interiores*. Rio de Janeiro.

- Newsham, G. R., Mancini, S., & Birt, B. J. (2009). Do LEED-certified buildings save energy? Yes, but... *Energy and Buildings*, 41(897-905). Fonte: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.03.014>
- Nik-Bakht, M., Panizza, R. O., Hudon, P., Chassain, P.-Y., & Bashari, M. (2020). Economy-energy trade off automation – A decision support system for building design development. *Journal of Building Engineering*, 30. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobee.2020.101222>
- Nunes, H. P. (2015). *ESTUDO DA APLICAÇÃO DO DRYWALL EM EDIFICAÇÃO VERTICAL*. Paraná.
- Ourghi, R., Al-Anzi, A., & Krarti, M. (2007). A simplified analysis method to predict the impact of shape on annual energy use for office buildings. *Energy Conversion and Management*, 48(300-305). doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.04.011>
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and buildings*, 40(394-398). Fonte: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Ramalho, M., & Corrêa, M. (2003). *Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural* (1 ed.). São Paulo: Pini.
- Roth, A., Goldwasser, D., & Parker, A. (2016). There's a measure for that! *Energy and Buildings*, 117(321–331). doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.056>
- Sakami, N., Boukhattem, L., Hamdi, H., & Benhamou, B. (2019). Soil Thermal Inertia Effect on Shallow Basement Energy Performance in Different Morocco Climates. *J. Thermal Sci. Eng. Appl.*
- Scofield, J. H. (2009). Do LEED-certified buildings save energy? Not really... *Energy and Buildings*, 41(1386–1390). Fonte: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.006>
- Shiel, P., Tarantino, S., & Fischer, M. (2018). Parametric Analysis of Design Stage Building Energy Performance Simulation Models. *Energy and Buildings*. doi:10.1016/j.enbuild.2018.04.045
- Specht, L. P., Borges, P. A., Rupp, R. F., & Varnier, R. (2010). Análise da transferência de calor em paredes compostas por diferentes materiais. *Ambiente Construído*, 10. Fonte: <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212010000400002>
- Turner, C., & Frankel, M. (2008). Energy Performance of LEED® for New Construction Buildings. *New Buildings Institute*, 46.

- Valdivia, J. D. (2019). *Análise computacional da automação das temperaturas de água gelada, de água de condensação e ar de insuflação em um edifício comercial*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Wilde, P. d. (2014). The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation. *Automation in Construction*, 41(40-49). doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.009>
- Ye, Y., Zuo, W., & Wang, G. (2019). A comprehensive review of energy-related data for U.S. commercial buildings. *Energy and Buildings*, 186(126-137). doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.020>

APÊNDICE A – MEDIÇÃO E RESULTADOS DA ANÁLISE PARAMÉTRICA

Seguem tabelas resumindo o consumo real do edifício em estudo e os resultados das simulações da análise paramétrica.

Tabela 5-1 – Consumo de energia térmica real.

MEDIÇÃO			
Mês	Consumo (TRh)	COP	Consumo/COP (kWh)
jan/07	8635	2,3	13203,48
fev/07	8672	2,3	13260,05
mar/07	9069	2,3	13867,09
abr/07	9652	2,7	12809,30
mai/07	9644	2,7	12798,68
jun/07	8169	3,0	9576,38
jul/07	7823	3,0	9170,77
ago/07	7374	3,0	8644,42
set/06	8111	2,7	10764,22
out/06	9444	2,7	12533,26
nov/06	9094	2,3	13905,32
dez/06	8631	2,3	13197,36
TOTAL	104318		143730,33

Fonte: Macedo (2007).

Tabela 5-2 – Consumo de energia térmica por arquivo climático em kWh.

Month	TRY	INMET	IWEC	SWERA
January	13000	12800	15600	15100
February	12000	12200	14100	13300
March	13700	13400	16000	16400
April	11600	12300	13400	13400
May	13000	12600	14600	14400
June	11400	11000	12900	12400
July	10100	10200	11700	11500
August	11100	11100	12700	12700
September	10800	10600	12500	12000
October	11900	12100	14100	13300
November	12600	12700	14700	14700
December	12600	12500	15200	14500
Annual Consumption	144000	143000	168000	164000

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 5-3 – Consumo de energia térmica de acordo com a intensidade luminosa.

Month	8,33 w/m ²	10 w/m ²	12 w/m ²	14 w/m ²	16,7 w/m ²
January	19099,02	20100,00	21200,00	22300,00	23800,00
February	15615,40	16500,00	17600,00	18600,00	19900,00
March	18533,35	19500,00	20700,00	21900,00	23400,00
April	16795,51	17700,00	18800,00	19800,00	21200,00
May	17470,51	18500,00	19600,00	20800,00	22400,00
June	14562,04	15500,00	16500,00	17600,00	18900,00
July	14985,40	15900,00	17000,00	18100,00	19600,00
August	15490,65	16500,00	17600,00	18700,00	20100,00
September	13711,93	14600,00	15500,00	16500,00	17800,00
October	16241,62	17200,00	18300,00	19400,00	20800,00
November	17656,99	18600,00	19700,00	20700,00	22100,00
December	18061,04	19000,00	20000,00	21100,00	22400,00
Annual Consumption	198223,49	209000,00	223000,00	235000,00	252000,00

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 5-4 – Consumo de energia térmica de acordo com a rotação solar em kWh.

Month	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
January	17100	17600	17200	17100	17200	17600	17700
February	15100	15100	14700	14400	14700	15100	15100
March	18600	17900	17500	17000	17500	17800	17900
April	15000	15600	15400	15200	15400	15600	15700
May	15800	15700	15600	15600	15500	15600	15700
June	13600	12900	12900	12900	12900	12900	12900
July	12700	13400	13400	13400	13300	13300	13400
August	14300	14200	14100	14000	14100	14200	14300
September	13800	13100	12800	12600	12800	13100	13200
October	15500	16000	15600	15200	15600	16000	16100
November	16700	16500	16200	16000	16200	16500	16700
December	16300	16100	15800	15700	15800	16100	16200
Annual Consumption	184000	184000	181000	179000	181000	184000	185000

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 5-5 – Consumo de energia térmica de acordo com o material construtivo em kWh.

Month	Structural Masonry	Conventional Masonry	Wood Framed	Steel Framed	Drywall
January	17000	17300	16600	17200	17100
February	15000	15200	14800	15200	15100
March	18500	18800	18100	18600	18600
April	14800	15100	14600	15000	15000
May	15600	15900	15400	15800	15800
June	13500	13700	13400	13700	13600
July	12600	12700	12500	12800	12700
August	14200	14400	14100	14400	14300
September	13700	13900	13600	13900	13800
October	15400	15600	15200	15600	15500
November	16500	16800	16300	16800	16700
December	16100	16400	15800	16400	16300
Annual Consumption	183000	186000	180000	185000	184000

Fonte: O Autor (2020).