



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Jakeline Osowski Tomazi

**Calibração de um modelo de simulação de um Shopping Center pelo método baseado
em evidências**

Florianópolis
2023

Jakeline Osowski Tomazi

**Calibração de um modelo de simulação de um Shopping Center pelo método baseado
em evidências**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Ana Paula Melo, Dra.

Coorientador: Prof. Alberto Hernandez Neto, Dr.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Tomazi, Jakeline Osowski
Calibração de um modelo de simulação de um Shopping
Center pelo método baseado em evidências / Jakeline
Osowski Tomazi ; orientadora, Ana Paula Melo,
coorientador, Alberto Hernandez Neto, 2023.
104 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Calibração. 3. Método baseado em
evidências. 4. EnergyPlus. 5. Shopping Center. I. Melo,
Ana Paula. II. Neto, Alberto Hernandez. III. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. IV. Título.

Jakeline Osowski Tomazi

Calibração de um modelo de simulação de um Shopping Center pelo método baseado em evidências

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 04 de julho de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof^a. Fernanda Fernandes Marchiori, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Paulo Smith Schneider, Dr.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil.

Prof^a. Fernanda Fernandes Marchiori
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof^a. Ana Paula Melo, Dra
Orientadora

Florianópolis, 2023.

AGRADECIMENTOS

Há tantos agradecimentos à diversas pessoas que me ajudaram ao longo do processo e tornaram esta pesquisa possível que se torna um trabalho árduo colocar todos eles em palavras. Posso começar pela minha família, que não mediu esforços e abraçou a causa comigo. Tantos almoços e dias que foram deixados de lado para que, enfim, chegasse esse momento. E vocês compreenderam, me apoiaram e incentivaram.

Agradeço ao meu namorado, Augusto, que foi o meu maior trampolim, minha base e norte. Me escutou quando precisei e colaborou com a sua bagagem empírica, guiando e me ajudando com muito amor e carinho.

Não poderia deixar de citar os amigos, aqueles envolvidos na academia, aqueles com outros rumos profissionais. Saibam que eu escutei e escuto cada conselho, mas o que me impressiona é a torcida. Talvez vocês acreditassem mais em mim do que eu mesma e, isso me fazia questionar: se eles acreditam tanto em mim, acho que eu consigo mesmo.

Agradeço a toda a equipe do shopping center da pesquisa em questão. A abertura de vocês, atenção e paciência foram fundamentais para o desenvolvimento e finalização do trabalho.

Agradeço também aos professores, em especial a minha orientadora, Professora Ana Paula Melo, meu coorientador, Alberto Hernandez, o fundador do LabEEE, Roberto Lamberts, e meu guia de longa data, Paulo Schneider, vocês são excelentes. Que orgulho e privilégio eu tenho em conviver e aprender tanto com vocês.

Agradeço, por fim, ao programa de Pós Graduação da UFSC que reúne professores excepcionais e possui uma pós graduação de alta qualidade, apesar de todas as barreiras enfrentadas no ensino público. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.” (Albert Einstein)

RESUMO

A calibração de modelos de simulação energética é um tema em expansão, especialmente considerando a crescente demanda por análises de eficiência energética de origem pública ou privada. Este fato também está atrelado a participação das edificações no consumo energético global final, que hoje representa mais de um terço do total global. Este ponto justifica a necessidade de não só obter um modelo de simulação em si, mas que ele esteja calibrado. De forma que, simular uma edificação em um programa de análise termoeenergética não garante que os resultados estejam próximos do caso real. Portanto, a análise de retrofit, eficiência energética ou dos impactos de componentes na edificação deve ser realizada com um modelo calibrado, que se aproxime do modelo real. Existem diferentes metodologias para calibrar um modelo termoeenergético de uma edificação. Este estudo tem como objetivo a calibração de um shopping center real a partir de seus dados medidos, observados e projetados. O método utilizado foi o baseado em evidências, no qual cria-se uma hierarquia dos parâmetros coletados com base na confiabilidade e na ordem de influência. Além da utilização dos dados disponibilizados documentalmente e da visita in loco, os dados meteorológicos correspondentes ao período de coleta foram empregados neste estudo. O modelo final foi validado utilizando a ASHRAE Guideline 14 e obteve um erro de viés médio (MBE) de -3% e um coeficiente de variação da raiz quadrada média do erro (CVRMSE) de 9%, indicando que o modelo estava calibrado. Embora ainda haja uma diferença entre os valores medidos e simulados, principalmente quando se é feita uma análise com base horária, o modelo final representou a edificação com um alto nível de detalhe, por meio de diversos parâmetros de entrada, permitindo sua utilização na avaliação de medidas de eficiência energética e retrofits para essa e demais edificações com a mesma tipologia.

Palavras-chave: Calibração; Método baseado em evidências; EnergyPlus; Shopping Center.

ABSTRACT

The calibration of energy simulation models is a growing topic that is gaining prominence as energy efficiency analyses become more necessary. The need is related to the fact that more than one-third of global energy consumption is directed towards buildings. Calibration of energy simulation models is an expanding topic, especially considering the growing demand for energy efficiency analysis. This fact is also linked to the share of the final global energy consumption of buildings, which today represents more than a third of the global total. This point justifies the need to not only obtain a simulation model itself, but that it be calibrated. So, simulating a building in a thermoenergetic analysis program does not guarantee that the results are close to the real case. Therefore, the analysis of retrofit, energy efficiency or the impact of components on the building must be performed with a calibrated model, which is close to the real model. There are different methodologies to calibrate a thermoenergetic model of a building. This study aims to calibrate a real shopping center based on its measured, observed and projected data. The method used was evidence-based, in which a hierarchy of collected parameters is created based on reliability and order of influence. In addition to the use of data available in documents and the on-site visit, meteorological data corresponding to the collection period were used in this study. The final model was validated using the ASHRAE Guideline 14 and obtained a mean bias error (MBE) of -3% and a root mean square error coefficient of variation (CVRMSE) of 9%, indicating that the model was calibrated. Although there is still a difference between the measured and simulated values, especially when an hourly basis analysis is performed, the final model represented the building with a high level of detail, through several input parameters, allowing its use in the evaluation of energy efficiency measures and retrofits.

Keywords: Calibration; Evidence-based method; EnergyPlus; Shopping Center.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor e o Diagrama T-s.....	22
Figura 2 - Representação esquemática de um sistema de condicionamento de ar com expansão indireta.....	23
Figura 3 - Chillers comerciais com condensação a (a) ar, (b) água e (c) absorção.	23
Figura 4 - Loops do sistema de ar condicionado.....	25
Figura 5 - Classificação das tecnologias de armazenamento de energia.....	27
Figura 6 - Representação esquemática de um sistema de termoacumulação de água gelada. .	29
Figura 7 - Classificação dos tipos de controle da termoacumulação.....	32
Figura 8 - Modelo Law-Driven (forward) <i>versus</i> modelo Data-Driven (inverso).	33
Figura 9 - Ferramentas e técnicas analíticas de calibração.....	41
Figura 10 - Técnicas de calibração matemáticas e estatísticas.	42
Figura 11 – Metodologia proposta desenvolvida para o método baseado em evidências.	45
Figura 12 – Vista superior da edificação.....	48
Figura 13 – Edificação em imagem de satélite 3D.....	49
Figura 14 – Projeção lateral da edificação.....	49
Figura 15 – Vista do interior do Shopping Center.....	50
Figura 16 – Consumo horário de uma semana típica em Janeiro de 2019.....	53
Figura 17 – Consumo horário de uma semana típica em Junho de 2019.....	53
Figura 18 - Fluxograma do circuito da central de água gelada com o sistema de tanque de armazenamento de energia.	54
Figura 19 – Ocupação diária do Shopping Center.....	56
Figura 20 – Dados de ocupação do Shopping Center referentes a semana do dia 03 a 09 de abril de 2023.	57
Figura 21 – Relação entre a ocupação na edificação, consumo de energia total e do sistema de HVAC ao longo do ano de 2019.	59
Figura 22 – Representação em planta dos pavimentos da edificação modelada.	60
Figura 23 – Exemplo de construção de um arquivo climático do tipo TMY.....	62
Figura 24 – Temperatura do ar do arquivo climático de Porto Alegre.....	63
Figura 25 – Ciclos do HVAC na interface do OpenStudio.	64
Figura 26 – Fluxograma da Metodologia aplicada na pesquisa.	67
Figura 27 – Foto do sistema de HVAC instalado no Shopping Center.....	69
Figura 28 – Consumo de energia da edificação por área.....	70
Figura 29 – Consumo de energia do sistema de ar condicionado por área condicionada.	72
Figura 30 – Consumo total e do sistema de ar condicionado.....	73
Figura 31 – Padrão de ocupação e uso de equipamentos no modelo.	74
Figura 32 – Análise horária de uma semana composta por variáveis medidas e simuladas. ...	81
Figura 33 – Consumo total medido no ano de 2019 separado em condicionamento de ar e carga de base.	83
Figura 34 – Consumo total simulado referente ao ano de 2019 separado em condicionamento de ar e carga de base.....	83
Figura 35 – Comparação mensal entre os dados medidos da edificação total <i>versus</i> simulado.	85
Figura 36 – Comparação mensal entre os dados medidos do sistema de HVAC <i>versus</i> simulado.	85
Figura 37 – Comparação mensal entre a carga de base medida <i>versus</i> simulado.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da ABRASCE por tipo de empreendimento.	18
Tabela 2 - Critérios e limites de indicadores para diferentes diretrizes de calibração.	39
Tabela 3 – Dados disponibilizados da edificação.....	52
Tabela 4 – Características da edificação.....	61
Tabela 5 – Principais informações adicionadas ao programa de simulação para o sistema de HVAC.....	64
Tabela 6 – Principais alterações no processo de revisão do modelo durante a calibração.	75
Tabela 7 – Análise dos indicadores estatísticos referente a calibração do modelo e das diferenças do consumo total e do sistema de HVAC.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABL	Área Bruta Locável
ABRASCE	Associação Brasileira de Shopping Center
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
AHRI	<i>Air-Conditioning, Heating and Refrigeration Institute</i>
AHU	<i>Air Handling Unit</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BAS	<i>Building Automation System</i>
BEPS	<i>Building Energy Performance Simulation</i>
BIM	<i>Building Information Modelling</i>
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CCEE	Câmara de Comercialização do Mercado Livre
COP	Coefficiente de Performance
CTES	<i>Cold Thermal Energy Storage</i>
CVRMSE	<i>Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error</i>
CWS	<i>Chilled Water Storage</i>
DEO	Desempenho Energético Operacional
EMS	<i>Energy Monitoring System</i>
FIFA	<i>Fédération Internationale de Football Association</i>
GBC	<i>Green Building Council</i>
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IEA	<i>International Energy Agency</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air-Conditioning</i>
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
MBE	<i>Mean Bias Error</i>
M&V	Medição e Verificação
O&M	Operação e Manutenção
TES	<i>Thermal Energy Storage</i>
TMY	<i>Typical Meteorological Year</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	SHOPPING CENTER	17
2.2	SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO DE EDIFICAÇÕES	21
2.2.1	Sistemas de armazenamento de energia	26
2.2.2	Termoacumulação para sistemas de resfriamento de edificações	28
2.3	OPERAÇÃO E CONTROLE DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA.....	30
2.4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE EDIFICAÇÕES	32
2.5	CALIBRAÇÃO DOS MODELOS COMPUTACIONAIS	38
2.5.1	Abordagens existentes para a calibração de uma simulação de desempenho energético de edificações.....	40
2.5.2	Ferramentas e técnicas analíticas.....	40
2.5.3	Técnicas de calibração matemáticas e estatísticas.....	41
2.5.4	Método baseado em evidências	43
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO REFERENCIAL TEÓRICO	46
3	MÉTODO.....	47
3.1	CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO.....	47
3.2	DADOS DISPONÍVEIS DA EDIFICAÇÃO.....	51
3.3	PARÂMETROS DE ENTRADA NO MODELO DE SIMULAÇÃO.....	59
3.3.1	Edificação	59
3.3.2	Clima	61
3.3.3	Sistema de HVAC	63
3.3.4	Padrão de Uso	66
3.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	66
3.4.1	Verificação do modelo.....	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1	LEVANTAMENTO DAS INFORMAÇÕES	69
4.2	RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO	74
4.3	DIFERENÇAS ENTRE MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO.....	82

5	CONCLUSÃO	88
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	90
	APÊNDICE A.....	96

1 INTRODUÇÃO

A Agência Internacional de Energia (IEA, 2022), aponta que cerca de um terço do consumo de energia final global e 15% das emissões de CO₂ estão ligados às edificações e ao setor das construções. Com a previsão de aumento da demanda energética nos próximos anos, devido a fatores como o acesso em massa à energia por países desenvolvidos, à maior utilização de aparelhos elétricos e ao aumento no número de edificações, a discussão sobre o consumo de energia torna-se crucial para uma sociedade sustentável. Nesse contexto, a adoção de estratégias de eficiência energética são relevantes para mitigar desastres naturais e equilibrar o planeta.

No Brasil, as edificações são responsáveis por mais da metade (51,2%) do consumo de energia elétrica, sendo que 27,6% são referentes às edificações residenciais, 15,7% às edificações comerciais e 7,9% referente às edificações públicas (EPE, 2021). Sendo assim, o consumo de energia tem um papel relevante nos custos e impactos ambientais de edifícios ao longo de sua vida útil, tornando-se essencial a elaboração de medidas para aumentar a eficiência energética das edificações.

Um estudo realizado por Geraldi et al. (2022) buscou entender as demandas energéticas e características de cada tipologia do setor de edificações não residenciais no Brasil. Foram analisados diversos parâmetros energéticos para doze grupos de edificações com diferentes fins, tais como o setor de saúde, armazenamento, serviço e alimentação. Verificou-se que o setor mercantil, representado também por shopping centers e comércios em geral, é responsável por 13% do consumo total elétrico do total das 12 categorias analisadas, com cerca de 11 TWh ao longo de um ano, sendo o segundo maior consumidor entre as categorias analisadas atrás apenas dos escritórios. Além disso, o setor mercantil possui como fonte primária majoritária a eletricidade e pouca influência de outras fontes, como por exemplo o Gás Natural e o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP).

No contexto de shopping centers no Brasil, a primeira construção deste tipo de empreendimento foi realizada em 1966 em São Paulo. A partir desse momento, a cada ano novos shopping centers foram abertos ao redor do país, chegando a marca de 628 unidades em maio de 2023, segundo a Associação Brasileira de Shopping Centers (ABRASCE). Além disso, percebe-se um aumento considerável na Área Bruta Locável (ABL) a cada ano, ou seja, os shoppings centers possuem como tendência cada vez mais ocuparem espaços maiores, abrigando uma quantidade maior de lojas, praças de alimentação, cinema, entre outras opções de lazer. Até maio de 2023, a ABRASCE indica que a ABL total dos 628 shopping center no

Brasil é de 17,5 milhões de m². Como referência, a área ocupada total pode ser comparada a 2.500 campos de futebol, seguindo os padrões da Federação Internacional de Associação de Futebol (FIFA).

Somente no último ano foram inaugurados 9 unidades no país, contribuindo para 133.625 m² de Área Bruta Locável. Já no ano de 2023, 3 unidades já foram inauguradas até maio, totalizando um acréscimo de 56.247 m² de ABL. Por fim, como expansão do setor, é previsto a abertura de mais 11 shopping center que acrescentarão 197.436 m² de ABL (ABRASCE, 2023).

Apesar do crescimento, o setor de shopping center enfrentou uma forte crise devido a pandemia Covid-19, principalmente nos anos de 2020 e 2021. Nesta ocasião, diversos shopping centers precisaram fechar seus estabelecimentos por longos períodos ou trabalharem com um público reduzido. Além disso, até 2016, o setor de varejo enfrentava desafios no cenário macroeconômico, como a alta da inflação e taxa de juros e redução do crédito para financiamento. Todos estes fatores dificultavam a abertura de novos empreendimentos do mercado (BR MALLS, 2016).

O cenário atual indica uma normalização do setor após as restrições causadas pela crise sanitária, aliadas aos menores níveis de inflação em comparação com 2021. No último Censo Brasileiro de Shopping Centers 2022-2023 divulgado pela ABRASCE, o faturamento de 2022 aumentou em 20,5% com relação a 2021 e se aproximou do volume registrado em 2019. Os dados divulgados com relação ao faturamento refletem uma reação positiva e gradual recuperação do setor. Além disso, o fluxo de visitante por mês que era de 397 milhões em 2021 aumentou em 12% no ano de 2022, chegando a 443 milhões de visitas mensais (SHOPPING CENTER A, 2023).

O cenário futuro para este tipo de construção é promissor, de forma que novas unidades entrarão em operação, pelo menos 10% realizavam expansão em 2022 e mais de 26% das unidades construídas pretendem expandir sua ABL (ABRASCE, 2023).

Ao passo que percebe-se um aumento no número de unidades e na ABL ocupada, o consumo de energia, que abastece esses empreendimentos, acompanha o mesmo movimento. Sendo assim, os custos operacionais referente ao consumo de energia dessas unidades aumentam. Com o objetivo de buscar a redução de custos, os shopping centers optam, por sua vez, na migração do mercado cativo de energia para o mercado livre de energia (SHOPPING CENTER B, 2023). Tem-se que até o ano de 2022, a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) apontou a presença de pelo menos 488 unidades nesse tipo de ambiente, o que

representa em torno de 80% de todas as unidades construídas no Brasil, segundo dados da ABRASCE.

A migração do mercado cativo para o mercado livre é uma das opções encontradas pelo setor na busca de redução de custos. Além dessa, os shopping centers buscam reduzir o seu consumo a partir da eficiência energética para seus sistemas, como de ar condicionado, iluminação, retrofit de equipamentos e outros. Todas as opções possuem como objetivo a eficiência energética e operacional alinhada à redução de custos (SHOPPING CENTER B, 2023).

O setor de shopping centers não é o único a buscar a eficiência energética como forma de redução de custo e melhoria operacional, há diversos empreendimentos que estão conscientes das possíveis melhorias e benefícios de uma medida de eficiência energética. Um exemplo da busca por melhorias nas edificações pode ser atrelado à busca de certificação do *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) no Brasil. A certificação LEED é uma sistema internacional de certificação e orientação ambiental para edificações e possui como intuito o incentivo à transformação dos projetos, obra e operação das edificações, com foco na sustentabilidade de suas ações (GBC, 2023). O Brasil, até o final de 2022, era o quinto país do mundo em edifícios com certificação LEED, de acordo com o anuário do *Green Building Council* (GBC). A crescente demanda por esse tipo de certificação influencia e fomenta as análises prévias através de ferramentas de simulação computacional, que possuem como objetivo investigar a influência de determinadas ações antes da sua implantação.

Esse tipo de análise tem aumentado a cada ano através de programas de desempenho energético que simulam uma edificação, também chamado de *Building Energy Performance Simulation* (BEPS). O BEPS tornou-se uma opção na avaliação por medidas de eficiência energética de uma edificação. Além disso, a simulação de um modelo termoenergético pode ser utilizada para a análise e predição do consumo de energia da edificação, Medição e Verificação (M&V) e a avaliação de medidas de conservação de energia.

Nesse sentido, é importante ressaltar que o desenvolvimento de projetos de melhorias e validações de modelos de simulações termoenergéticas são de suma importância para o setor, tendo em vista a crescente demanda da simulação termoenergética nos últimos anos (REDDY, 2006). Para garantir a confiabilidade e acuracidade desses modelos, a calibração dos modelos com a realidade torna-se fundamental. Esse processo de calibração consiste em uma complexa etapa que aproxima o modelo de simulação energética do modelo real por meio da inserção e análise dos dados reais (REDDY, 2006).

Destaca-se que a calibração é uma forma de análise que exige atenção e expertise para investigar as diferenças encontradas entre o modelo real e simulado. Algumas das diferenças podem ser explicadas por comportamentos dos usuários diferentes do projetado, instalação de equipamentos e iluminação diferentes da planta arquitetônica, *set-point* do ar condicionado distinto do informado, entre outros. Nesse sentido, além dos projetos, a visita *in-loco* e o diálogo com os responsáveis pela operação da edificação são fundamentais para mitigar imprecisões do modelo de simulação a ser calibrado.

Além disso, o processo de calibração pode beneficiar, em um cenário mais amplo, analistas do setor de energia e estratégias governamentais, proporcionando uma perspectiva mais apurada do consumo energético (NORFORD *et al.*, 1994). Permitindo assim, antecipar cargas futuras e formular políticas energéticas condizentes com a tendência macroeconômica e de impactos ambientais.

Uma das formas encontradas para estabelecer uma perspectiva mais apurada do consumo energético foi desenvolvida em 2013 pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS). O CBCS identificou a necessidade de desenvolver um parâmetro de comparação para edifícios em operação, visando classificar o consumo energético do edifício em uso (CBCS, 2013). Dessa forma, foi criada uma plataforma de análise chamada de Desempenho Energético Operacional (DEO) com o objetivo de desenvolver metodologias e escalas de *benchmark* para diferentes tipologias não-residenciais (DEO, 2015). Essa iniciativa possibilita a avaliação do desempenho de edificações mediante a inserção de dados referentes ao local, área construída, área de estacionamento e consumos mensais ou anuais.

A plataforma DEO impulsiona uma melhoria no setor, uma vez que, a edificação sendo classificada como ineficiente ante à outras edificações existentes da mesma tipologia, buscará soluções que melhorem a sua classificação. A busca por essas soluções poderá ser desenvolvida através de análises de um modelo calibrado, ou seja, um modelo termoenergético que representa a edificação com alta acuracidade. Esse tipo de análise prevê o impacto das ações de eficiência energética na redução de consumo e também possibilita verificar a nova classificação da edificação na plataforma DEO.

No entanto, antes de alcançar essa realidade, é preciso superar diversas dificuldades que estão inseridas no processo de calibração. Os dados de entrada e informações detalhadas raramente estão disponíveis e, quando estão, dependem da qualidade e formato dos dados para serem adicionados ao modelo (CHONG *et al.*, 2017).

A calibração de modelos de simulação foi até hoje mais amplamente aplicada à edificações que são utilizadas como escritórios (KANI-SANCHEZ; RICHMAN, 2017; LAM *et al.*, 2014; REDDY; MAOR; PANJAPORNPON, 2007b). Esse dado pode ser resultado de mais acesso às informações, tais como consumo de energia total e consumo de energia do sistema de climatização em intervalos horários ou mensais e um padrão de uso regular da edificação, tais como ocupação, atividade metabólica, uso do sistema de climatização e equipamentos.

Pelo presente exposto, esse trabalho desenvolveu a calibração de um modelo de simulação de um shopping center localizado em Porto Alegre, RS, devido ao acesso à diversos documentos e à informações de consumo de uma edificação real. Dados, estes, que dificilmente são abertos ao público e que possibilitam a análise completa de um processo de calibração. Além disso, a escolha da edificação deu-se pela possibilidade de efetuar inspeções no local guiadas pela equipe de coordenação e operação do shopping center. Como mais um destaque para a escolha do shopping center, tem-se que, até a publicação deste trabalho, não encontrou-se estudos específicos sobre calibração de modelos de shopping centers. Dessa forma, este trabalho é uma oportunidade para fomentar o desenvolvimento de pesquisas para esse tipo de edificação.

1.1 OBJETIVOS

O desenvolvimento deste estudo parte do estabelecimento de objetivos gerais e específicos, que norteiam a exploração do tema, em vista da investigação de uma premissa. Neste estudo, adotou-se como premissa a possível calibração de um modelo de simulação frente a uma edificação existente.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste na calibração de um modelo de simulação energética baseado em um shopping center existente utilizando dados reais.

1.1.2 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral, podem-se delimitar os seguintes objetivos específicos:

- a. Levantar o método mais adequado para a calibração de um modelo de simulação energética com dados reais;
- b. Avaliar o processo de calibração da edificação seguindo o método baseado em evidências;
- c. Avaliar a operação do shopping center a partir de visitas no local e realizar inspeções locais com os principais responsáveis pela operação dos sistemas existentes da edificação;
- d. Levantar o uso final das principais cargas do shopping center;
- e. Avaliar a calibração para um intervalo mensal e/ou horário;
- f. Indicar as principais dificuldades encontradas no processo de calibração de um modelo de simulação termoenergética.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado nos seguintes capítulos: introdução, referencial teórico, método, resultados e discussões e conclusão. Na introdução são elencados os principais pontos da pesquisa, sua relevância e seus objetivos. No referencial teórico são abordados os seguintes temas: consumo energético de um shopping center; sistema de armazenamento de energia e a sua operação junto da edificação; simulação de modelos termoenergéticos; como avaliar a acuracidade de um modelo de simulação; quais são as técnicas de calibração existentes; e por fim, as considerações finais sobre o referencial teórico levantado. No capítulo de método, são abordados os passos elencados para atingir os objetivos apresentados no primeiro capítulo. Entre os pontos abordados no método está a tipologia adotada, os parâmetros de entrada disponibilizados para a simulação, as definições dos parâmetros de entrada, as variações dos modelos a fim de buscar a sua acuracidade. No capítulo de resultados traz os resultados obtidos e discussões. Por fim, no capítulo conclusões são apresentados os principais resultados, discussões e recomendações de trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Com base nas motivações apresentadas no Capítulo 1, neste capítulo é realizada uma revisão de literatura sobre o tema deste trabalho. Com base na edificação analisada e os itens que nela estão presentes, é indicado aqui as informações relevantes que sustentam o desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente é falado sobre o histórico dos shopping centers e os principais usos finais presentes em tal tipologia, seguindo para o sistema de *Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado* (sigla em inglês, HVAC), o funcionamento de sistemas de armazenamento de energia térmica e sua operação junto ao sistema de HVAC. Na sequência, é falado sobre simulação de modelos, métodos de avaliação da acuracidade de um modelo, as abordagens existentes para a calibração de modelos de simulação e, por fim, considerações finais sobre a revisão de literatura.

2.1 SHOPPING CENTER

Shopping center é uma tipologia de construção que começou a ser concebida no século XIII em Paris com as “Galerias” com o objetivo de obter em um mesmo local várias opções de compras. Após a Segunda Guerra Mundial, nos Estados Unidos, os shopping centers começaram sua versão moderna, como encontra-se mais comumente ao redor do mundo (BR MALLS, 2016). No Brasil, o primeiro shopping center foi construído em 1966 em São Paulo. Até maio de 2023, a ABRASCE quantificou a existência de 628 unidades espalhadas no país e pelo menos 11 unidades em construção. A quantidade de shoppings construídos nas últimas décadas no Brasil representa uma expressiva alavancagem e expansão substancial no setor, contribuindo para o processo de metropolização e urbanização (GONÇALVES; GUIMARÃES; CACHINHO, 2020). Além disso, Gonçalves et al. (2020) reforça que ao apoiar a consolidação de alguns novos centros urbanos, os shopping centers estão vinculados à vitalidade de determinados bairros e acabam por ser expressão da propriedade privada socialmente estratificada.

De acordo com a classificação da ABRASCE apresentada na Tabela 1, um empreendimento é considerado um shopping center caso a construção possua como Área Bruta Locável (ABL) uma área superior a 5.000 m² e seja composto por diversas unidades comerciais, com administração única e centralizada, que pratica aluguel fixo e percentual por um certo

período contratual. Na maioria das vezes, o empreendimento possui lojas âncoras, que podem ser classificadas como lojas que possuem um tamanho maior em relação às lojas comuns, chamadas de lojas satélites, e que poderão atrair um público maior ao shopping, por serem conhecidas nacionalmente ou internacionalmente (BR MALLS, 2016). Além disso, o empreendimento precisa de uma certa quantidade mínima de vagas de estacionamento compatíveis com a legislação da região onde está instalado.

Tabela 1 - Classificação da ABRASCE por tipo de empreendimento.

Tipo	Porte	ABL
Tradicional	Mega	acima de 60.000 m ²
	Regional	de 30.000 a 59.999 m ²
	Médios	de 20.000 a 29.999 m ²
	Pequenos	de 5.000 m ² até 19.999 m ²
Especializado <i>Podem ser do tipo Outlet, Life Style ou Temáticos</i>	Grandes	acima de 20.000 m ²
	Médios	de 10.000 a 19.999 m ²
	Pequenos	De 5.000 m ² até 9.999 m ²

Fonte: ABRASCE, 2023.

De forma geral, os shopping centers são geridos por uma entidade centralizada que controla as características da aglomeração (meio físico, parques de estacionamento, lojas de varejo, lazer e serviços) e, também, cria-se uma única linha de marketing comum, como promoções conjuntas (GOMES; PAULA; MACEDO-SOARES, 2017). Segundo Gomes *et al.* (2017), o desempenho do shopping center depende da renda auferida pelos lojistas e, indiretamente, também dos clientes finais que frequentam e efetuam compras nas lojas.

Os shopping centers, no geral, possuem apenas consumo de eletricidade. Existem quatro principais usos finais de energia de um shopping center, sendo eles, o sistema de HVAC, iluminação, equipamentos elétricos diversos e elevadores/escadas rolantes (BOINTNER; TOLEIKYTÈ, 2016; LAM; LI, 2002). A participação de cada um desses usos finais, bem como o consumo de energia por área, está atrelado à diferentes fatores, tais como uma forte correlação da temperatura externa de bulbo úmido (LAM; LI, 2002), *set-point* de temperatura do sistema de ar condicionado, nível de iluminação, horas de uso e operação e manutenção dos equipamentos (JUAIDI *et al.*, 2016).

Lam *et al.* (2002) realizou um estudo do uso de eletricidade no setor comercial em Hong Kong durante 31 anos, no período dos anos de 1970 a 2000. A média anual do consumo cresceu 7,4% durante esse período e os shopping center ficaram em primeiro lugar como maiores consumidores finais de eletricidade. A partir desse ponto, Lam *et al.* (2002) realizou uma pesquisa em 4 diferentes shopping centers utilizando como base a medição de energia durante 12 meses. Para avaliar os usos finais, o autor adotou diferentes métodos. Para a iluminação e equipamentos, considerou-se a potência instalada pelas horas de uso; para escadas rolantes e elevadores utilizou-se medidores de energia com analisadores de energia; para o sistema de HVAC, subtraiu-se do consumo total os demais consumos de iluminação, equipamentos, escadas rolantes e elevadores. O resultado foi que o sistema de HVAC correspondeu entre 47% a 54% do consumo total, a iluminação correspondeu entre 33% a 38%, os equipamentos representaram em torno de 10% e escadas rolantes e elevadores não chegaram a 5% do consumo total. Dessa forma, pelo menos 80% do consumo de energia está atrelado ao uso do sistema de HVAC e iluminação. Ao analisar o consumo de energia anual por área, os valores encontrados foram de 391 kWh/m² a 454 kWh/m², com uma média de 430 kWh/m².

Bointner *et al.* (2016) procedeu uma análise de eficiência energética em shopping centers localizados na Polônia e na França. De acordo com o estudo, a análise dos empreendimentos nesses dois países representam, de forma geral, os empreendimentos na União Européia. O estudo buscou diversos relatórios e números consolidados referente aos shopping centers nessas regiões para serem utilizados como base de pesquisa. Os valores típicos das aplicações encontradas em shopping centers, tais como sistema de iluminação, equipamentos em geral e HVAC foram apresentados de acordo com a densidade de potência em W/m². Estes valores variam para cada tipo de uso de espaço, como por exemplo densidade de iluminação de 23,7 W/m² para as áreas comuns e 27 W/m² para lojas médias e grandes. Além disso, a validação do uso do ar condicionado ocorreu através do processo de regressão linear. A visão segmentada dos usos finais mostrou que a principal parcela do consumo total está atrelada ao uso do sistema de iluminação e de refrigeração. O estudo também apresentou a variação de consumo de energia anual por área, sendo este valor de 310 kWh/m² a 388 kWh/m², que está relacionada ao tipo de shopping center. De acordo com o autor, grandes shopping centers tendem a possuir uma demanda específica por m² menor. Além disso, o tipo e ano de construção possuem forte influência na demanda de eletricidade para o sistema de iluminação e de refrigeração.

Canbay et al. (2004) realizou uma auditoria energética em um shopping center na Turquia, visando a implementação de medidas de eficiência energética que reduziria o consumo de energia elétrica. O trabalho foi desenvolvido a partir de visitas no local e coleta de questionários dos lojistas. Canbay *et al.* (2004) define que a maior oportunidade de redução de energia está no sistema de HVAC, uma vez que ele representa 67% do consumo de energia total. Os demais usos estão divididos em 18% para iluminação e 15% para outros equipamentos. A pesquisa desenvolvida indicou que a grande participação do sistema de HVAC foi devido a elevada carga interna correspondente ao número de pessoas no local, podendo receber até 20.000 pessoas por dia nos finais de semana. No caso do shopping center analisado, também houve a presença do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), utilizado principalmente para aquecimento. Dessa forma, nos meses de baixas temperaturas percebe-se um elevado consumo de GLP e menos de eletricidade, ao passo que nos meses de temperatura mais elevada o comportamento se inverte, aumentando o consumo de eletricidade e reduzindo o consumo de GLP.

Zheng et al. (2020) propôs um modelo de regressão linear para avaliar o consumo de energia de edifícios com base em dados obtidos de 50 edificações multifuncionais e monofuncionais em Xangai, na China. Dentre as 50 edificações analisadas, 8 eram shopping centers. As informações de consumo das edificações foram obtidas através de medidas no local e, a partir de regressão linear, os usos finais foram calculados. Obteve-se assim que os maiores responsáveis pelo consumo de energia eram o ar condicionado, iluminação e outros, com um consumo de energia por unidade de área de, aproximadamente, 125 kWh/m², 115 kWh/m² e 100 kWh/m², respectivamente. Além disso, o autor indicou que o consumo de energia anual específico para os shopping centers analisados foi de 271 kWh/m².

Os shopping centers possuem dessa forma uma condição muito semelhante no que se trata de usos finais, sendo eles em sua maioria divididos em sistema de HVAC, iluminação, equipamentos gerais, escadas rolantes e elevadores. No que tange às diferenças entre os shopping centers, pode-se destacar que alguns deles adotam um sistema de armazenamento de energia, ou pelo termo em inglês *Thermal Energy Storage* (TES), constituído por um tanque, de água ou gelo, destinado à armazenar energia. A seção 2.2 apresenta em mais detalhes o funcionamento deste tipo de sistema. O shopping center analisado neste trabalho possui TES, portanto torna-se necessário a apresentação deste tipo de sistema.

As edificações desse grupo, em sua maioria, são construídas com alvenaria, cobertura de concreto e possuem a relação de janela-parede de 26% a 50% (SOARES GERALDI *et al.*,

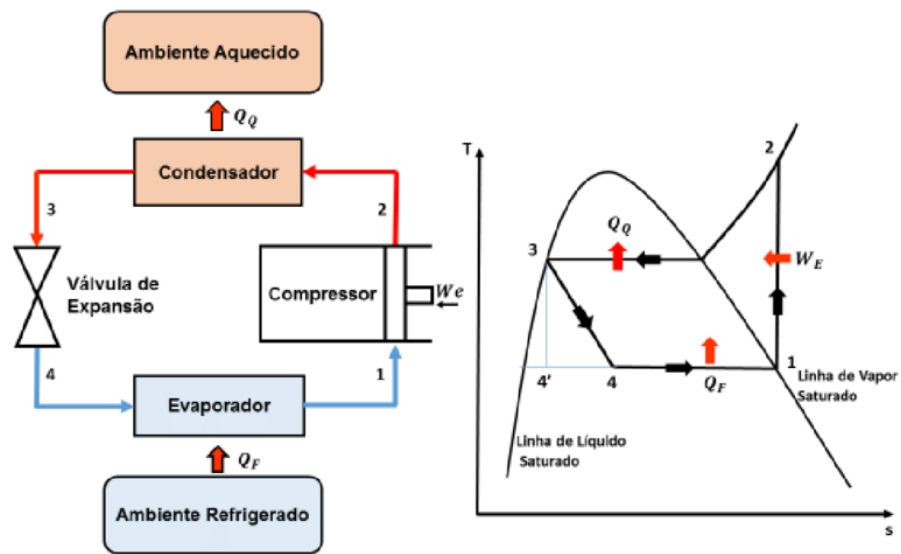
2022). O setor mercantil caracteriza-se por uma densidade de iluminação de $7,3 \text{ W/m}^2$, a quinta maior entre 12 grupos analisados, e 16 W/m^2 de densidade média da potência total dos equipamentos, um terço do valor da primeira no ranking. Por fim, Geraldi *et al.* (2022), indica que a capacidade média de refrigeração é $76,5 \text{ W/m}^2$.

2.2 SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO DE EDIFICAÇÕES

A grande maioria dos equipamentos de ar condicionado comercializados atualmente é baseada no ciclo de compressão de vapor. Nesse processo, o vapor é comprimido, condensado e, em seguida, a sua pressão é reduzida para permitir que o fluido evapore a baixa pressão. Esse sistema é baseado no ciclo de Carnot, também conhecido como motor térmico. O fluido utilizado nesse sistema é chamado de fluido refrigerante (STOECKER; JONES, 1985). A Figura 1 apresenta as fases de cada processo que podem ser descritas como:

- Processo 1 (Evaporador para Compressor): há a compressão isentrópica do fluido no compressor, onde o fluido entra como vapor saturado e sai como vapor superaquecido, devido ao aumento de sua temperatura;
- Processo 2 (Compressor para Condensador): o fluido entra no condensador como vapor superaquecido e sai como líquido saturado como resultado da rejeição de calor para a vizinhança a uma pressão constante;
- Processo 3 (Condensador para Válvula de Expansão): o fluido em estado líquido saturado é então estrangulado até a pressão do evaporador, por uma válvula de expansão ou por um tubo capilar, e desta forma há o aumento do volume específico e a temperatura do fluido cai abaixo da temperatura do espaço a ser refrigerado;
- Processo 4 (Válvula de Expansão para Evaporador): ocorre a absorção de calor a pressão constante em um evaporador, onde o fluido sai como vapor saturado e entra novamente no compressor, completando o ciclo de refrigeração.

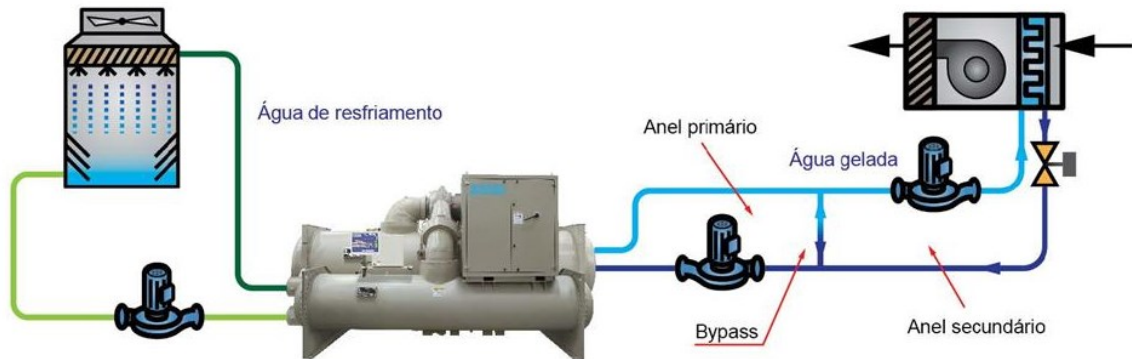
Figura 1 - Representação do Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor e o Diagrama T-s.



Fonte: Freitas (2018).

De acordo com Brasil (2017a), existem dois tipos principais de sistemas de ar condicionado: expansão direta e indireta. Nos sistemas de expansão direta, o ar que será insuflado no ambiente condicionado é resfriado através de um trocador de calor do tipo serpentina. Para isso, o fluido refrigerante em baixa temperatura é conduzido diretamente pelas serpentinas. Os tipos mais comuns de sistemas de expansão direta incluem ar condicionado de janela, ar condicionado tipo split, self-contained, rooftop, splitão e Vazão de Fluido Refrigerante Variável (VRF). Os sistemas de expansão indireta (Figura 2), por sua vez, empregam um líquido secundário, comumente a água, que flui através de uma serpentina onde o ar é insuflado para ser direcionado à climatização do ambiente. Uma rede hidráulica bombeia o líquido secundário que, após passar pela serpentina que resfria o ar, retorna ao trocador de calor do sistema de refrigeração. É nesse trocador que o líquido refrigerante circula para resfriar o líquido secundário. Chillers, que são unidades resfriadoras de líquidos, são utilizados nesses sistemas para refrigerar o líquido refrigerante. Além disso, os sistemas de expansão indireta incluem unidades com ventilador e serpentina, responsáveis por tratar o ar, conhecidos como fan-coil, ou unidades de tratamento de ar, denominadas *Air Handling Units* (AHU).

Figura 2 - Representação esquemática de um sistema de condicionamento de ar com expansão indireta.



Fonte: Brasil (2017a).

De acordo com Brasil (2017b), os principais tipos de chillers são de condensação a ar, condensação a água e de absorção (Figura 3).

- *Chillers* com condensação a ar possuem condensadoras em que o fluido refrigerante rejeita o calor diretamente para o ar exterior, por meio de um ou mais ventiladores;
- *Chillers* com condensação a água realizam a condensação do fluido refrigerante por meio da troca de calor com a água que, posteriormente circula por uma torre de resfriamento. Na torre, uma corrente de ar, promovida por ventiladores, auxilia na redução da temperatura da água;
- *Chillers* de absorção podem possuir como sistema de condensação tanto a água quanto o ar. Esse tipo de chiller realiza um processo “termoquímico”, sendo alimentados por calor o qual pode ser proveniente de queima direta de combustível, vapor de água, água quente ou gases de exaustão.

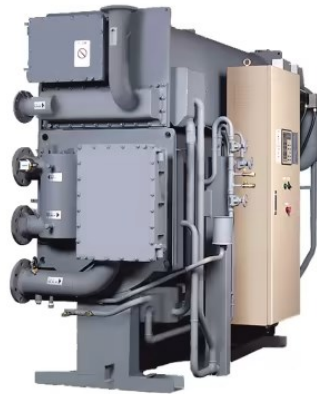
Figura 3 - Chillers comerciais com condensação a (a) ar, (b) água e (c) absorção.



(a)



(b)



(c)

Fonte: (CARRIER, 2022; TRANE A, 2022; TRANE B, 2022)

Peng *et al.* (2021) indica que um sistema de ar condicionado central funciona principalmente no verão e sua principal função é transferir o excesso de calor de uma sala para o exterior para desempenhar um papel de resfriamento. Ao detalhar mais um pouco sobre o processo de um sistema de ar condicionado central contendo um chiller com condensação a água, tem-se que seu processo se dá por meio de diferentes componentes e circuitos. Sendo que seus principais equipamentos são unidade refrigeradora, que transporta o líquido refrigerante e o qual foi apresentado anteriormente como chiller; bomba de água gelada, responsável pelo bombeamento da água gelada que conecta o chiller ao AHU; bomba de condensação, responsável pelo bombeamento da água de condensação que conecta o chiller a torre de resfriamento; torre de resfriamento; e o AHU (PENG *et al.*, 2021).

A Figura 4 apresenta o esquema completo de um ambiente climatizado, separando-o em 4 circuitos e como eles se interligam. Cada sistema troca calor com o outro que pode estar transportando água, líquido refrigerante ou ar.

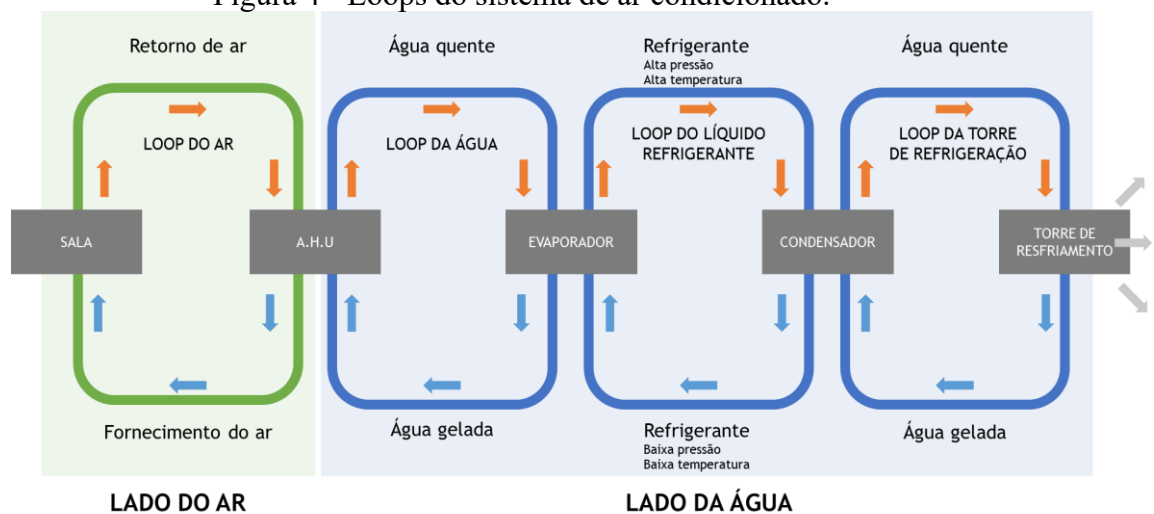
O loop do lado do ar é o circuito responsável por transportar o ar através do sistema de dutos e unidades de tratamento de ar. Esse loop inclui os ventiladores, que são responsáveis por mover o ar, as serpentinas de resfriamento, que retiram o calor do ar, e as unidades de tratamento de ar, que filtram e umidificam o ar.

O loop da água do chiller é o circuito responsável por transportar a água gelada gerada pelo chiller até as serpentinas de resfriamento. Esse loop inclui o chiller, que é o equipamento responsável por resfriar a água, e as bombas primárias e secundárias, que promovem a circulação da água no sistema.

O loop do líquido refrigerante é o circuito fechado que transporta o líquido refrigerante do chiller para as serpentinas de resfriamento. Esse loop inclui as tubulações, as válvulas e os controladores de fluxo.

O loop da torre de refrigeração é o circuito responsável por resfriar a água que circula pelo loop da água do chiller. Esse loop inclui a torre de resfriamento, que remove o calor da água, as bombas, que movem a água através do sistema, e as tubulações e válvulas que conectam a torre de refrigeração ao loop da água do chiller.

Figura 4 - Loops do sistema de ar condicionado.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Um ponto importante de avaliação corresponde à eficiência de um chiller. De forma geral, a verificação da eficiência é realizada por meio da aplicação de alguns indicadores. O Coeficiente de Performance (COP) é definido pela ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2016) como a relação entre a taxa de remoção de calor e a taxa de entrada de energia, podendo ser usado para avaliar todo o sistema de resfriamento ou componentes individuais. Outros indicadores comuns incluem o IPLV (*Integrated Part Load Value*), o NPLV (*Non-Standard Part Load Value*) e o SPLV (*System Part Load Value*). Conforme a Norma AHRI 551/591 (AHRI, 2018), o IPLV leva em conta o desempenho do chiller não apenas em 100% da carga, mas por meio da média ponderada de sua operação em cargas parciais ao longo do tempo, em condições de operação padrão. Por outro lado, o NPLV considera o valor da carga parcial fora dos padrões, dentro das condições de operação do projeto. O SPLV, de acordo com Brasil (2017b), representa a média ponderada da eficiência energética de uma instalação real em cargas parciais, dentro de características específicas de operação, em uma localidade específica. Além dos chillers, o

SPLV permite a consideração de outros equipamentos envolvidos no sistema de condicionamento de ar, permitindo uma análise mais ampla e complexa.

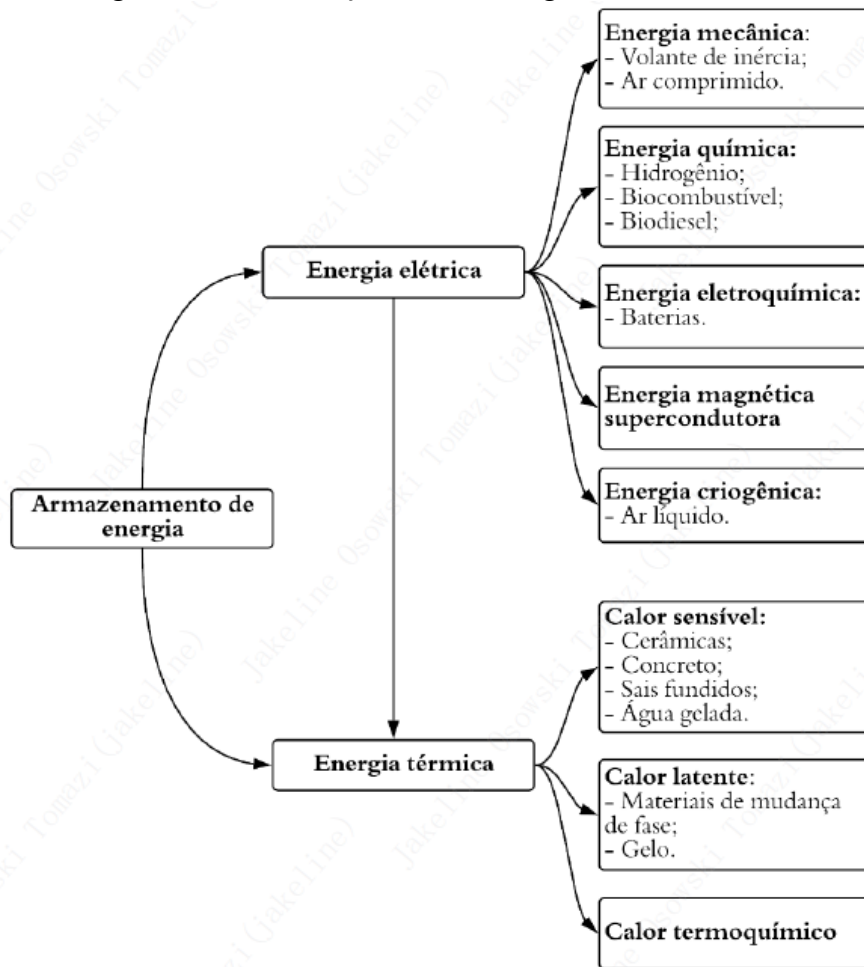
2.2.1 Sistemas de armazenamento de energia

A energia é armazenada por meio de processos químicos, mecânicos, magnéticos, biológicos ou térmicos, que seguem a lei termodinâmica de transformação de energia (DINCER; ROSEN, 2011). Conforme Aneke e Wang (2016), as tecnologias de armazenamento de energia podem ser classificadas em armazenamento elétrico e térmico, dependendo do propósito pelo qual a energia é armazenada. As tecnologias que armazenam e liberam energia em forma de energia térmica são conhecidas como *Thermal Energy Storage* (TES) em inglês, ou armazenamento de energia térmica.

No caso da energia elétrica, esta não pode ser armazenada diretamente, portanto torna-se necessária a conversão em uma forma mais estável de energia, para posteriormente transformá-la novamente em eletricidade no futuro. De acordo com Aneke e Wang (2016), existem diversas alternativas de armazenamento elétrico, incluindo armazenamento de energia mecânica, química, eletroquímica (como supercapacitores e baterias), magnética supercondutora e térmica. O armazenamento de energia térmica pode ser classificado como elétrico quando a energia é armazenada na forma térmica, mas liberada como energia elétrica, como no caso do armazenamento de energia do ar líquido, conhecido como *Liquid Air Energy Storage* (LAES) ou *Cryogenic Energy Storage* (CES). A Figura 5 resume as diferentes vertentes das tecnologias de armazenamento de energia.

De acordo com o *Air-Conditioning, Heating and Refrigeration Institute* (AHRI) (2014), os dispositivos que armazenam energia térmica podem ser categorizados em sistemas de armazenamento de calor sensível ou de calor latente. Os sistemas de armazenamento de calor sensível utilizam materiais que não passam por mudanças de fase durante sua operação, apenas sofrem com o aumento ou redução de sua temperatura (DINCER, 2002). Por outro lado, o armazenamento de calor latente é realizado pela mudança de fase da substância armazenada em uma temperatura constante (ALVA; LIN; FANG, 2018).

Figura 5 - Classificação das tecnologias de armazenamento de energia.



Fonte: Krelling (2019).

O armazenamento de energia térmica (TES) tem como objetivo evitar a dissipação da energia térmica sem a sua necessidade até o momento que, de fato, ela seja consumida (ALVA; LIN; FANG, 2018). A água é uma opção ideal para o armazenamento de calor devido ao seu excelente calor específico, baixo custo financeiro e estabilidade química (DINCER, 2002), sendo frequentemente utilizada na forma líquida ou sólida para o aquecimento e resfriamento de ambientes. Além disso, atualmente, as pesquisas em tecnologias de armazenamento de energia térmica estão focadas na diminuição dos custos relacionados aos materiais e à operação do sistema (ALVA *et al.*, 2017).

De acordo com Heier *et al.* (2015), a utilização da termoacumulação pode trazer diversos benefícios para as edificações, tais como a flexibilização do período de demanda energética, o aumento da eficiência energética dos sistemas de climatização artificial, o incentivo à utilização de energias renováveis de característica intermitente e o aumento do

conforto térmico dos ocupantes. Com o avanço das tecnologias, a termoacumulação tem se tornado cada vez mais popular na gestão da demanda de energia em edificações, sendo empregada em diversos tipos de construções, como prédios comerciais, de educação e de saúde (RISMANCHI *et al.*, 2012a).

2.2.2 Termoacumulação para sistemas de resfriamento de edificações

É possível utilizar a técnica da termoacumulação em sistemas de resfriamento de edifícios, que consiste na extração de calor de um meio de armazenamento térmico, durante um período favorável energeticamente e/ou financeiro. Essa técnica permite que a capacidade de resfriamento seja armazenada e utilizada posteriormente, quando houver demanda (BIYANTO *et al.*, 2015). Esse processo é também conhecido como *Cold Thermal Energy Storage* (CTES). Segundo Dincer (2002), os principais materiais empregados para esta técnica são apresentados abaixo:

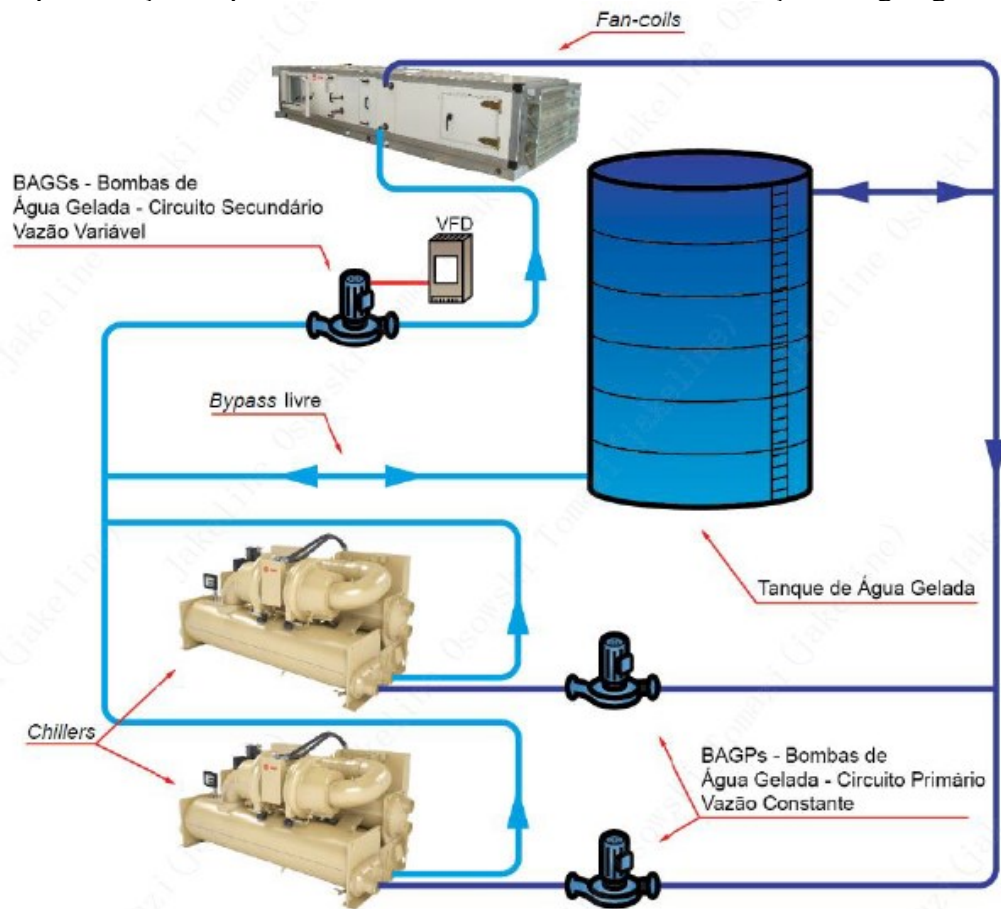
- Sais eutéticos: os sais eutéticos são misturas de sais inorgânicos, água e agentes nucleantes e estabilizantes, cuja capacidade de resfriamento provém do calor latente de fusão;
- Gelo: este material adota a técnica de mudança de fase e aproveita-se do calor latente de conversão do estado líquido da água em estado sólido;
- Água gelada: este material atua por meio do uso do calor sensível do resfriamento da água.

Neste ponto, entra-se em mais detalhes no sistema de armazenamento de água gelada, pois o sistema de ar condicionado analisado no trabalho contém exatamente esta técnica. A escolha por essa técnica pode ter sido por conta de ser a tecnologia mais madura de armazenamento de energia térmica, totalmente desenvolvida, com uma boa eficiência, disponível no mercado e com baixos custos para aplicações convenientes à aplicação em edificações (ARTECONI; HEWITT; POLONARA, 2012).

De acordo com Dincer (2002), os sistemas de armazenamento de água gelada, também conhecidos como *Chilled Water Storage* (CWS), utilizam o calor sensível gerado pelo resfriamento da água, operando de maneira compatível com os chillers padrão utilizados na climatização. A utilização desse sistema apresenta uma maior eficiência para os chillers, medida comumente expressa pelo COP, já que o sistema não necessita trabalhar com fluidos em

temperaturas tão baixas como na técnica de termoacumulação de gelo. Para implementar essa solução, é necessário instalar um tanque de armazenamento de água gelada no circuito de climatização, sendo possível diversas configurações, sendo uma delas ilustrada na Figura 6. Segundo a *ASHRAE HVAC System and Equipment Handbook* (ASHRAE, 2016b), os tanques mais comuns têm formato cilíndrico, normalmente com a altura maior do que o diâmetro, podendo ser acoplados à edificação ou separados, sobre o solo, parcial ou totalmente enterrados.

Figura 6 - Representação esquemática de um sistema de termoacumulação de água gelada.



Fonte: Brasil (2017a).

A água apresenta diferentes densidades de acordo com a sua temperatura. A maior densidade da água é quando ela está a 4 °C de temperatura. A medida que a temperatura aumenta ou diminui de 4°C, a densidade da água reduz. Essa relação entre densidade e temperatura leva à formação de camadas dentro do tanque de armazenamento, com a água armazenada apresentando camadas de temperatura crescente da superfície à base. Durante o descarregamento, a água gelada é retirada do fundo do tanque e usada para resfriar o ambiente,

sendo depois devolvida à superfície do recipiente. A eficiência do sistema de resfriamento depende da diferença de temperatura (ΔT) entre as camadas. Normalmente, a entrada de água refrigerada resulta na mistura com a água presente no tanque, criando uma camada intermediária conhecida como termoclina ou *thermocline*, que apresenta um alto gradiente de temperatura e densidade (ASHRAE, 2016b).

2.3 OPERAÇÃO E CONTROLE DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA

Atualmente o mercado de energia está dividido em duas frentes: o ambiente de contratação livre (ACL) e o ambiente de contratação regulada (ACR) (ENERGIA, 2023). No ACL, também conhecido como mercado livre de energia, é possível comprar a energia diretamente do comercializador ou gerador escolhido, e a entrega física permanece com a distribuidora local. A grande vantagem de comprar diretamente do comercializador ou gerador é a livre negociação de condições comerciais, como preço, prazo, volume, etc. Já no ACR, também conhecido como mercado cativo, o contrato de energia é realizado diretamente com a distribuidora local. Nesse modelo, a tarifa é regulada pela distribuidora e isonômica para uma mesma classe (A1, A2, A3 e A4) (ABRACEL, 2023).

Em 2015, o ACL começou a ganhar força no Brasil devido a sua viabilidade financeira e a legislação nacional e assim, consequentemente, mais unidades começaram a migrar para este tipo de contratação (CCEE, 2023). Uma das diferenças entre esses dois ambientes está relacionada ao horário de ponta e fora-ponta, uma vez que o ACL não possui essa discriminação e o ACR sim. O horário de ponta e fora-ponta, por sua vez, podem ser classificados como o horário em que a concessionária de energia possui maior ou menor demanda e, consequentemente, uma maior ou menor tarifa. Nesse sentido, as diferenças de tarifa de energia servem como um incentivo ao uso consciente de energia elétrica. Dessa forma, os consumidores dividem o dia de trabalho em dois horários: pico e fora pico e buscam diminuir o consumo de energia nos horários de pico com o objetivo de redução de custos operacionais (CCEE, 2023).

Nesse sentido, há décadas, a gestão da demanda em edifícios comerciais tem sido uma área ativa de pesquisa e desenvolvimento de soluções de condicionamento artificial. O objetivo é reduzir a demanda de pico para minimizar os custos operacionais, mantendo o conforto térmico dos ocupantes (SUN *et al.*, 2013).

Em sistemas de climatização convencionais, a operação de um chiller se dá quando existe carga térmica a ser atendida. Por outro lado, a utilização do TES destina-se no armazenamento de energia com o intuito de deslocar a carga de resfriamento de uma edificação das horas de pico para as horas fora de pico. Durante o processo de armazenamento (período de carga), o chiller produz água gelada nos horários fora de ponta e a armazena no tanque TES para sua utilização nas horas de ponta (BIYANTO *et al.*, 2015).

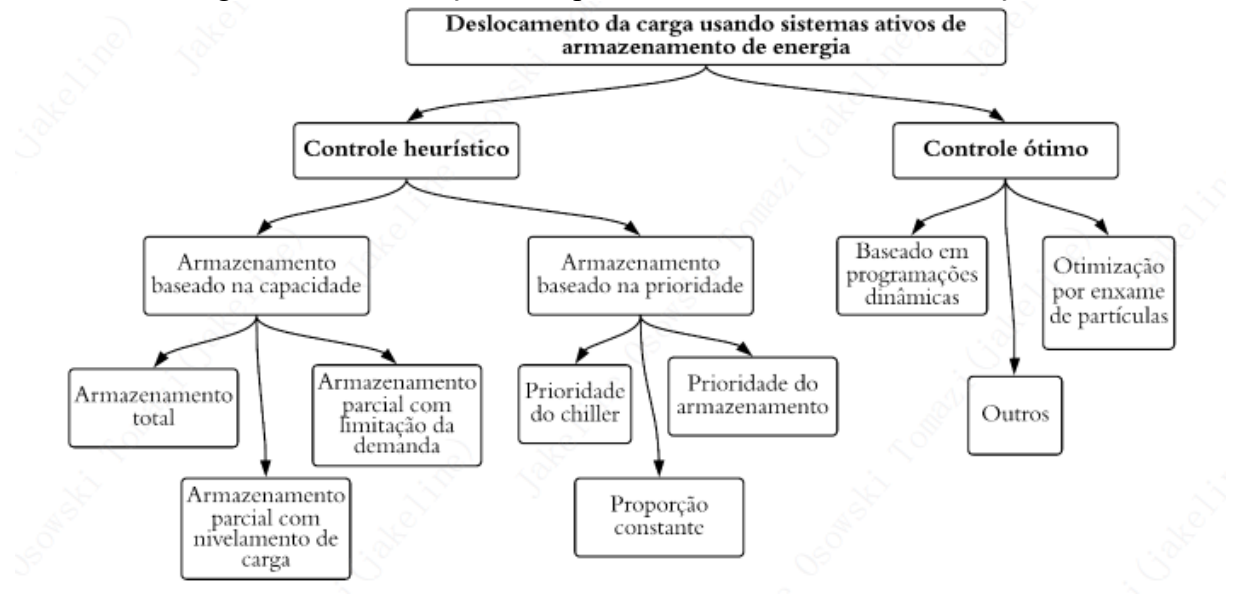
Embora o mercado de energia do ACL esteja em crescente expansão (CCEE, 2023), onde não há diferenciação de horário de ponta e fora-ponta, o CTES torna-se ainda interessante, uma vez que o sistema de CTES influencia na capacidade instalada do chiller (BIYANTO *et al.*, 2015). Biyanto *et al.* (2015) indica que o sistema de TES contribui para uma escolha mais adequada da capacidade do chiller, uma vez que ele pode ter sua capacidade reduzida.

Dessa forma, do ponto de vista do consumidor presente no ACL ou ACR, o uso do armazenamento de energia proporciona o uso mais eficiente da capacidade de geração existente e pode reduzir a necessidade de expansões. Do ponto de vista dos consumidores presentes no ACR, o TES contribui para o atingimento dos mesmos níveis de conforto térmico, com menores custos nas contas de eletricidade, em função das diferenças tarifárias (BIYANTO *et al.*, 2015).

Nesse contexto, o CTES pode auxiliar na redução e redistribuição da demanda através de três estratégias: o armazenamento total, o armazenamento parcial com nivelamento de carga e parcial com limitação da demanda (DINCER, 2002). O controle da termoacumulação pode ser realizado de diferentes formas baseados na capacidade de armazenamento, na prioridade e também automáticos e ótimos (Figura 7). O controle heurístico, segundo Sun *et al.* (2013), abre margem para ineficiências no sistema, pois não fazem ponderações sobre o desempenho. Ao passo que, controles otimizados tem o objetivo de buscar a trajetória que traga os melhores resultados de interesse.

As estratégias de controle são medidas essenciais para uma integração eficiente da acumulação térmica às edificações, uma vez que tais sistemas demandam a coordenação dos períodos de carga e descarga com eventos externos, tais como ocupação da edificação, condições climáticas e tarifas de energia, caso aplicadas período de ponta e fora ponta. Consequentemente, esses fatores devem estar coordenados à operação simultânea dos equipamentos de climatização e termoacumulação (TOURETZKY; BALDEA, 2016). Percebe-se dessa forma que o uso do CTES traz benefícios para a edificação, porém a sua operação deve ser muito bem manipulada para que o resultado seja eficiente de fato.

Figura 7 - Classificação dos tipos de controle da termoacumulação.



Fonte: Krelling (2019).

Biyanto *et al.* (2015) realizou uma pesquisa em um shopping center localizado na Indonésia. Seu objetivo foi analisar a influência e o ponto ótimo de operação de um sistema de TES em um shopping center. Através de relatórios do setor comercial em sua região de pesquisa, verificou-se-se que 57% do uso final de shopping centers era referente ao sistema de climatização de ar. Na edificação analisada, a capacidade do chiller instalado era de 1300 TR. Através de equações referente a troca térmica e calculo da demanda térmica, o volume do tanque encontrado para a demanda da edificação foi de 2327 m³. De acordo com a sua análise, através da correta operação entre chiller e TES, a economia alcançada por conta do deslocamento do horário de pico para fora pico, chegaria a 20%. Representando um ganho operacional e financeiro representativo.

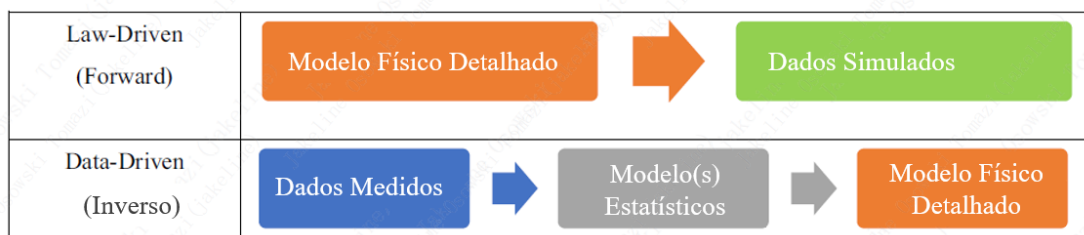
2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE EDIFICAÇÕES

Para entender modelos de simulação energética, é necessário inicialmente compreender modelos científicos em geral. Segundo Saltelli et al. (2008) modelos podem ser do tipo de diagnóstico ou prognóstico ou do tipo *Law-Driven* ou *Data-Driven*.

Modelos de diagnóstico são modelos baseados em identificar a natureza ou causa de algum fenômeno, ou seja, buscam entender as leis que governam determinado sistema. Ao contrário do modelo de prognóstico, que é utilizado para prever o comportamento de um sistema a partir de leis bem definidas que governam tal sistema.

No caso de um modelo *Law-Driven*, também chamado de *forward*, aplicam-se certas leis, tais como gravidade e transferência de calor e massa, que governam um sistema, e fornecem informações físicas detalhas, tais como propriedades e condições, a fim de prever seu comportamento. Ao passo que um modelo *Data-Driven*, também chamado de inverso, funciona em outro sentido, utiliza o comportamento do sistema como uma forma de prever as propriedades do sistema. Nesse sentido, um modelo *Data-Driven* utiliza uma quantidade menor de variáveis de entrada para descrever um sistema, enquanto que um modelo *Law-Driven*, normalmente, necessita de uma quantidade de parâmetros maior do que o disponibilizado. No entanto, um modelo *Law-Driven* possui como vantagem a possibilidade de avaliação do comportamento do sistema antes que de fato ela seja aplicada, já o modelo *Data-Driven* necessita que as variáveis sejam aplicadas para avaliar o modelo a partir do comportamento final. A Figura 8 apresenta uma comparação entre os modelos *Law-Driven* e *Data-Driven*.

Figura 8 - Modelo Law-Driven (forward) versus modelo Data-Driven (inverso).



Fonte: Adaptado de Coakley (2014).

Um modelo de simulação de desempenho energético de edificação (BEPS), utilizados para o *design* de edificações, geralmente são classificados como modelos do tipo prognósticos e *Law-Driven*, pois um BES é utilizado para prever um comportamento de uma sistema complexo sob leis bem definidas, tais como balanço energético, balanço de massa, condutividade, transferências de calor, entre outras (COAKLEY; RAFTERY; KEANE, 2014).

Já para o uso de um modelo *Data-Driven* no contexto da modelagem energética de edificações, este método utiliza dados medidos da edificação para produzir modelos que são capazes de prever o comportamento do sistema. O método em questão focado na previsão do uso de energia em edificações pode ser classificado em três principais abordagens: Black-box, Grey-box ou Detailed model calibration (REDDY; ANDERSEN, 2002).

- Black-box: se refere ao uso de modelos matemáticos ou estatísticos simples (por exemplo, regressão, redes neurais, etc.), que relacionam um conjunto de parâmetros de

entrada influentes (por exemplo, ocupação e clima) às saídas medidas. Os coeficientes de entrada do modelo são determinados de forma a produzir um algoritmo com capacidade de prever o comportamento do sistema. É importante observar que esses coeficientes de entrada não têm uma ligação direta com um parâmetro definitivo no ambiente físico.

- Grey-box/estimação de parâmetros: As abordagens grey-box diferem-se das abordagens black-box no sentido de que utilizam certos parâmetros-chave (ou agregados) do sistema identificados a partir de um modelo físico do sistema.
- Calibração detalhada do modelo: A abordagem final utiliza um modelo descritivo completo baseado em leis de um sistema preditivo de desempenho de um edifício e ajusta as várias entradas para corresponder aos dados medidos. Essa abordagem fornece a previsão mais detalhada do desempenho do edifício, dadas à disponibilidade de dados de entrada de alta qualidade. Como está vinculado a parâmetros físicos do edifício, do sistema e do ambiente, fornece uma plataforma para avaliar o impacto de alterações nesses parâmetros (por exemplo, análise de retrofit).

Ainda Coakley *et al.* (2014) indica que para realizar a simulação de desempenho energético de edificações completas, existem algumas ferramentas de cálculo que permitem a análise de critérios de desempenho específicos da edificação, tais como temperatura e umidade do ambiente, com influência de entradas externas, como clima, ocupação e infiltração. Cálculos detalhados de balanço térmico são realizados em intervalos de tempo discretos com base nas propriedades físicas do edifício e dos sistemas mecânicos, bem como nessas entradas externas dinâmicas (clima, ocupação, iluminação, cargas de equipamentos etc.). Esses cálculos geralmente são realizados ao longo de um ano completo. Essas ferramentas se enquadram na categoria de ferramentas de simulação prognóstica baseadas em leis. Algumas das principais ferramentas utilizadas para desenvolvimento de um BES são:

- DOE-2 (WINKELMANN *et al.* 1993) é um programa de simulação aberto para previsão do uso horário de energia e o custo de energia de uma edificação através de informações meteorológicas horárias, descrição geométrica e do sistema de HVAC e tarifas do serviço de energia. Seu desenvolvimento foi financiado pelo Departamento de Energia dos EUA (DOE).
- EnergyPlus (CRAWLEY *et al.*, 2001) é uma ferramenta avançada de simulação de energia de toda a edificação, desenvolvida com base no trabalho realizado no DOE-2.

O programa possui a mesma funcionalidade que o DOE-2, produzindo custos de energia por hora (ou sub-hora) de uma edificação com base nas informações de entrada do sistema. Ele também incorpora muitos recursos avançados não disponíveis no DOE-2, como fluxo de ar multizona e amplos recursos de especificação de HVAC.

- TRNSYS (KLEIN *et al.*, 1979) é um programa de simulação de sistema transitório com uma estrutura modular que implementa uma abordagem de simulação baseada em componentes. Os componentes podem ser sistemas simples, como bombas ou ventiladores, ou sistemas complexos, como edificações com várias zonas.
- ESP-r (ESRU, 1974) é uma ferramenta de modelagem integrada para a simulação do desempenho térmico, visual e acústico de edificações. Semelhante ao EnergyPlus e ao DOE-2, o ESP-r requer informações especificadas pelo usuário em relação à geometria do edifício, sistemas HVAC, componentes e cronogramas. Ele oferece suporte ao equilíbrio de energia explícito em cada zona e em cada superfície, além de incorporar recursos de análise de sensibilidade e incerteza inerentes.

Os quatro programas de simulação acima representam as ferramentas mais comuns encontradas quando se trata de análise de desempenho energético de edificações. Contudo, existem vários outros programas disponíveis, alguns sendo direcionados para algum tipo de aplicação, como por exemplo a simulação de sistema de HVAC, ganho solar, *daylighting*, etc (CRAWLEY *et al.*, 2008).

Nesse sentido, as ferramentas BEPS foram principalmente desenvolvidas para a análise na fase de projeto de uma edificação, entretanto a simulação está se tornando cada vez mais relevante nas fases pós-construção, como comissionamento e gerenciamento e controle operacional (NETO; FIORELLI, 2008). Como os modelos BEPS são baseados nos dados reais físicos e não em formulações matemáticas ou estatísticas arbitrárias, eles têm várias vantagens inerentes (BERTAGNOLIO; ANDRE; LEMORT, 2010). Um dos principais benefícios dos modelos de simulação detalhados sobre os modelos estatísticos é sua capacidade de prever o comportamento do sistema em condições não observadas anteriormente. Dessa forma, o uso de modelos de simulação permite modificações em critérios específicos com o objetivo de prever consumo energético, implementar soluções de *retrofits* e avaliar medidas para reduzir o consumo da edificação. Dessa forma, um BEPS permite analisar estratégias para redução do consumo energético antes de ser de fato implementado (NETO; FIORELLI, 2008). A simulação permite também que os analistas façam alterações no projeto ou operação do edifício enquanto

monitoram simultaneamente o impacto no comportamento e desempenho do sistema. Apesar dos benefícios potenciais e do progresso significativo que tem sido feito no desenvolvimento de programas de simulação avançados capazes de modelar sistemas e ambientes complexos, ainda persistem vários problemas que inibem sua adoção generalizada (COAKLEY; RAFTERY; KEANE, 2014).

Atualmente, os modelos de simulação de desempenho energético de edifícios são subutilizados na indústria por várias razões. Estes podem ser amplamente agrupados em duas principais categorias de modelagem e calibração, conforme descrito a seguir.

Segundo Coakley *et al.* (2014), os principais problemas relacionados à modelagem de BEPS são agrupados nos seguintes grupos:

- Padrões: Falta de compreensão e uso consistente de métodos padronizados.
- Despesa: O tempo, conhecimento, experiência e custo necessários para desenvolver modelos precisos de geometria de construção e sistemas HVAC.
- Integração: Má integração entre vários pacotes de programas de modelagem 3D (como Autodesk Revit e ArchiCAD) e pacotes de simulação BEPS (como EnergyPlus, TRNSYS e Modelica).

Por sua vez, os principais problemas relacionados à calibração de BEPS são agrupados nos seguintes grupos (COAKLEY; RAFTERY; KEANE, 2014):

- Padrões: A falta de critérios detalhados para o modelo de calibração. Os padrões atuais têm apenas uma faixa aceitável de erros. No entanto, não há orientação para incerteza de entrada, calibração de submedição ou de zona.
- Despesa: O processo de desenvolvimento e calibração tende a onerar tempo e dinheiro, porque há um esforço grande para coletar todos os dados na auditoria e não há cadeias de ferramentas padrão integradas ou formatos de arquivo no momento.
- Simplificação: O processo de calibração é um modelo superespecífico - muitos dados de entrada - e subdeterminado - poucos pontos de validação. Além disso, alguns dados de entrada não são possíveis de se obter ou são imensuráveis. O desafio neste ponto é simplificar o modelo e garantir a precisão.
- Inputs: A qualidade dos dados de saída está diretamente relacionada com a qualidade dos dados de entrada (*Garbage-in, Garbage-out*). Sabendo que modelos detalhados demandam dados de entrada de alta qualidade, e que há uma dificuldade para conseguir

tal informação, é necessário selecionar as entradas disponíveis e colocá-las em um grau razoável de precisão sem comprometer a qualidade da saída do modelo.

- Incerteza: Poucos estudos abordam o tema da incerteza em seus modelos. Isso corrobora para BEPS com pouca confiabilidade.
- Identificação: Identificar problemas e discrepâncias entre as previsões do modelo e os dados de medição é uma etapa difícil no processo de calibração. Atualmente, o processo de calibração é frequentemente descrito como um método ad-hoc que requer várias iterações de envolvimento manual pragmático do usuário com base no conhecimento ou opinião especializada. Essa técnica geralmente não é bem definida, pois o analista faz ajustes de modelo com base no julgamento humano, em vez de dados quantificáveis. Embora várias pesquisas na literatura tenham tentado fornecer estratégias para encontrar e corrigir erros de calibração, isso geralmente é difícil de descrever.
- Automação: A falta de ferramentas integradas e métodos automatizados dificulta a calibração. Por um lado, a automação beneficiaria este procedimento, por outro, muitos procedimentos requerem conhecimento ou insumos humanos

A discrepância entre o modelo BEPS previsto e o uso real de energia de uma edificação prejudica a confiabilidade das previsões dos modelos e reduz a adoção de ferramentas de desempenho energético durante todas as etapas, desde o projeto, seguindo para o comissionamento e, por fim, operação (RAFTERY; KEANE; COSTA, 2011). Algumas diferenças nos modelos preditos e medidos podem ser explicadas por diferentes razões:

- Fluxo de ar na envoltória da edificação, falha do equipamento mecânico (ventilador e performance dos equipamentos de refrigeração por conta de cargas parciais) e calor condutivo excedendo a previsão durante o projeto da edificação são três elementos que impactam significativamente a divergência causada pelo medido e simulado. Somado a isto, a diferença dos resultados também é ocasionado pelo uso distinto de equipamento do que o padrão de funcionamento do projeto (NORFORD *et al.*, 1994).
- Ineficiência da operação dos sistemas de HVAC, podendo ser o *set-up* de temperatura da descarga do ar muito baixa, aquecimento e resfriamento simultâneos dos fluxos de ar, entrada excessiva de ar externo ou operação inadequada do economizador (LIU; CLARIDGE, 1998).

Para que os modelos BEPS possam ser utilizados com algum grau de confiança, é necessário que o modelo existente represente de forma aproximada o comportamento real do edifício em estudo. Esse ponto pode ser atingido por meio da calibração do modelo, cujo objetivo é reduzir as discrepâncias entre a previsão do BEPS e o desempenho medido do edifício.

Salienta-se que, por conta da complexidade de eventos físicos que direcionam o comportamento térmico e a grande quantidade de dados de entrada, este tipo de investigação necessita de uma visão multidisciplinar dos usuários (LYU *et al.*, 2021). Além disso, a calibração de programas de simulação de desempenho energético de edifícios - envolvendo diversos parâmetros de entrada – com os dados de energia de edifícios é um problema altamente subdeterminado que produz várias soluções não únicas (COAKLEY; RAFTERY; KEANE, 2014; REDDY; MAOR; PANJAPORNPON, 2007a). Como resultado, as metodologias e resultados de calibração muitas vezes não são discutidos em detalhes em muitos estudos de caso, carecendo de rastreabilidade.

Por outro lado, a calibração de modelos possui um valor relevante para diversos campos de pesquisa, pois permite que pesquisadores investiguem medidas de conservação energética (ECM) para buscar conforto térmico, eficiência energética e despesas de menor custo que trazem resultados significativos para a edificação (FASIUDDIN; I. BUDAIWI; ABDU, 2012). A medição dos impactos das ações de eficiência energética é facilitado com o uso de modelos de simulação calibrado, o que traz oportunidades para alterar o resultado predito das simulações (LIU; CLARIDGE, 1998). Na seção 2.7 será apresentada as abordagens atuais para a calibração do modelo e suas limitações.

2.5 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS COMPUTACIONAIS

Para avaliar o desempenho de um modelo energético de edificação, o resultado de saída da simulação deve estar de acordo com os parâmetros definidos em guias, que, por sua vez, utilizam dois indicadores estatísticos para a análise (PAN; HUANG; WU, 2007). Atualmente existem três diretrizes que recomendam utilizar indicadores estatísticos para categorizar a performance de um modelo (DA SILVA; NETO; SAUER, 2021). Esses indicadores estatísticos são o Erro de Viés Médio (sigla em inglês, MBE) e o Coeficiente de Variação da Raiz do Erro Quadrático Médio (sigla em inglês, CV RMSE). Eles são utilizados em conjunto para a análise

do modelo, pois assim é possível mitigar efeitos de cancelamento que pode mascarar a validade do modelo (COAKLEY; RAFTERY; KEANE, 2014).

Um modelo de simulação é considerado calibrado quando estes dois índices estão dentro do intervalo ditado pela sua diretriz. Quando os índices atendem estes critérios, o modelo de simulação é considerado calibrado (DA SILVA; NETO; SAUER, 2021). As três normativas que estão apresentadas na Tabela 2 indicam os seus critérios de acuracidade considerando uma análise mensal ou horária. Os três guias são Guideline 14 (2002) da *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE), Manual de Medição e Verificação (M&V) (2011) da *Efficiency Valuation Organization* (EVO) e M&V (2015) do *Department of Energy* (DOE). A calibração de edificações, por sua vez, normalmente utiliza o indicador da ASHRAE para validar a acuracidade do modelo de simulação (ASHRAE, 2002).

No caso da escolha entre o critério mensal ou horário, a decisão estará relacionada com o tipo de amostra dos dados reais disponibilizados. Dessa forma, obtendo-se dados horários pode-se seguir por ambas análises, horária e mensal, ao passo que ao obter dados em intervalos maiores do que o horário e até o intervalo mensal, a escolha do índice será mensal (COAKLEY; RAFTERY; KEANE, 2014).

Tabela 2 - Critérios e limites de indicadores para diferentes diretrizes de calibração.

Documento Normativo	Critério Mensal (%)		Critério Horário (%)	
	MBE	CV RMSE	MBE	CV RMSE
Guideline 14 – ASHRAE	± 5	15	± 10	30
Manual M&V – EVO	± 20	-	± 5	20
Manual de M&V - DOE	± 5	15	± 10	30

Fonte: Aaptado de Da Silva (2021).

Embora o modelo seja considerado calibrado assim que seus indicadores estatísticos estejam dentro dos limites estabelecidos, isso não significa que haverá apenas um modelo de edificação. Distintas soluções podem chegar no modelo calibrado (COAKLEY; RAFTERY; KEANE, 2014; REDDY; MAOR; PANJAPORNPNON, 2007c). Outro ponto de destaque, é o fato de que um modelo pode ser considerado calibrado, porém pode não estar preparado e coerente em todas as suas especificações. Esse ponto fica em aberto nas discussões trazidas sobre calibração disponíveis em literatura e, até agora, não há orientações claras sobre como lidar com esse aspecto, indicando que mais pesquisas no campo da calibração precisam ser realizadas (RAFTERY; KEANE; O'DONNELL, 2011).

2.5.1 Abordagens existentes para a calibração de uma simulação de desempenho energético de edificações

As principais técnicas de calibração de simulação do desempenho energético de edificações foram inicialmente classificadas por Clarke *et al.* (1993) e adaptadas por Reddy (2006). As quatro principais classes que definidas por eles são:

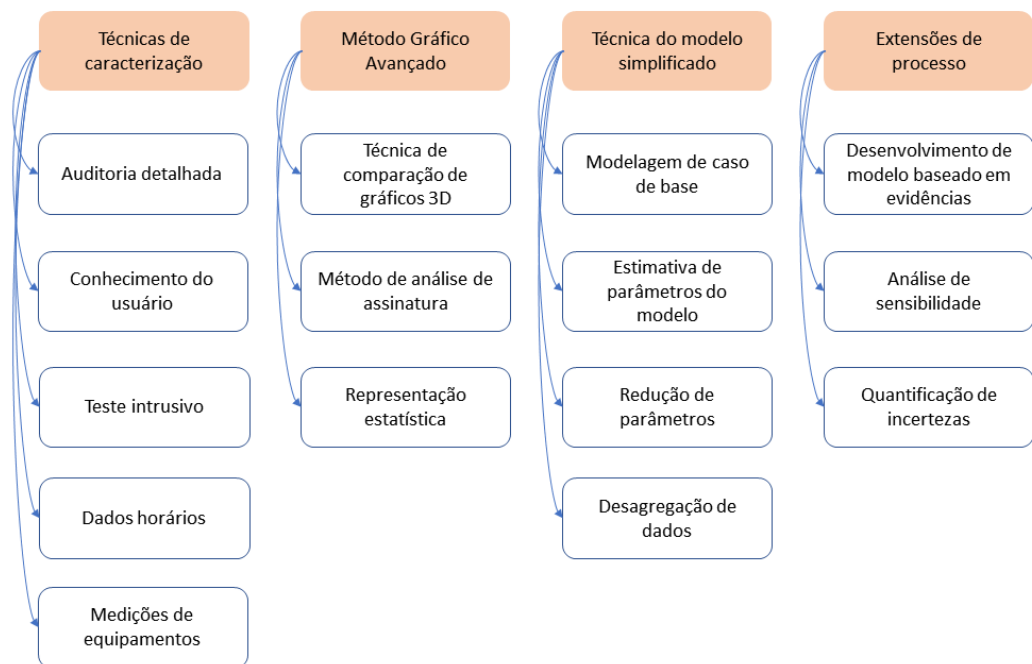
- (i) Calibração manual, iterativa e com intervenções pragmáticas;
- (ii) Calibração baseada na comparação de informação gráfica;
- (iii) Calibração baseada em testes especiais e processos analíticos;
- (iv) Método de calibração analítica ou matemática.

Coakley *et al.* (2014) indica que uma forma de classificação de abordagens que buscam ajustar o modelo de simulação aos dados medidos podem ser ainda definidas, de forma geral, em manual ou automática. Na definição de uma abordagem manual tem-se que uma intervenção iterativa pragmática é seguida. Nesse sentido, não são utilizados métodos que aplicam calibração automática por meio de métodos matemáticos ou estatísticos. Ao contrário da abordagem manual, há a abordagem automática em que o método utilizado aplica, de alguma forma, um processo automático que independe da gestão do usuário. Ambos os métodos, manual ou automático, utilizam alguma ferramenta ou técnica analítica para suportar o processo de calibração, enquanto que o processo automático aplica técnicas estatísticas e matemáticas para alcançar seus objetivos.

2.5.2 Ferramentas e técnicas analíticas

As ferramentas e técnicas analíticas podem ser classificadas como direcionadas pelo usuário, mas também podem ser aplicadas em alguma parte no processo de calibração automática. Um esquema das principais técnicas analisadas por Coakley *et al.* (2014) pode ser verificado na Figura 9.

Figura 9 - Ferramentas e técnicas analíticas de calibração.



Fonte: Adaptado de Coakley *et al.* (2014).

Nesse sentido, as principais vertentes podem ser classificadas da seguinte maneira:

- Técnica de caracterização: são técnicas baseadas nas características do modelo físico e nas características operacionais da edificação simulada;
- Método Gráfico Avançado: uso de representação gráfica dos dados ou indicadores estatísticos;
- Técnica do modelo simplificado: técnicas que tem como objetivo reduzir a complexidade do modelo de simulação reduzindo ou agregando o número de variáveis de simulação.
- Extensões de processo: uso de processos ou técnicas padrões para melhorar a simulação e/ou o processo do modelo de calibração.

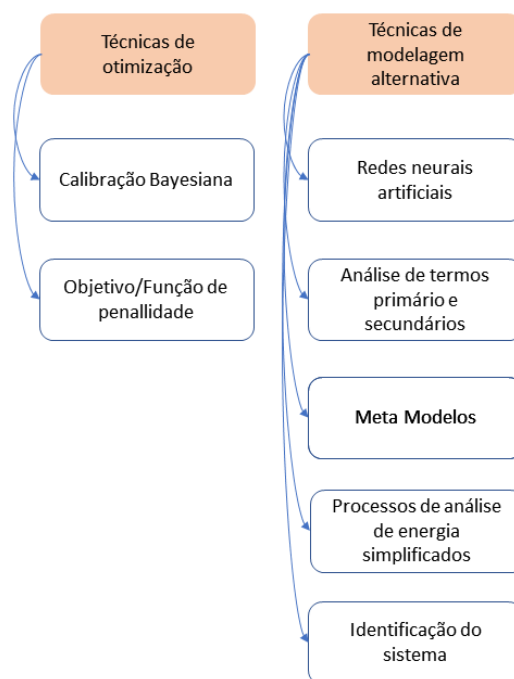
2.5.3 Técnicas de calibração matemáticas e estatísticas

Os métodos que utilizam técnicas matemáticas e estatísticas estão ganhando participação nas abordagens de calibração de modelos (COAKLEY; RAFTERY; KEANE, 2014). As aplicações que utilizam essa abordagem em qualquer parte do processo são classificadas como

automáticas e podem ser divididas em duas categorias principais. Na Figura 10 são apresentadas as categorias e seus respectivos sub-itens.

- Técnicas de otimização: Normalmente utilizadas para métodos que, em geral, buscam o desempenho predito com programas otimizadores;
- Técnicas de modelagem alternativa: Este item destina-se a modelos de calibração detalhados, descritos como abordagens black-box ou grey-box.

Figura 10 - Técnicas de calibração matemáticas e estatísticas.



Fonte: Adaptado de Coakley *et al.* (2014).

A técnica de automação é utilizada para melhorar a eficiência da calibração de modelos, mas nenhuma abordagem genérica ainda recebeu o consenso de toda a comunidade no momento. A principal razão é que uma calibração automatizada puramente baseada em matemática carece de explicação física, o que significa que o modelo calibrado provavelmente tem um grande erro em certos valores físicos únicos, apesar de uma boa concordância geral com os dados de medição (LYU *et al.*, 2021).

Dave *et al.* (2004) desenvolveu uma abordagem estatística para caracterizar a incerteza em previsões feitas com o auxílio de um modelo de simulação computacional. Normalmente, o

código de simulação computacional modela um sistema físico e requer um conjunto de entradas - algumas conhecidas e especificadas, outras desconhecidas. No caso da pesquisa de Dave (2004), uma quantidade limitada de dados de campo do sistema físico real estava disponível. Dessa forma, foi utilizada uma formulação Bayesiana e modelos de processo gaussianos para modelar funções desconhecidas das entradas do modelo. A estimação foi realizada utilizando um método de Monte Carlo da cadeia de Markov. Essa metodologia foi aplicada a dois exemplos: um acelerador de partículas carregadas e um processo de soldagem por pontos e apresentou um resultado satisfatório.

Lyu *et al.* (2021) projetaram um conjunto de procedimentos para automatizar o processo de calibração de modelos de energia de construção com base no método de ajuste de cronograma e gráfico direcionado assinado (SDG). Esse método codificou a experiência e a lógica humana e as incorporou nos módulos de calibração computacional para combinar as vantagens das abordagens tradicionais e automatizadas. As operações específicas do processo de calibração foram apresentadas através de um estudo de caso.

Liu *et al.* (1998) apresentou resultados de casos de estudo onde foram aplicados modelos de simulação de sistemas HVAC para identificar e corrigir ineficiências nos sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado de um hospital em Galveston, no Texas, EUA. Em um dos casos de estudo, Liu *et al.* (1998) analisou um edifício composto por escritórios onde os ocupantes frequentemente reclamavam de temperaturas desconfortáveis e da má qualidade do ar interno. Após a aplicação do modelo de simulação, foi identificado que o sistema HVAC estava operando com uma vazão de ar muito baixa, o que resultava em temperaturas irregulares e má qualidade do ar interno. Com a correção da vazão de ar, o sistema HVAC pôde operar de forma mais eficiente e a qualidade do ar interno foi significativamente melhorada.

Percebe-se que existe uma variedade muito grande de técnicas e ferramentas possíveis de serem aplicadas ao método de calibração. Como o desenvolvimento da pesquisa se dará através de uma técnica manual e através do método baseado em evidências, serão apresentados alguns estudos neste sentido que serviram como base do desenvolvimento da pesquisa.

2.5.4 Método baseado em evidências

Os métodos mais utilizados nos últimos anos dentro do campo da calibração de modelos são principalmente do tipo manual, onde as alterações são feitas a partir da decisão do usuário, junto do método baseado em evidências (COAKLEY; RAFTERY; KEANE, 2014). A técnica

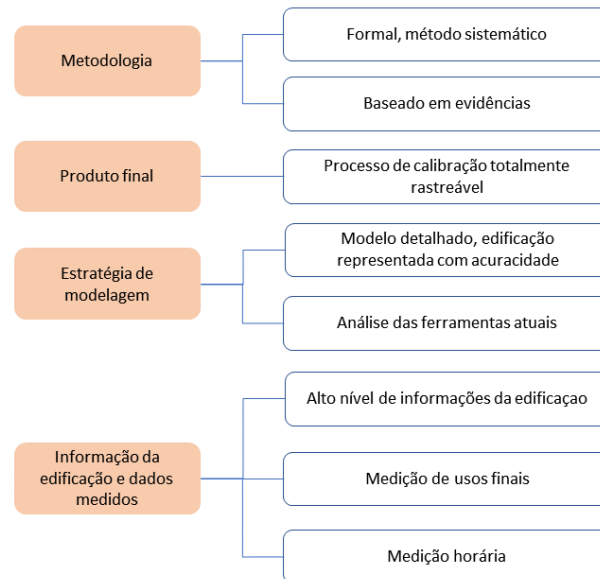
baseada em evidências é uma abordagem sistemática que possui como objetivo alcançar um modelo calibração baseado em informações com fontes de referências sólidas sobre a edificação. Apesar do processo produzir um único modelo determinístico para um processo estocástico, como por exemplo a operação da edificação, essa abordagem pode produzir conclusões muito úteis sobre os usos finais e fonte significativa de pesquisas para desenvolvimento futuro (RAFTERY; KEANE; O'DONNELL, 2011).

A metodologia proposta por Raftery *et al.* (2011) está apresentada de forma resumida na Figura 11. A metodologia foi desenvolvida a partir das melhores práticas existentes no campo da calibração, com um adicional de rastreabilidade. É muito comum verificar a calibração em modelos que não segue uma metodologia bem definida e, principalmente, sem rastreio das alterações realizadas que permitam outros usuários realizem simulações semelhantes. Sem uma estratégia sistemática, é difícil obter modelos de simulação calibrados detalhados de alta qualidade (RAFTERY; KEANE; COSTA, 2011).

Neste sentido, a técnica apresentada por Raftery, conforme apresentada na Figura 11, é segmentada por metodologia, produto final, estratégia de modelagem e informação da edificação e dados do modelo. A metodologia leva em conta um padrão formal e sistemático, sendo que a adição/alteração de novas variáveis deve ser consistente; o produto final é um processo de calibração rastreável; a estratégia de abordagem é o desenvolvimento de um modelo detalhado utilizando ferramentas atuais para tal; e, por fim, a informação da edificação e dados medidos são compostos por um grau elevado de detalhes da edificação, com medição dos usos finais em base horária.

O princípio do método de evidências é baseado nas decisões de alteração do modelo ao longo do processo de calibração. Para melhorar a confiabilidade da calibração do modelo, alterações nas variáveis de entrada devem somente serem realizadas de acordo com a disponibilidade de alguma evidência bem definida e que siga uma prioridade (RAFTERY; KEANE; O'DONNELL, 2011). Ou seja, as evidências são organizadas em uma hierarquia, garantindo que a entrada de dados do modelo seja confiável. Um estudo com múltiplas entradas, mas sem ponderação distinta dos inputs, pode não atingir os índices que indicam que um modelo está calibrado (SUN *et al.*, 2014).

Figura 11 – Metodologia proposta desenvolvida para o método baseado em evidências.



Fonte: Adaptado de Rafterty *et al.* (2011)

Rafterty et al (2011b) aplicou a metodologia do método de evidência em seu estudo de calibração de modelo de simulação energética. Os autores calibraram uma edificação de 30.000m², de 4 andares, utilizada como escritório na Irlanda. Os autores possuíam medições de iluminação, equipamentos e do sistema de HVAC em intervalo horário ao longo do ano de 2007, garantindo um alto nível de detalhe de dados. Para a calibração do modelo foi utilizado o programa EneryPlus, acompanhado do programa de rastreabilidade de alterações, chamado Tortoise. As análises de calibração do modelo foram realizadas tanto para a edificação total, quanto para iluminação e HVAC separadamente.

Para chegar no modelo calibrado, os autores categorizaram as informações disponíveis de acordo com a sua prioridade em questão de confiabilidade. Algumas delas foram medições horárias, questionários e inspeção no local, inspeções, plantas da edificação, entre outros. Ao total foram realizadas 23 simulações com o objetivo de encontrar o melhor indicador de MBE e CVRMSE possível e que estivesse dentro dos padrões exigidos pela ASHRAE Guideline 14. O resultado foi muito satisfatório, chegando a -1% para o MBE e 1,35% e 1,87% para o CVRMSE mensal e horário, respectivamente.

Da Silva et al. (2021) propôs uma metodologia para hospitais através do estudo de caso de um hospital público localizado no Brasil. O estudo indicou a dificuldade de uma padronização no método de calibração, deixando uma falha nas abordagens de calibração e de

reprodução de outros modelos. Sendo assim, os autores optaram por seguir na abordagem baseada em evidências. O estudo separou a análise em duas fases, por conta dos diferentes tipos de sistema de HVAC na edificação. Uma das áreas do hospital utiliza sistemas unitários de ar condicionados do tipo split e uma outra área utiliza sistemas de HVAC maiores e centralizados. A avaliação foi realizada em base mensal, por conta das informações de medição disponibilizadas, e seguiu os requisitos estipulados pela ASHRAE Guideline 14.

A calibração seguiu um método iterativo e de enriquecimento do modelo de simulação através das informações disponibilizadas em ordem hierárquica. Algumas das informações disponibilizadas foram o consumo elétrico total mensal da edificação, medição de 19 aparelhos do tipo split, pesquisas e inspeção visual, fotografias, folha de dados do chiller, entre outros. O estudo chegou no modelo calibrado e apontou melhorias no processo de calibração.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO REFERENCIAL TEÓRICO

Conforme demonstrado no referencial teórico deste trabalho, a calibração de modelos de simulação é uma área que ainda carece de estudos. A sua aplicação fornece um grande benefício para o setor de edificações, podendo ser utilizado na previsão de demandas, analisar estratégia políticas e de retrofits.

De modo geral, a calibração é uma área ainda em desenvolvimento. Diversas técnicas foram apresentadas, mas o foco deu-se na abordagem baseada em evidência, pois é um processo bem definido e rastreável, compatíveis com o que será realizado ao longo desta pesquisa. O programa de simulação mais utilizado é o EnergyPlus e a diretriz da ASHRAE 14, que norteia o desempenho do modelo para indicar se o mesmo está calibrado, é a mais utilizada para a avaliação da simulação do desempenho de modelagem de edificações.

Com relação a tipologia de modelos calibrados, percebe-se que os estudos sobre calibração, em sua maioria, foram destinados para escritórios, não havendo ainda estudos em maior escala para outras tipologias, como shopping centers.

Os shopping centers, por sua vez, foram apresentados de forma extensa na revisão de literatura, onde foi possível verificar que os consumos finais são majoritariamente divididos em sistema de HVAC, iluminação, equipamentos e escadas/elevadores. A maior parcela do consumo final de edificações para este uso é composta pelo sistema de HVAC e iluminação.

3 MÉTODO

Com base nos objetivos propostos, o método utilizado para o desenvolvimento da pesquisa foi dividido em três partes principais. A primeira parte foi referente à definição da edificação, na qual foram levados em consideração a tipologia, as características e os dados disponibilizados em documentos e visitas in loco. A segunda seção se concentrou na definição dos parâmetros de entrada iniciais e no rastreamento de onde essas informações foram coletadas. Por fim, a terceira seção consistiu na definição da maneira como os resultados foram analisados e verificados, a fim de caracterizar o modelo de simulação como calibrado.

Para a execução dessas etapas, foram utilizadas as ferramentas EnergyPlus (versão 9.1), OpenStudio (versão 2.9) e SketchUp Make 2017. O EnergyPlus é um programa computacional que permite realizar análises termoenergéticas, como por exemplo prever a carga térmica necessária para aquecer ou refrigerar um ambiente. O OpenStudio, por sua vez, é uma ferramenta de programa criada para dar suporte à modelagem de energia de edificações utilizando o EnergyPlus como premissa de operação. Por fim, o SketchUp é um programa de desenho 3D que auxilia na construção do modelo computacional, e que pode ser conectado ao plugin do EnergyPlus para uma análise integrada. A sinergia entre esses três programas, que foi aplicada neste trabalho, permitiu a criação do modelo 3D no SketchUp sincronizado ao OpenStudio para a utilização de sua interface, que utiliza na sua base de cálculo o programa EnergyPlus.

Por fim, este trabalho, adotará como padrão o uso da expressão carga de base como a carga relacionada ao consumo de iluminação, equipamentos em geral, escadas rolantes e elevadores, que independem da temperatura de bulbo seco externa.

3.1 CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO

Este estudo aborda um empreendimento comercial classificado pela Associação Brasileira de Shopping Centers (ABRASCE) como um shopping center, uma vez que possui como base uma Área Bruta Locável (ABL) superior a 5.000 m², com múltiplas unidades comerciais, administração centralizada e prática de aluguel fixo e percentual. O estudo de caso refere-se especificamente a um shopping center localizado em Porto Alegre, Rio Grande do Sul, caracterizado pela ABRASCE como um empreendimento tradicional e de mega porte, pois

possui mais de 60.000 m² de ABL. As Figuras 12 e 13 apresentam, respectivamente, a vista superior e imagem 3D da edificação.

O shopping center em questão iniciou suas operações no final de 2008, com uma área total de terreno de 187.874 m², sendo 152.289 m² de área construída e 72.148 m² de ABL. Com dois andares, abriga mais de 225 lojas, incluindo 21 lojas âncoras e megalojas, além de um espaço multiuso. Sua construção horizontal apresenta um projeto arquitetônico moderno. Ainda, é importante ressaltar que o empreendimento possui vagas de estacionamento compatíveis com a legislação regional aplicável.

Essas informações sobre o empreendimento são essenciais para a compreensão do contexto no qual a pesquisa é realizada e permitirão uma análise precisa dos resultados obtidos.

Figura 12 – Vista superior da edificação.



Fonte: Google Earth (2023).

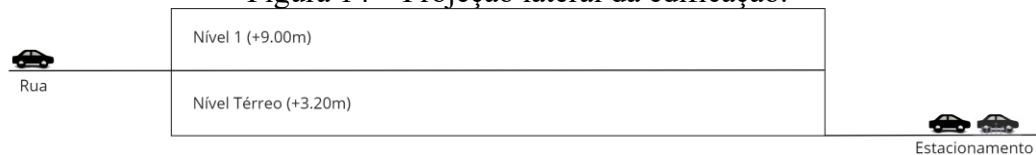
Figura 13 – Edificação em imagem de satélite 3D.



Fonte: Google Earth (2023).

O projeto arquitetônico da edificação em estudo apresenta particularidades que merecem ser destacadas. Em razão do declive do terreno, o andar térreo é considerado um “semi-subsolo”, pois somente uma das paredes tem saída para o ambiente externo, enquanto as demais estão em contato com o solo (Figura 14). Por sua vez, o primeiro andar apresenta todas as paredes externas. O acesso ao público é restrito na fachada leste, sendo a entrada principal da edificação localizada na fachada oeste. As janelas e portas automáticas estão alocadas na fachada oeste do primeiro andar, enquanto a fachada leste possui portas de acesso apenas no andar térreo. As paredes Norte e Sul não possuem janelas e portas de acesso. Além disso, abaixo do andar térreo há vagas de estacionamento cobertas.

Figura 14 – Projeção lateral da edificação.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Uma característica relevante da edificação é a ampla clarabóia instalada no telhado, que percorre grande parte da sua extensão, possibilitando um melhor aproveitamento da luz natural nos corredores. Contudo, essa particularidade torna o ambiente sensível à absorção de calor, o

que é relevante para a construção do modelo termoeenergético. A Figura 15 apresenta a visão interna de um dos corredores do shopping center na qual aparece a extensa clarabóia indicada anteriormente.

A cor predominante das paredes internas e externas, teto, forro e piso é o branco ou creme claro. Tal escolha contribui para a iluminação do ambiente e para a sensação de amplitude do espaço, além de ser uma coloração de baixa absorção de calor.

Figura 15 – Vista do interior do Shopping Center.



Fonte: Google Images (2022).

No que se refere aos aspectos operacionais do edifício em questão, é importante salientar que, nos dias úteis da semana e aos sábados, o horário de funcionamento do shopping center é das 10h às 22h para o público externo. Já aos domingos, o horário de abertura se dá às 11h, enquanto o fechamento ocorre às 21h.

No que diz respeito à iluminação do shopping center, é válido destacar que, mesmo durante o período diurno, a maior parte das luzes permanece acesa, exceto pelas lâmpadas do estacionamento que acendem ao entardecer. Além disso, desde 2017, todas as luzes do edifício são de tecnologia LED, o que resultou em uma significativa redução no consumo total de energia da edificação, conforme relato do coordenador de manutenção.

Dentre os principais equipamentos elétricos presentes no shopping center, destacam-se os motores elétricos da escada rolante e do elevador, que totalizam em 6 e 3 unidades, respectivamente.

Em relação aos sistemas de climatização, o shopping center possui um sistema de HVAC com dois chillers centrífugos, cada um com capacidade de refrigeração de 550 toneladas

com condensação a água. Este sistema de HVAC é responsável pela climatização das áreas comuns, lojas e praça de alimentação. Há, ainda, um outro sistema de HVAC específico para o suprimento da demanda do cinema, que não será objeto de análise neste estudo, tendo em vista que possui uma entrada de energia individual. Além disso, o edifício conta com um Armazenamento de Energia Térmica (TES) de água gelada em um reservatório com capacidade de 3.750 m³ localizado na área externa.

O edifício em questão possui quatro subestações, ou entradas de energia, destinadas a diferentes cargas internas, tais como lojas âncoras e sala multiuso. Para os propósitos deste estudo, foram disponibilizadas apenas informações relativas à subestação 1, que representa a principal entrada de energia do shopping center. A referida subestação é responsável pelo suprimento de energia das áreas comuns, lojas, praça de alimentação e do principal sistema de HVAC. Vale salientar que o espaço multiuso, lojas âncoras, cinema e outros espaços pontuais possuem suas próprias entradas de energia.

3.2 DADOS DISPONÍVEIS DA EDIFICAÇÃO

O processo de calibração exige a arrecadação de uma grande quantidade de informações. Esse levantamento auxiliará no método que será desenvolvido neste trabalho, devido a ser manual e baseado em evidências. Dessa forma, as variáveis adicionadas diretamente no modelo ou verificadas de forma indireta (por exemplo, inspeções) colaboram no ajuste da simulação e na compreensão do padrão de uso da edificação. Sabendo disso, foram coletadas o máximo de informações da edificação, sendo estas disponibilizadas no formato de medição, projeto ou observação. No formato de medição, foram obtidos dados de consumo da subestação 1, que abastece grande parte do Shopping, consumo do sistema de HVAC e a memória de massa, que é uma medição realizada pela distribuidora em intervalos de 15 minutos. Já no formato de projeto, foram disponibilizadas plantas arquitetônicas, elétrica e luminotécnica, *as-built* do sistema de HVAC e os datasheets que compõem o seu sistema. Por sua vez, no formato de observação, foi disponibilizado pelo shopping center a ocupação diária das pessoas, controle este dado por câmeras de monitoramento. Esse dado permite avaliar a correlação entre ocupação, consumo e período do ano. Além disso, a inspeção física à edificação permitiu acompanhar de perto o padrão de uso, verificação dos equipamentos e efetuar inspeções locais diretamente com os responsáveis pela operação do shopping center. No total, foram realizadas três visitas ao shopping center em momentos distintos, e foram realizadas conversas com pelo

menos 5 pessoas de diferentes frentes, incluindo o Diretor de Operação, Gerente de Operação, Coordenador de Operação, Operador e Equipe de Manutenção.

As informações disponibilizadas e coletadas do Shopping Center estão apresentadas na Tabela 3, indicando o período em que os dados medidos foram disponibilizados.

Tabela 3 – Dados disponibilizados da edificação.

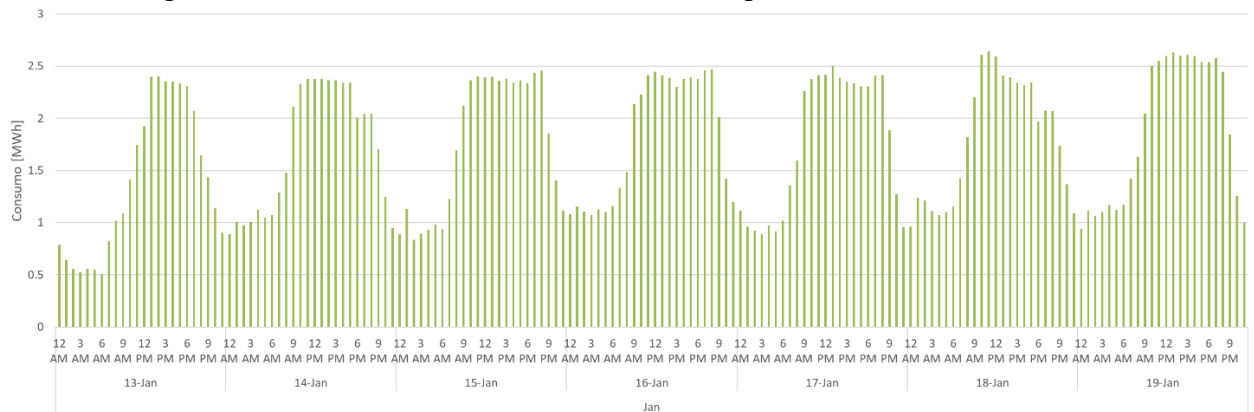
Dado disponível	Tipo de dado	Intervalo	Período
Consumo subestação 1	Medição	Mensal	2016 a maio 2021
Memória de massa	Medição	15 min	2019
Consumo HVAC	Medição	Mensal	2016 a maio 2021
Ocupação da edificação	Observação	Diário	2019 – 2021 (meses de janeiro à junho)
Planta baixa	Projeto	-	-
Planta elétrica	Projeto	-	-
Planta luminotécnica	Projeto	-	-
Potência dos motores de escada rolante e elevador	Projeto	-	-
<i>As-built</i> ar-condicionado	Projeto	-	-
<i>Datasheets</i> de <i>chillers</i> , bombas, <i>fan coils</i> , inversores, torre de resfriamento, ventiladores	Projeto	-	-
Inspeção <i>in loco</i>	Observação	-	-

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Iniciando pela memória de massa, essa é uma medição realizada pela concessionária na entrada de energia da edificação a qual apresenta medições em intervalos de 15 minutos. Os consumidores podem ter acesso a essa informação solicitando diretamente à distribuidora local. Além disso, outra forma de obter esses dados é através da instalação de medidores próprios que tenham a capacidade analítica de capturar os dados no intervalo desejado.

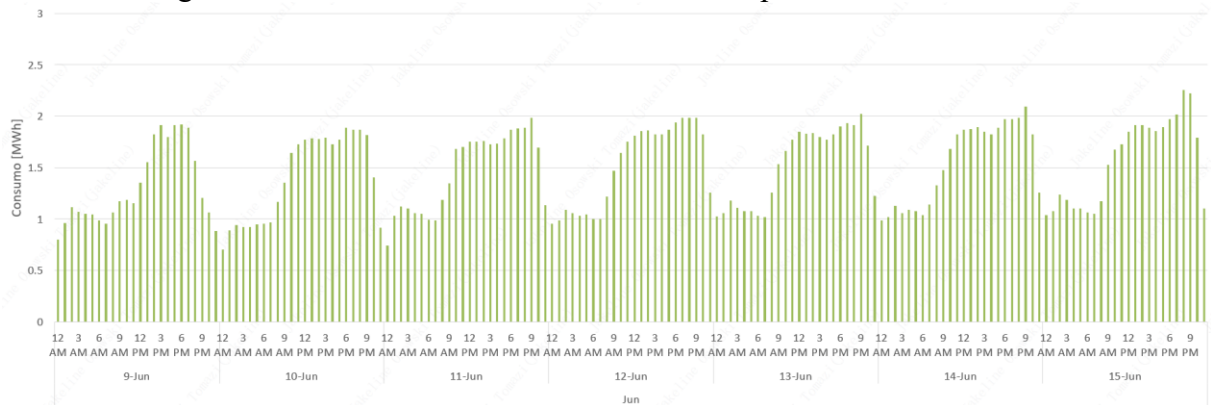
Nesse sentido, para esta pesquisa, a memória de massa foi disponibilizada pela administração do shopping center e o objetivo de obter tal dado era para avaliar o perfil de carga da edificação ao longo de um certo período. Os dados recebidos foram do ano de 2019 inteiro. Os dados horários foram analisados, revelando um comportamento típico ao longo desse período. As Figuras 16 e 17 apresentam uma semana típica dos meses de janeiro e julho de 2019, respectivamente.

Figura 16 – Consumo horário de uma semana típica em Janeiro de 2019.



Fonte: Adaptado dos dados disponibilizados pela Administração do Shopping Center (2021).

Figura 17 – Consumo horário de uma semana típica em Junho de 2019.



Fonte: Adaptado dos dados disponibilizados pela Administração do Shopping Center (2021).

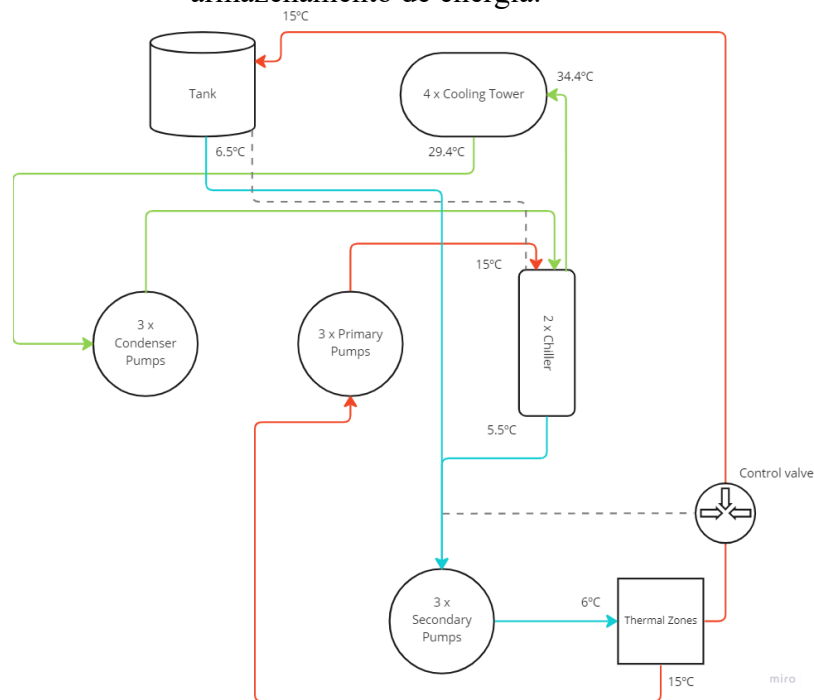
O shopping center apresenta um perfil de consumo de energia padronizado ao longo dos dias da semana, independentemente da estação do ano. De acordo com as análises realizadas, o consumo de energia atinge o pico no período da tarde e apresenta uma queda no início da manhã, em ambos os casos de janeiro e junho. A curva de consumo possui uma baixa intensidade na madrugada, seguida por um aumento gradual até atingir o pico no período da tarde e, posteriormente, uma redução gradual. Essa parábola é repetida diariamente e apresenta pequenas flutuações em sua intensidade ou duração. Esse padrão de consumo fornece um importante ponto de referência para a análise do modelo, possibilitando a comparação dos dados de saída.

Além das medições realizadas na cabine de entrada, o shopping center possui uma medição dedicada ao consumo de energia do sistema de HVAC principal, composta por todos os equipamentos responsáveis pelo abastecimento das áreas comuns, lojas e praça de alimentação, como ventiladores, motores, bombas e chillers. Essa informação torna-se

relevante no processo de calibração, uma vez que torna-se possível segmentar os usos finais em HVAC e iluminação e equipamentos, conforme fora apresentado na revisão de literatura para outros trabalhos semelhantes.

O sistema de ar condicionado da edificação é composto por dois chillers, três bombas de água gelada primárias, três bombas de água gelada secundárias, três bombas de água de condensação, quatro torres de resfriamento e um tanque de armazenamento de água gelada. O fluxograma apresentado na Figura 18 ilustra, de forma simplificada, a configuração desse sistema.

Figura 18 - Fluxograma do circuito da central de água gelada com o sistema de tanque de armazenamento de energia.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

O funcionamento do sistema de HVAC varia de acordo com a temperatura externa e a estação do ano. Durante as estações quentes, o shopping center utiliza os chillers para carregar o tanque de armazenamento de água gelada durante a noite. Durante o dia, tanto os chillers quanto o tanque são acionados para atender à demanda térmica do shopping.

Por outro lado, nas estações frias, existem duas situações principais. Se o tanque de água gelada precisar ser recarregado, esse carregamento é realizado no período noturno, e durante o dia, o tanque fornece a carga necessária para atender à demanda do Shopping. No entanto, em uma segunda situação durante o dia, o tanque não consegue suprir totalmente a demanda

térmica e, nesse caso, um dos chillers é ligado. Assim, em algum período de uma estação fria, o shopping center pode funcionar apenas com o tanque de armazenamento, com ou sem chillers ligados.

Essas condições aumentam as incertezas associadas ao modelo e representam um desafio ainda maior no processo de calibração. Como não há nenhum tipo de histórico que rastreie o comportamento real do sistema, é necessário criar um cenário ajustando o comportamento do sistema a partir das estações quentes e frias do ano. As inspeções com os operadores do sistema de HVAC foram fundamentais para entender o comportamento do sistema e enriquecer os detalhes da simulação. Neste ponto, a visita, ajudou a lidar com as incertezas de forma qualitativa.

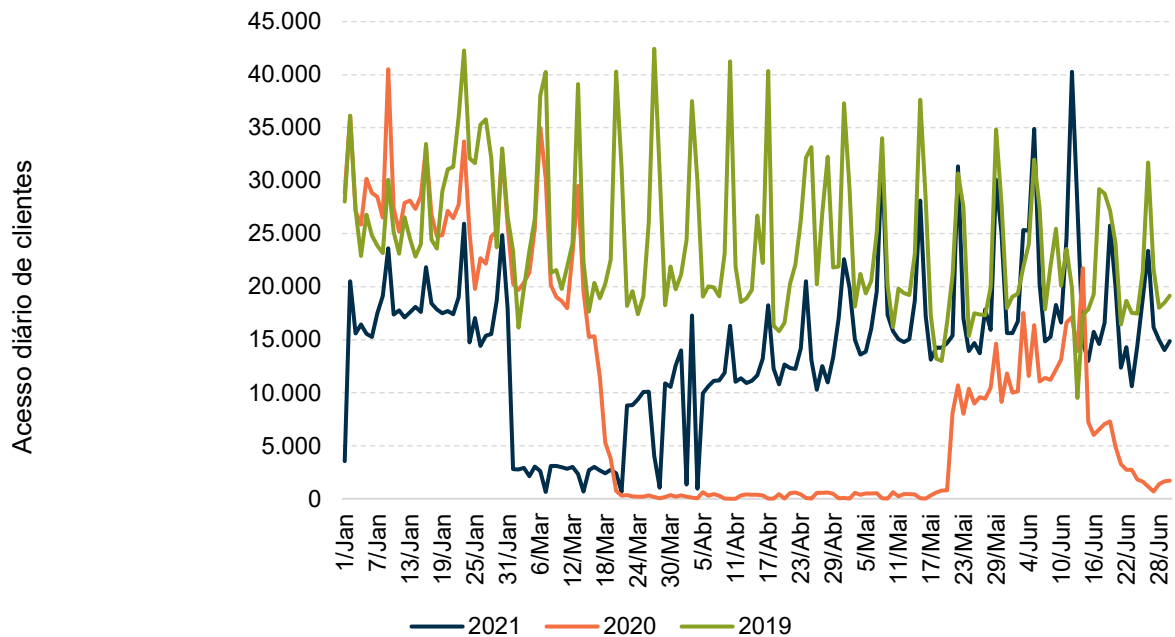
A medição disponibilizada do HVAC auxiliou na análise da calibração do modelo como um todo e também na análise segmentada para apenas o sistema de ar condicionado. Além disso, essa informação é relevante para o modelo, uma vez que o sistema de HVAC apresenta um comportamento estocástico e depende de variáveis diversas, como a decisão momentânea do operador do sistema onde a sua escolha pode ser feita através de conhecimento empírico do sistema. Diferente do sistema de iluminação, por exemplo, onde apresenta uma característica de uso padrão e estável.

Nesse sentido, a composição de iluminação e equipamento será nomeada como carga de base. A carga de base não possui medição dedicada, portanto foram adotadas metodologias de análise da carga instalada para ser o dado de entrada no programa de simulação. Portanto, a análise se deu a partir da carga instalada disponibilizada através de plantas luminotécnicas, relatório com o levantamento da luminárias instaladas, dados dos motores e aparelhos em geral e inspeção no local. O dado de entrada no modelo neste caso foi em W/m^2 .

A fim de avaliar a ocupação da edificação e incluí-la no modelo de simulação, foram utilizadas duas principais fontes de informação. A primeira foi proveniente da administração do shopping center, que utiliza câmeras equipadas com sensores para contabilizar diariamente a quantidade de pessoas que acessam o prédio, e a segunda análise foi proveniente da mineração de dados disponíveis no Google.

Iniciando pela informação disponibilizada referente a ocupação do Shopping Center, a Figura 19 apresenta a ocupação diária de 2019 a 2021 dos meses de janeiro a junho. Estes foram os dados disponibilizados nos relatórios internos, e foram utilizados para compreender o padrão de uso no primeiro semestre do ano, bem como a ocupação diária.

Figura 19 – Ocupação diária do Shopping Center.



Fonte: Adaptado dos dados disponibilizados pela Administração do Shopping Center (2021).

Ao avaliar os anos de 2019, 2020 e 2021, é possível notar uma diferença significativa no comportamento de ocupação da edificação durante o ano de 2020, em decorrência da pandemia da Covid-19. No período de março a abril, a edificação permaneceu fechada ao público e retomou suas atividades de forma gradual. O ano de 2021 apresenta um comportamento ainda atípico, porém com um aumento na utilização do espaço pelo público externo. Para fins de análise, o ano de 2019 é considerado como o ano padrão neste caso, uma vez que anos anteriores não foram disponibilizados, tornando a avaliação de outros períodos inviável.

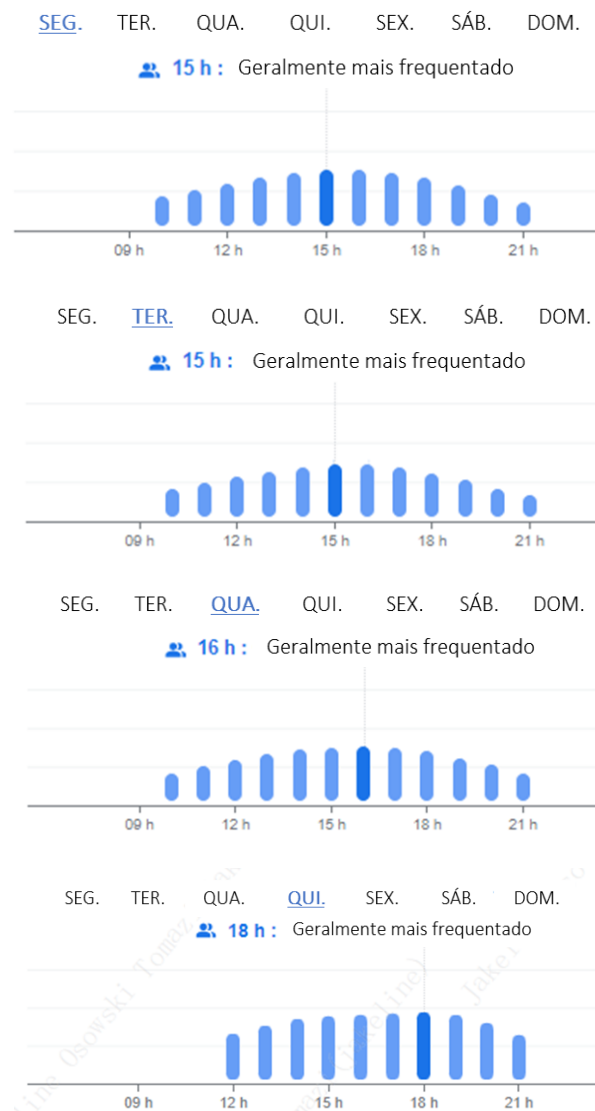
Ao examinar a ocupação da edificação em uma semana típica, observa-se que o pico de utilização ocorre aos sábados, seguido pelos domingos. Essas informações são relevantes para a concepção do modelo, mas não permitem caracterizar a ocupação do espaço em cada hora do dia. Portanto, seguiu-se para uma segunda busca por meio da mineração de dados do Google, para obter informações sobre o perfil de ocupação em cada hora do dia.

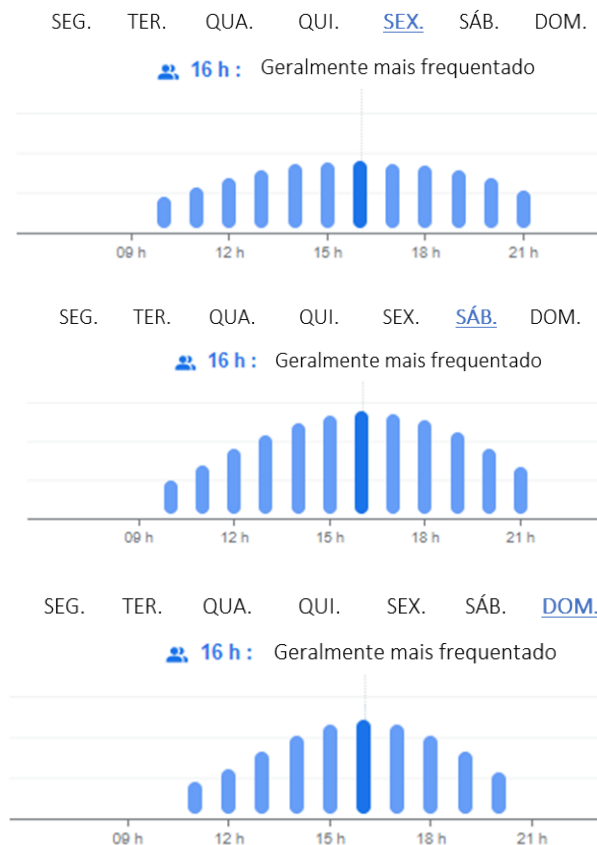
O Google utiliza dados agregados e anônimos de usuários que ativaram o histórico de localização para determinar os horários mais populares e a duração da visita. A plataforma exibe essas informações na página do Google para empresas que recebem um número suficiente de dados de visitas, sendo que esses dados não podem ser adicionados manualmente. O horário

popular indica o período do dia em que a edificação está mais ou menos ocupada, com base no histórico de visitas, apresentando uma ocupação padrão para uma semana típica.

Com base nessas informações, foram avaliados os comportamentos horários de ocupação durante cada dia da semana, utilizando dados disponíveis no Google. A Figura 20 apresenta um resumo dos resultados para cada dia de uma semana típica.

Figura 20 – Dados de ocupação do Shopping Center referentes a semana do dia 03 a 09 de abril de 2023.



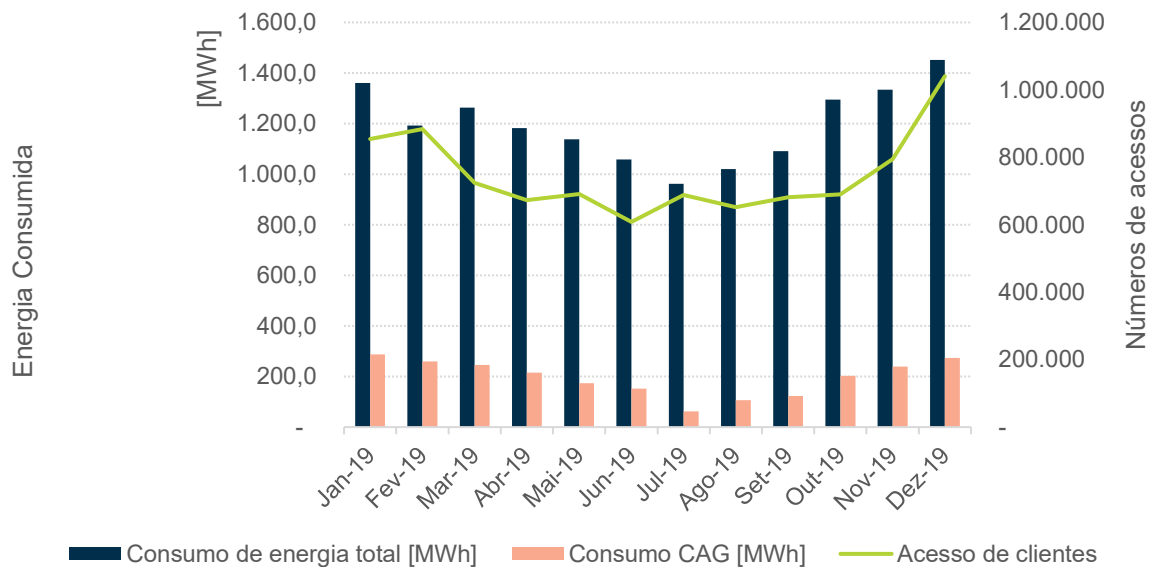


Fonte: Adaptado dos Dados Histórico de Ocupação disponibilizado pelo Google (2023).

A Figura 20 foi apresentada em escala, permitindo verificar que nos finais de semana há uma maior presença do público, com uma curva mais acentuada e picos de ocupação às 16h. Nos demais dias da semana, a curva de ocupação apresenta um comportamento similar, porém menos acentuado do que nos finais de semana, com picos de ocupação entre 15h e 16h. A duração média dos usuários no local são de 45 min à 3h. É importante ressaltar que, embora esses dados sejam relevantes para a análise geral da ocupação e para a elaboração de schedules de equipamentos, eles não fornecem informações quantitativas específicas sobre a ocupação da edificação. A quantidade de pessoas foi utilizada conforme ocupação disponibilizada pela Administração da edificação.

O ano de 2019 foi selecionado como ano de objeto de estudo para a calibração do modelo, tendo em vista vários fatores, dentre os quais destacam-se o comportamento padrão observado nesse ano, a sua natureza pré-Covid-19 e a disponibilidade de dados abrangentes referentes ao consumo geral, memória de massa, consumo do sistema de HVAC, ocupação e arquivo climático. A Figura 21 a seguir apresenta um resumo das variáveis disponibilizadas no formato mensal.

Figura 21 – Relação entre a ocupação na edificação, consumo de energia total e do sistema de HVAC ao longo do ano de 2019.



Fonte: Adaptado dos dados disponibilizados pela Administração do shopping center (2021).

Nas seções seguintes serão apresentadas as informações referentes ao modelo de simulação, indicando a forma de análise da acuracidade do modelo e suas respectivas variáveis de entrada.

3.3 PARÂMETROS DE ENTRADA NO MODELO DE SIMULAÇÃO

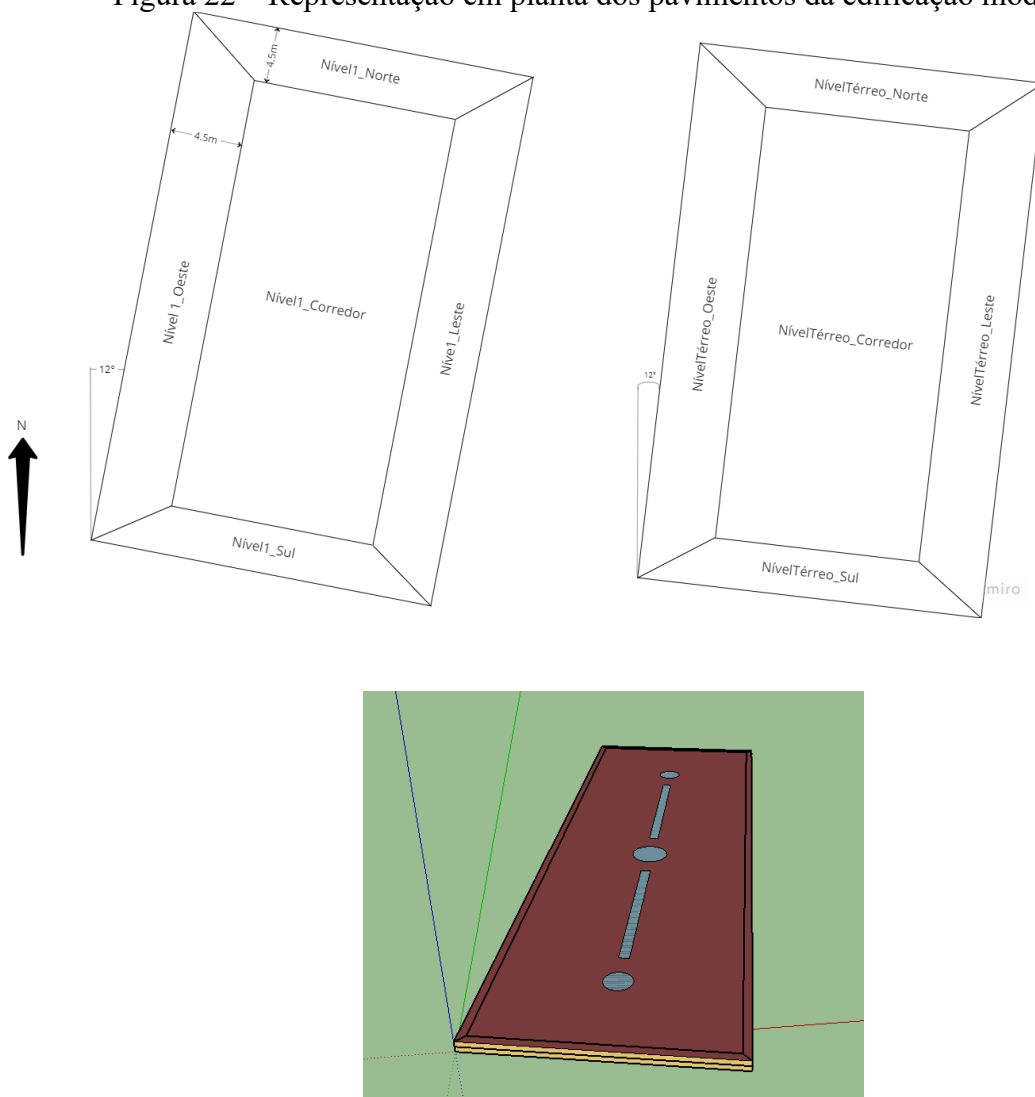
Os parâmetros de entrada do modelo referente a edificação, clima, sistema de climatização e padrão de uso são apresentados abaixo. Apesar da calibração ser um processo constante de atualização do modelo e melhorias com o objetivo de redução das incertezas, são apresentados os valores finais a fim de trazer o resultado que melhor se ajustou a edificação real.

3.3.1 Edificação

A envoltória da edificação adicionada no programa de simulação seguiu de forma simplificada a planta-baixa disponibilizada. As características da edificação modelada incluem: comprimento de 400 m, largura de 140 m, com pé-direito de 3 m. A edificação possui 2 pavimentos, sendo que cada pavimento foi dividido em 5 zonas térmicas, sendo 4 perimetrais e 1 interna (Figura 22), a qual analisa a influência de todas as orientações. Todas as zonas

térmicas foram consideradas totalmente condicionadas pelo sistema de climatização, com um total de 65.000 m² para toda a edificação.

Figura 22 – Representação em planta dos pavimentos da edificação modelada.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

O efeito de contato com o solo no piso do pavimento térreo foi considerado por meio do estabelecimento de uma condição de contorno, através do objetivo Slab. Por ser uma edificação majoritariamente horizontal, o efeito do solo é impactante no resultado. O piso térreo e três paredes desse pavimento foram adotadas como contato com o solo e adiabáticas.

As portas externas são de vidro com dimensões 2 m de largura e 2 m de altura, sendo flexíveis. As clarabóias do telhado foram adicionadas como fixas e de vidro. O tipo de vidro para a análise dos sistemas construtivos foi considerado simples, com fator solar de 0,862 e

transmitância térmica de 5,894 W/(m².K). A absorptância térmica dos materiais foi considerada a mesma em todas as simulações, sendo adotado um valor de 0,5 para paredes e coberturas.

O calor gerado nos ambientes devido aos equipamentos, à presença de pessoas e ao sistema de iluminação foi alterado durante as simulações adequando-se às informações disponibilizadas. Os valores finais são indicados na Tabela 4.

Tabela 4 – Características da edificação.

Característica	Valor
<i>Aberturas</i>	
Percentual de abertura da fachada (%)	3
<i>Paredes</i>	
Transmitância da parede (W/m ² .K)	0.45
Absortância da parede	0.5
<i>Cobertura</i>	
Transmitância da cobertura (W/m ² .K)	0.223
Absortância da cobertura	0.7
<i>Vidros</i>	
Fator solar do vidro	0.862
Transmitância do vidro (W/m ² .K)	5.894
<i>Cargas internas</i>	
Densidade de potência de iluminação (W/m ²)	5.91
Densidade de potência de equipamentos (W/m ²)	30
Ocupação (m ² /pessoa)	3.22
Taxa metabólica (W/m ² de pele)	180
Área de pele por pessoa (m ²)	1,80

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A ocupação e a carga base foram definidas e adequadas de acordo com os documentos referente a planta de iluminação, carga instalada, controle de fluxo de pessoas. A indicação dos períodos em que ocorrerá a presença de pessoas nos ambientes e, consequentemente, a utilização dos equipamentos e do sistema de iluminação, está descrita na seção 3.3.4 uma vez que depende da ocupação dos usuários.

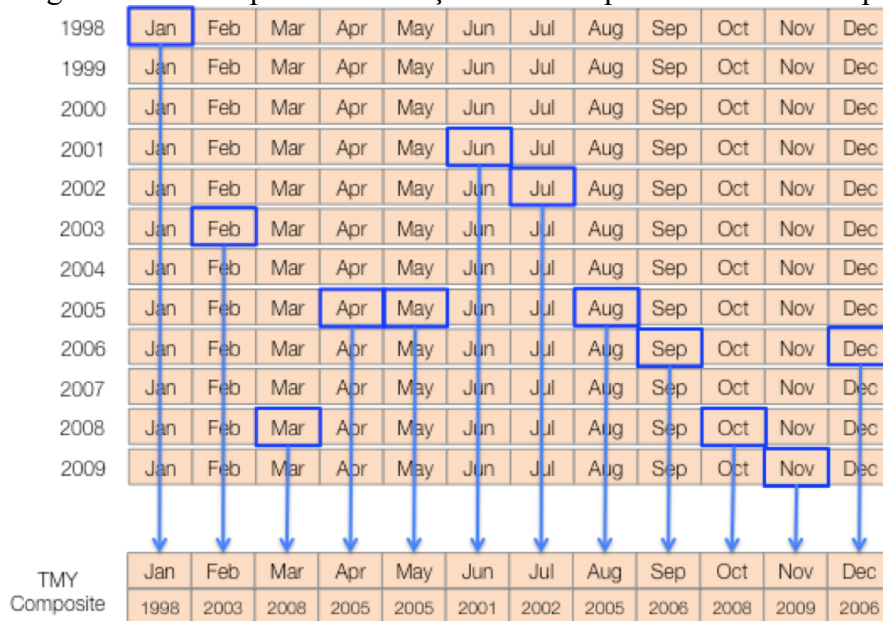
3.3.2 Clima

O Brasil é um país com grande diversidade climática, sendo assim, este trabalho procurou um arquivo climático que trouxesse a realidade do local de onde a edificação está inserida. Dessa forma, o clima adotado foi para a cidade de Porto Alegre. Inicialmente, o arquivo climático inserido na simulação foi do tipo Typical Meteorological Year (TMY), para

o intervalo de 2007 a 2021, com medidas feitas próximas ao Aeroporto de Porto Alegre. Este arquivo é o mais recente e captura medidas de uma área que se assemelha da edificação estudada, possuindo terreno plano e desimpedido ao seu entorno.

O arquivo meteorológico, por sua vez, é uma entrada importante no modelo de calibração, pois influencia o comportamento da edificação e o uso do ar condicionado. O arquivo TMY consiste na determinação estatística dos meses individuais de dados meteorológicos que melhor representam as condições meteorológicas com base no período de medição. Corresponde, portanto, à situação climática mais frequente que ocorre neste período. A Figura 23 ilustra a composição de um arquivo TMY durante um período e local hipotético.

Figura 23 – Exemplo de construção de um arquivo climático do tipo TMY.



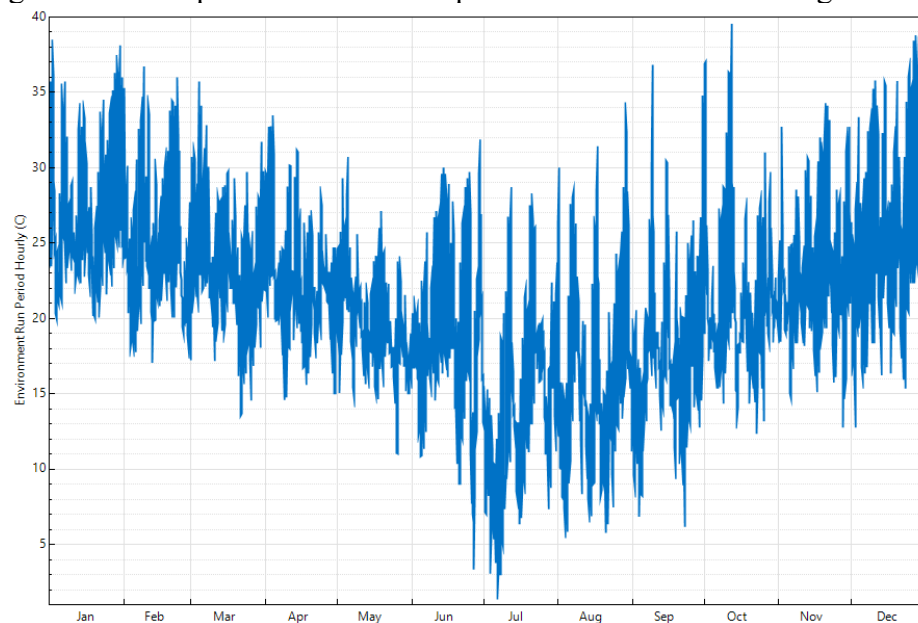
Fonte: HelioScope (2022).

No caso de uma calibração, o ideal é a adoção do arquivo meteorológico referente ao mesmo ano dos dados comparados na calibração a fim de analisar o desempenho frente as mesmas adversidades climáticas. Dessa forma, este trabalho conseguiu acesso à séria histórica de anos reais desenvolvido por Crawley and Lawrie (CLIMATE ONE, 2023), e o utilizou diretamente nas simulações. O arquivo climático adicionado ao modelo foi referente ao ano de 2019. Esse ponto foi importante para reduzir o erro ao analisar a calibração da edificação, pois utiliza-se todas as entradas do modelo do mesmo ano e condições climáticas referentes a este.

Na Figura 24 são apresentados os valores de temperatura do ar ao longo de 2019 para a cidade de Porto Alegre. Estes valores foram obtidos a partir da simulação computacional no

programa EnergyPlus, com o uso do arquivo climático (MY). Percebe-se a predominância de temperaturas mais elevadas nos meses de dezembro a fevereiro, condizentes com a estação de verão. Por outro lado, nos meses de inverno as temperaturas decrescem. As temperaturas entre junho e julho são que apresentam as mais baixas registradas no ano. Além disso, percebe-se um pico de calor no mês de outubro que foge do padrão para esta época do ano, onde se verificam temperaturas mais amenas.

Figura 24 – Temperatura do ar do arquivo climático de Porto Alegre.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A cidade de Porto Alegre, localizada no sul do Brasil, possui como característica ser uma cidade com estações bem definidas, com umidade relativa do ar média de 73.3% ao longo do ano de 2019, considerada alta, e temperaturas externas variando entre 2°C e 39°C ao longo do ano de 2019, com média de 20,9°C. Segundo a classificação de Köppen (SENTELHAS et al., 2014), o clima é classificado como Cfa, que indica um clima subtropical úmido predominante. Pela ASHRAE 169 (2013), o Sul tem predominância de um clima classificado com 3A.

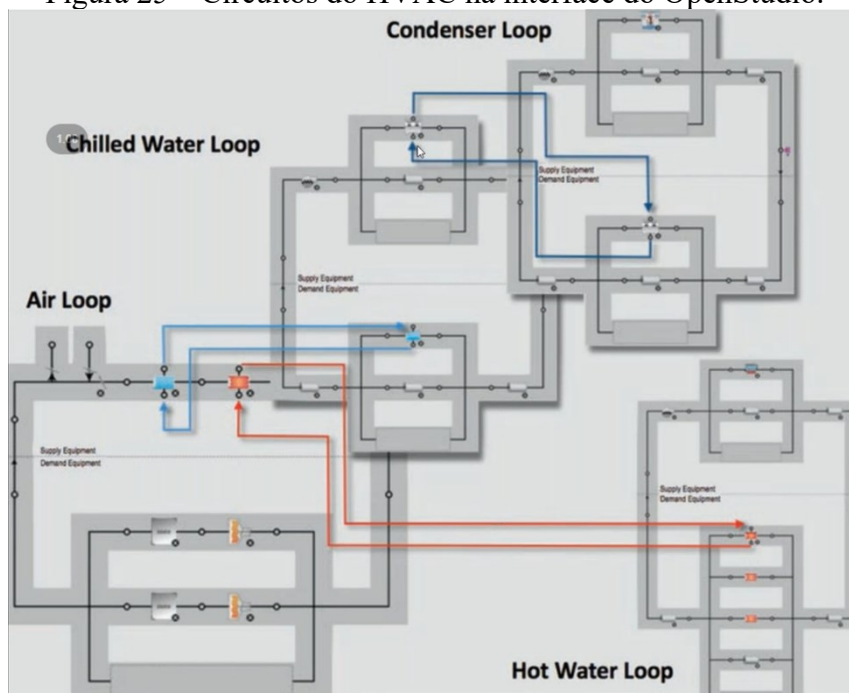
3.3.3 Sistema de HVAC

O sistema de HVAC foi inserido no modelo após ser criado um modelo base com as principais características da envoltória, zonas térmicas e carga de base. As principais

características dos equipamentos e do uso do sistema HVAC foram levantadas a partir dos projetos e visitas in loco.

A construção do sistema de HVAC foi adicionada no programa OpenStudio, pois possibilita uma visão, conexão e navegação entre os loops do sistema de climatização de forma mais amigável. Um exemplo da interface entre os loops é indicado abaixo. O programa apresenta cada loop separadamente e o equipamento que faz a conexão entre dois loops aparece em ambas as interfaces. Uma visão geral, juntando todos os loops é apresentada na Figura 25.

Figura 25 – Circuitos do HVAC na interface do OpenStudio.



Fonte: EDS (2021).

As variáveis de entrada do sistema HVAC necessárias para realizar a simulação energética do modelo são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Principais informações adicionadas ao programa de simulação para o sistema de HVAC.

(continua)

Chiller	Chilled water temperature
	Condenser water temperature
	Temperature differential
	Full load and part load performance (COP, IPLV)
	Sequencing Method (Sequential, Uniform loading, sequential uniform loading)

Tabela 5 – Principais informações adicionadas ao programa de simulação para o sistema de HVAC.

(conclusão)	
Pumps	Flow rates
	Head
	Pump and motor efficiency
	Control (constant, two speed and variable speed)
Cooling tower	Type of cooling tower
	Flow rate (water and air)
	Fan total pressure
	Fan efficiency (mechanical & motor)
Air Handling Unit (AHU)	Control (constant, two speed and variable speed)
	Coil Capacity (cooling and heating)
	Fan total pressure
	Fan efficiency (mechanical and motor)
Control (constant/variable)	

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A curva de operação do chiller foi utilizada a partir da Biblioteca EnergyPlus retirada do equipamento mais similar levando em consideração a mesma fabricação, potência semelhante, condensação de água, fluido e mecanismo de válvula.

As informações de equipamentos que não estavam disponíveis nos dados compartilhados eram mantidos em modo de “auto dimensionamento”, também chamado de *autosize*, ou adotando-se dados padrão do programa.

Após inserir o sistema de HVAC completo no programa e não encontrar inconsistências na simulação, o tanque de armazenamento foi adicionado ao modelo. A representação do tanque de acumulação de água gelada foi realizada por meio do objeto ThermalStorage:ChillerWater:Stratified, que considera o efeito de estratificação da água, conforme sua temperatura e densidade.

A temperatura da água mantida no tanque foi adotada igual a 5,0°C, respeitando-se o limite mínimo de 4,0°C, que representa o seu estágio de maior densidade. O chiller, que realiza o carregamento do tanque, foi configurado com um setpoint de 4,8°C para o fornecimento da água gelada. Tal diferença da temperatura do tanque e a de fornecimento do chiller foi inserida para que o equipamento pudesse identificar quando a acumulação estava completamente carregada, evitando que o chiller permanecesse continuamente carregando a acumulação.

O Apêndice A apresenta os principais dados de entrada adotados para o condicionamento artificial no EnergyPlus.

3.3.4 Padrão de Uso

A maneira como as pessoas ocupam e se comportam nos espaços depende de diversos aspectos tendo papel importante no desempenho térmico das edificações. Por perfil de ocupação, entende-se os períodos em que há pessoas nos ambientes, como também a quantidade de pessoas. Sendo assim, através das informações disponibilizadas da operação do shopping center, dados de ocupação e mineração de dados, o padrão de uso foi adicionado no programa. O perfil do padrão de uso é apresentado nos resultados na seção 4.1.

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

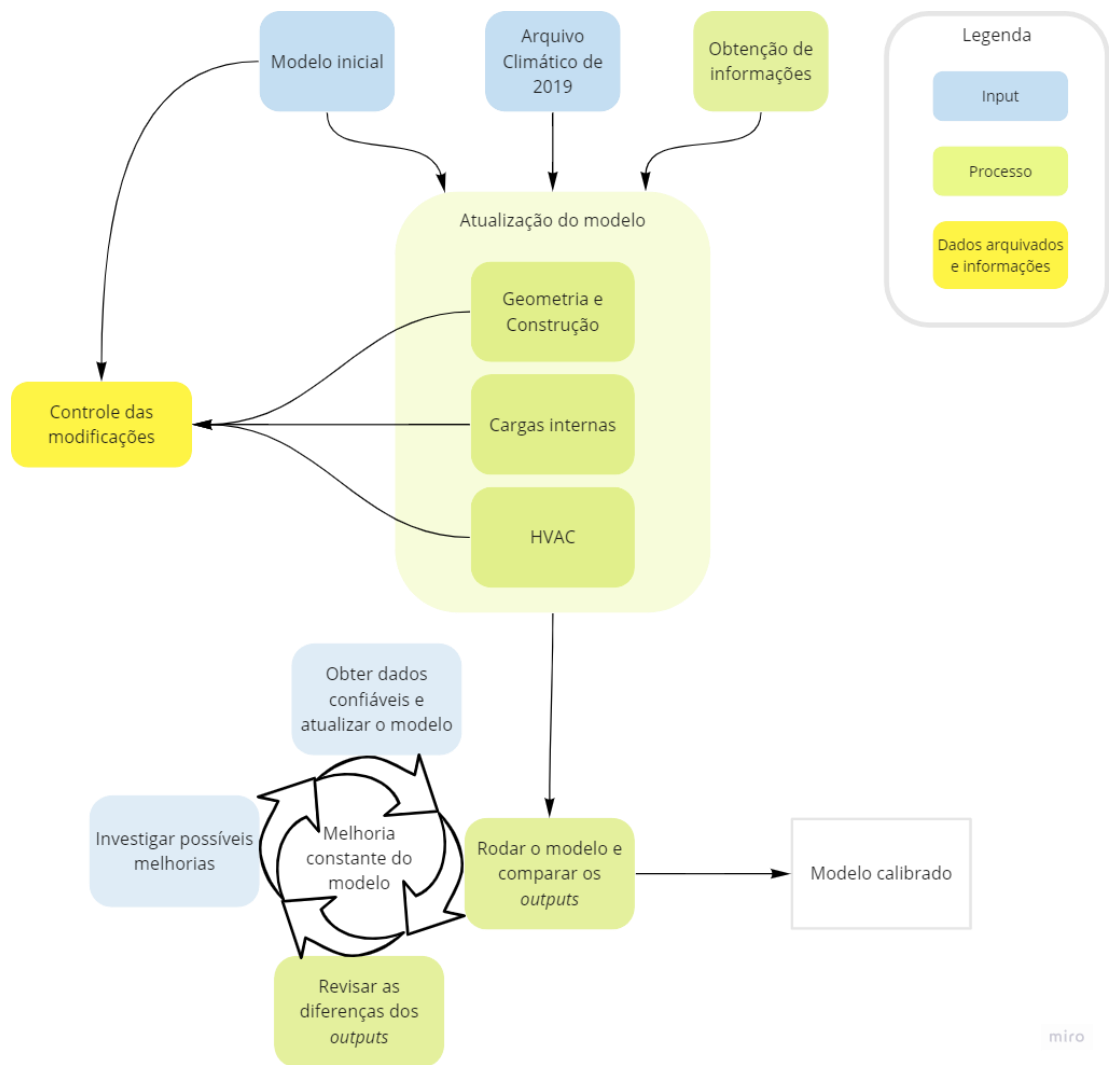
3.4.1 Verificação do modelo

A calibração de modelos visa minimizar as discrepâncias entre a performance medida de uma edificação e os resultados preditos pelo modelo de simulação (COAKLEY; RAFTERY; KEANE, 2014). Para alcançar o modelo final calibrado, é necessário modificar o modelo de simulação algumas vezes ao longo do processo, a fim de obter resultados dentro dos limites estabelecidos pela ASHRAE, conforme seu Guideline 14, para os indicadores estatísticos de análise do desempenho da simulação, o CVRMSE e o MBE.

Este trabalho propõe, dessa forma, uma metodologia bem definida e rastreável para a calibração do modelo. A metodologia segue o método baseado em evidências, o que significa que as alterações no modelo de simulação devem seguir uma ordem hierárquica de evidências. As mudanças são realizadas com base na confiabilidade da nova variável a ser adicionada ao modelo. Sendo assim, se uma variável não estiver disponível, o dado de entrada padrão do programa de simulação é utilizado.

Em cada etapa da simulação, os resultados são comparados com os dados reais e os indicadores da ASHRAE. A rastreabilidade das alterações é garantida para permitir que outros usuários verifiquem os passos adotados e possam utilizar o mesmo processo em outras calibrações. A calibração do modelo segue as etapas descritas na Figura 26, utilizando a sequência explicada por Raftery (2009), PAN et al. (2007) e Da Silva et al. (2021). O objetivo do fluxograma é fornecer uma visão geral do processo de calibração adotado.

Figura 26 – Fluxograma da Metodologia aplicada na pesquisa.



Fonte: Adaptado de Raftery P. (2009).

Na primeira etapa, cria-se um modelo inicial, adiciona-se um arquivo climático e obtêm-se informações sobre a edificação. Todas as informações obtidas são levadas em consideração, como o Building Information Model (BIM), o desenho executado, os manuais de Operação e Manutenção (O&M), o Sistema de Monitoramento de Energia (EMS), o Building Automation System (BAS) e o levantamento e inspeção. Esses materiais são organizadas em ordem hierárquica e adicionados ao modelo. Essa organização foi desenvolvida pela metodologia de Raftery et al. (2011) e são dispostas da seguinte forma, seguindo a ordem da informação mais confiável para a menos confiável:

- (1) medições elétricas com registro de dados;
- (2) medições não elétricas com registro de dados;

- (3) medição pontual ou de curto prazo;
- (4) observação direta (levantamentos de campo);
- (5) inspeção local com operadores;
- (6) documentos de operação (como manuais de operação e manutenção (O & M));
- (7) documentos de comissionamento (como desenhos executados);
- (8) estudos de referência e guias de melhores práticas;
- (9) normas, especificações e diretrizes; e
- (10) informações do estágio de projeto (como o modelo inicial).

A cada versão do modelo é atribuída uma identificação e salva para fins de análise e rastreabilidade. Nesta etapa foram realizadas alterações no modelo até o ponto em que os indicadores estatísticos, que definem se um modelo está calibrado ou não, fossem atingidos. Em cada uma delas avaliou-se o modelo para verificar se o mesmo encontrava-se dentro dos limites definidos pela diretriz da ASHRAE. Além disso, a cada iteração, o modelo era enriquecido com as informações disponibilizadas.

A partir desse resultado, verificou-se o impacto da alteração e se o modelo foi aperfeiçoado ou não antes de seguir para uma nova modificação. Apenas lembrando que a Guideline 14 da ASHRAE define os limites aceitáveis para a calibração de dados mensais como $\pm 5\%$ para o MBE e $\leq 15\%$ CVRMSE.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo do trabalho busca apresentar os resultados obtidos através da aplicação da metodologia descrita no capítulo anterior. Para isto, os resultados, assim como suas respectivas análises e discussões, são apresentados. Os resultados do estudo subdividem-se entre a edificação total, o sistema de HVAC e dificuldades e limitações encontradas ao longo do processo.

4.1 LEVANTAMENTO DAS INFORMAÇÕES

Os sistemas presentes no shopping center foram inspecionados de forma física e a partir desse momento mais informações sobre a forma de operação dos sistemas, principalmente do sistema de sistema de HVAC, foram coletadas. A Figura 27 apresenta um dos chillers instalados na casa de máquinas. A operação do shopping segue uma característica empírica, ou seja, dependendo da temperatura da água gelada de retorno, os operadores aumentam ou diminuem a carga de uso dos equipamentos.

Figura 27 – Foto do sistema de HVAC instalado no Shopping Center.

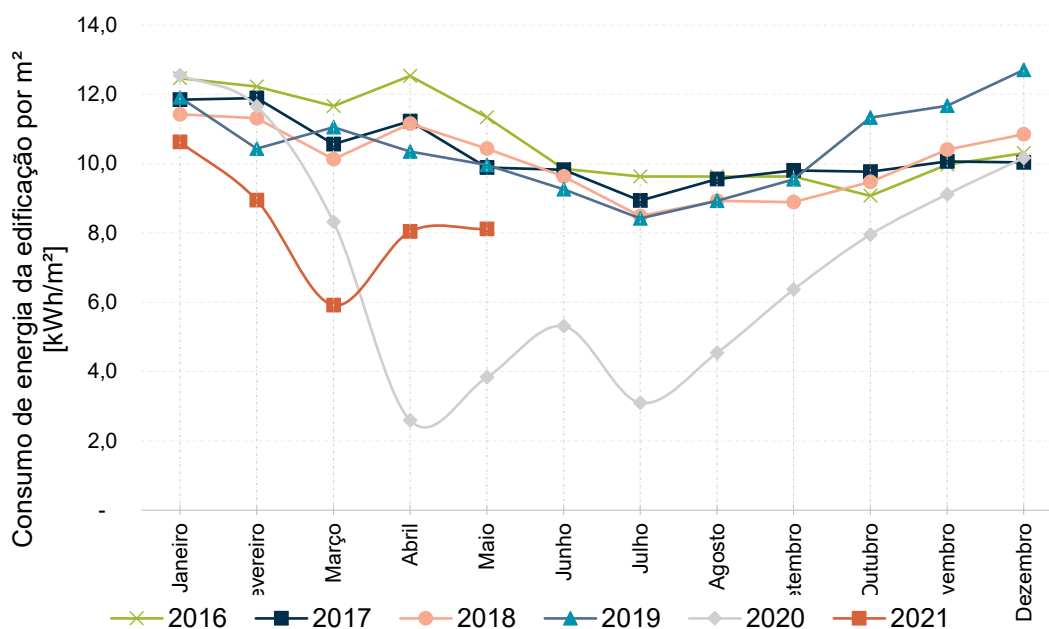


Fonte: Autora (2022).

Além da visita, os dados recebidos foram tratados e analisados conforme segue. Com relação ao consumo mensal da edificação, a Figura 28 ilustra o consumo mensal de energia da edificação com dados fornecidos pela equipe de operação do Shopping, abrangendo o período

de janeiro de 2016 a maio de 2021. Em dezembro de 2019, o consumo de energia atingiu o pico, totalizando 12,7kWh/m² ou 1.452 MWh. Em contrapartida, em março de 2020, houve uma queda no consumo mensal que não retornou aos níveis anteriores, devido ao fechamento do Shopping em razão da pandemia Covid-19. É importante salientar que, até onde se tem dados em 2021, os consumos mensais permaneceram abaixo da média antes da pandemia, indicando que o cenário pós-Covid 19 ainda não reflete o funcionamento habitual do edifício.

Figura 28 – Consumo de energia da edificação por área.



Fonte: Adaptado dos dados disponibilizados pela Administração do Shopping Center (2021).

Devido a pandemia Covid-19, o ano de 2020 possui um comportamento atípico. Sendo assim, avalia-se que os anos anteriores ao Covid-19 são anos “padrões”. Os dados disponibilizados deste anos “padrões” são de 2016 a 2019. A média do consumo desse período é de 10,4 kWh/m²/mês ou 124,6 kWh/m²/ano.

Relembra-se que o CBCS possui uma plataforma de Desempenho Energético Operacional em Edificações (DEO) que avalia o nível de uma edificação comparado a outras. A avaliação através de benchmarks da DEO categoriza as edificações em eficientes, típicas ou ineficientes. No caso de uma edificação com tipologia de shopping center, a plataforma solicita a inserção de dados referente ao local da instalação, área construída, área de estacionamento e consumos mensais ou anuais. Após inserir essas informações, uma escala é apresentada

indicando os intervalos em kWh/m²/ano para cada edificação ser considerada eficiente, típica ou ineficiente. Para shopping centers localizados em Porto Alegre, no Rio Grande do Sul, a escala varia de 0 a 187,72 kWh/m²/ano para edifícios eficientes, 224,42 kWh/m²/ano para edifícios típicos e para valores acima desse último, são classificados como ineficientes.

Neste contexto, pela análise apresentada no Benchmark do CBCS na plataforma de Desempenho Energético Operacional em Edificações (DEO), verifica-se que a edificação é considerada uma edificação eficiente, pois o consumo de energia médio anual é de 124,6kWh/m². Além disso, comparado aos trabalhos apresentados na revisão de literatura - 430 kWh/m²/ano (LAM; LI, 2002), 310 kWh/m² a 388 kWh/m² (BOINTNER; TOLEIKYTĖ, 2016) e 271 kWh/m² (ZHENG *et al.*, 2020) -, o shopping center em questão também possui um consumo específico baixo. Nesse sentido pode-se explicar algumas razões para tal. O estudo desenvolvido por Lam (2002), foi conduzido com um sistema de HVAC centralizado, porém com condensação a ar que possui uma eficiência menor, ao passo que o sistema do shopping center analisado possui condensação a água. Outro ponto razoável é o fato de grandes shopping centers tendem a possuir uma demanda específica por m² menor (BOINTNER; TOLEIKYTĖ, 2016). Por fim, o shopping possui TES que colabora para a redução da demanda de energia elétrica.

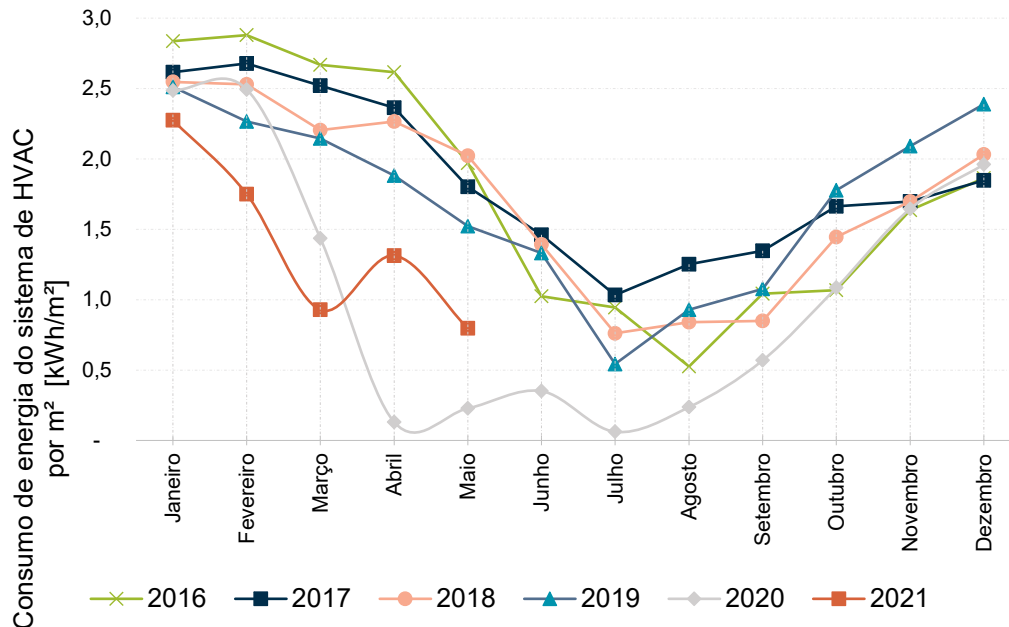
A Figura 29 apresenta o consumo mensal de energia do sistema de HVAC, com dados disponibilizados de janeiro de 2016 a maio de 2021. Observa-se que a curva de consumo segue o mesmo comportamento da edificação, com o pico de consumo de energia ocorrendo em fevereiro de 2016, atingindo 2,9 kWh/m² ou 329 MWh. Esses resultados são importantes para a análise da implementação de ações efetivas de eficiência energética, capazes de reduzir os custos operacionais e minimizar o impacto ambiental do shopping center.

O ponto da curva de maior e menor consumo é influenciado pelo clima da região em que a edificação está localizada. Em Porto Alegre, os meses de verão são caracterizados por altas temperaturas e alta umidade, enquanto que na estação fria as temperaturas são mais baixas e o clima é mais seco, reduzindo a necessidade de condicionamento de ar na edificação.

Assim como foi analisado na Figura 28 referente ao consumo total da edificação, o consumo de energia do sistema de HVAC, apresentado na Figura 29, segue um comportamento semelhante devido a Covid-19, indicando uma queda acentuada em 2020 e se aproximando de valores próximos a zero em meses como abril e julho deste ano. O comportamento do consumo de energia de HVAC em 2021 apresenta uma curva intermediária nos primeiros meses do ano,

com um comportamento atípico em março, caracterizado por uma queda no consumo explicada por uma onda de aumento de casos do Covid-19.

Figura 29 – Consumo de energia do sistema de ar condicionado por área condicionada.

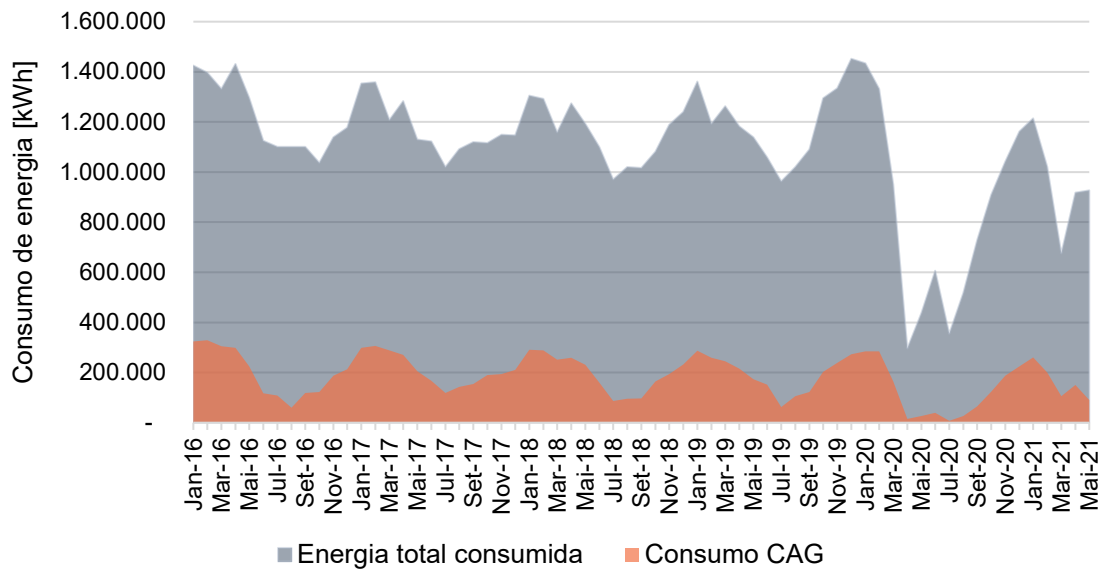


Fonte: Adaptado dos dados disponibilizados pela Administração do Shopping Center (2021).

Para avaliar a representatividade do sistema de HVAC e carga de base, a Figura 30 é apresentada. Essa Figura apresenta a evolução do consumo total de energia, dividido entre o consumo do sistema de HVAC e carga de base de janeiro de 2016 a abril de 2021. É possível observar que a carga de base apresenta uma parcela significativa do consumo total, ao passo que o sistema HVAC corresponde a uma parcela menor e variável.

O sistema de HVAC exibe um comportamento similar ao consumo total do shopping center. Ao se avaliar este ponto, percebe-se que, sem o consumo proveniente do sistema de HVAC, o comportamento de consumo total seria praticamente plano mês a mês, sendo a carga de base responsável pelo mesmo. Em média, o sistema de HVAC representa cerca de 16% do consumo total, enquanto o restante pode ser atribuído à iluminação, motores dos elevadores, escadas rolantes e equipamentos eletrônicos da área administrativa e das lojas. Neste caso, o consumo da carga de base está associado à ocupação da edificação, uma vez que o número de usuários influencia diretamente o uso de elevadores e escadas rolantes.

Figura 30 – Consumo total e do sistema de ar condicionado.

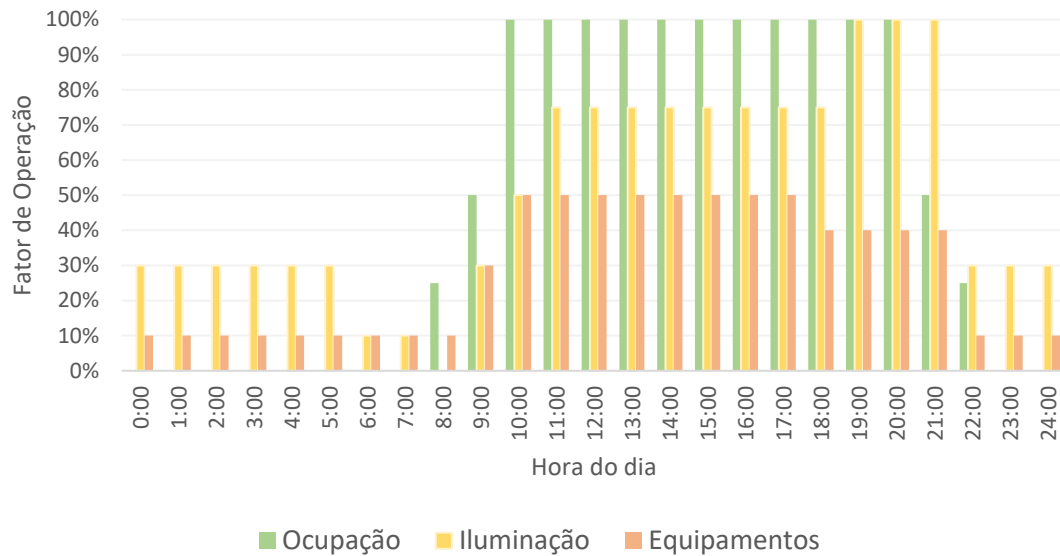


Fonte: Adaptado dos dados disponibilizados pela Administração do Shopping Center (2021).

A parcela referente ao sistema de HVAC é pequena comparado à outros estudos apresentados na revisão de literatura, o qual estava em torno de 50% a 60% do consumo total. Este fato também pode ser resultado do TES presente na edificação. De acordo com a administração do local, em vários momentos não há a necessidade de acionar o sistema de chillers, sendo utilizado diretamente o TES para suprimento da demanda de climatização.

De acordo com os dados apresentados na seção 3.2 referente as informações sobre a ocupação do número de pessoas diárias e o comportamento dessa ocupação através dos dados disponibilizados pelo Google, chegou-se ao seguinte padrão ocupação e uso de equipamentos no modelo da Figura 31.

Figura 31 – Padrão de ocupação e uso de equipamentos no modelo.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

O padrão de uso está diretamente ligado ao horário de funcionamento do shopping e a sua composição ao longo do dia foi pautada na ocupação apresentada no Google. Esses dados foram inseridos no programa de simulação termoenergética a fim de configurar uma operação semelhante à edificação real.

4.2 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO

Uma vez que um modelo de base é adicionado no programa, as informações obtidas são inseridas para aproximar o resultado predito do medido. A Tabela 6 apresenta as principais alterações realizadas no modelo de simulação em cada etapa. Cada linha da tabela apresenta: a alteração feita no modelo, a fonte de informação utilizada e uma breve explicação sobre a razão ou origem da informação obtida. Para cada modificação, o erro e os indicadores estatísticos (MBE e CVRMSE) foram analisados a fim de avaliar o impacto da alteração no desempenho do modelo. Após atingir parâmetros satisfatórios, encerra-se o processo de calibração.

Ao todo foram realizadas 35 alterações no modelo as quais direcionaram a simulação para o atingimento de um modelo calibrado, próximo ao real e embasado em variáveis confiáveis e/ou similares àquelas previamente parametrizadas no programa utilizado.

O modelo de base e rastreamento das informações iniciam com a adição do sistema de HVAC. O caso zero até o cinco foram referentes ao sistema de HVAC somente. Como o shopping center possui um sistema de climatização centralizado, torna-se necessário adicionar cada equipamento que compõe o sistema de HVAC. Dessa forma, foram adicionados chiller,

bomba de água gelada primária, colling coil, bomba de água de condensação, torre de resfriamento e ventilador. As fontes utilizadas para inserção dos dados foram o relatório mensal do próprio fabricante de chiller e folha de dados dos equipamentos.

O caso 6 adequou a iluminação e número de pessoas por m² do estabelecimento a partir da legislação local. Já o caso 7 e 8 foram referente às *schedules* destas variáveis.

O caso 9 relaciona-se a utilização de uma variável previamente parametrizada no programa *Energyplus* referente à curva de operação do Chiller. Neste caso, foi empregado um modelo já parametrizado no EnergyPlus para um chiller com características semelhantes, em virtude da impossibilidade de obter tal informação do fabricante do Chiller dentro do prazo deste estudo.

O modelo 10 realizou uma alteração na condição de contorno do contato de solo da edificação, passando-o a para adiabática. Essa condição foi por conta de haver um estacionamento abaixo do andar térreo, o qual não foi adicionado no modelo.

Após algumas verificações nos resultados e no modelo, percebeu-se que o programa OpenStudio estava duplicando a quantidade adicionada de luminárias, tornando o consumo final predito o dobro do medido. Sendo assim, a alteração 11 levou isso em consideração e reduziu pela metade a quantidade de iluminação.

As alterações seguiram assim por diante até a modificação número 35, onde obteve-se o modelo final calibrado.

Tabela 6 – Principais alterações no processo de revisão do modelo durante a calibração.

(continua)

Modelo	Modificação	Fonte	Observação
0	Chiller: Ref. Capacity, COP, Ref. Leaving Chilled Water Temperature, Ref. Entering Condenser Fluid Temperature, Reference Condenser Fluid Flow Rate	Relatório mensal do fabricante do chiller	HVAC adicionado no sistema
1	BAGP: Rated Flow Rate, Rated Pump Head, Rated Power Consumption, Motor Efficiency	Datasheet	HVAC adicionado no sistema
2	Coil Cooling: Design Water Flow Rate, Design Air Flow Rate, Design Inlet Water Temperature	Datasheet	HVAC adicionado no sistema
3	BAC: Rated Flow Rate, Rated Pump Head, Rated Power and Motor Efficiency	Datasheet	HVAC adicionado no sistema

Tabela 6 – Principais alterações no processo de revisão do modelo durante a calibração.
(continuação)

Modelo	Modificação	Fonte	Observação
4	Cooling tower: Design Water Flow Rate, Fan Power at Design Air Flow Rate, Evaporation Loss Factor, Design Approach Temperature, Design Range Temperature	Datasheet	HVAC adicionado no sistema
5	Fan: Fan total Efficiency, pressure rise, maximum flow rate	Datasheet	HVAC adicionado no sistema
6	Loads: light and m ² /person	Lei Municipal	Adequação da carga à legislação municipal.
7	Schedule: Equipament	Documentação Interna	Alterado pela documentação interna disponível
8	Schedule: Lighting	Modo de input de dados	O método de entrada mudou para se tornar semelhante às informações disponíveis
9	Chiller: Chiller Coeficients	Dados do EnergyPlus	A curva de coeficientes foi ajustada usando o Object 71 do DataSet do EnergyPlus
10	Ground Surfaces: Adiabatic	Tipologia	Existe um estacionamento abaixo do andar térreo que não foi incluído no modelo. Por esse motivo, foi alterada a superfície do solo para adiabática.
11	Lights: divided the power by two	Erro percebido na verificação de resultados	O OpenStudio dobrou ao integrar com o EnergyPlus
12	Activity Level	Input/Output E+	Nível de atividade ajustado de acordo com o Input/Output EnergyPlus
13	People	Erro percebido na verificação de resultados	O OpenStudio dobrou ao integrar com o EnergyPlus
14	Lights: reduce the power	Documentação Interna	Atualizado com a documentação interna disponível
15	Chiller: Reference Capacity, Reference Condenser Fluid Flow Rate	Documentação Interna	Ajustado para ser um equipamento equivalente

Tabela 6 – Principais alterações no processo de revisão do modelo durante a calibração.
(continuação)

Modelo	Modificação	Fonte	Observação
16	BAGP: Rated Power Consumption	Documentação Interna	Ajustado para ser um equipamento equivalente
17	Coil Cooling: Design Water Flow Rate, Design Air Flow Rate	Documentação Interna	Ajustado para ser um equipamento equivalente
18	BAGP: Rated Flow Rate e BAC: Rated Flow Rate, Rated Power	Documentação Interna	Ajustado para ser um equipamento equivalente
19	Cooling tower: Design Water Flow Rate, Fan Power at Design Air Flow Rate	Documentação Interna	Ajustado para ser um equipamento equivalente
20	Fan: Fan total Efficiency, pressure rise, maximum flow rate	Documentação Interna	Após verificação de erro, as variáveis foram revisadas e ajustado para ser um equipamento equivalente
21	Fan: Fan total Efficiency, pressure rise	Documentação Interna	Ajustado para ser um equipamento equivalente
22	Schedule: Equipment	Inspeção <i>in loco</i>	Alterado após conversa com equipe de operação
23	Construction: Window	Padrão	Mesmo vidro em todas as janelas
24	Schedule: Chilled Water Temperature	Inspeção <i>in loco</i>	Alterado após conversa com equipe de operação
25	Schedule: Deck Temperature	Inspeção <i>in loco</i>	Alterado após conversa com equipe de operação
26	Setpoint manager: condensation water circuit; Schedule: Medium Off ClgSetp and HtgSetp	Relatório mensal do fabricante do chiller	Atualizado com a documentação interna disponível
27	Output variables	-	Análise das variáveis de saída
28	TES added; Chiller: leaving chilled water lower temperature limit, sizing factor, curve biquadratic (minimum value of x)	Documentação Interna	Tanque de termoacumulação adicionado no modelo
29	Schedule: Chilled_Water_Temperature 3	Inspeção <i>in loco</i>	Alterado após conversa com equipe de operação
30	Schedule: TES and chiller temperature	Inspeção <i>in loco</i>	Alterado após conversa com equipe de operação
31	BAGP: Power pump and flow rate reduction	Documentação Interna	Ajustado para ser um equipamento equivalente

Tabela 6 – Principais alterações no processo de revisão do modelo durante a calibração.
(conclusão)

Modelo	Modificação	Fonte	Observação
32	Fan: Fan Power Minimum Flow Rate Input Method	Documentação Interna	Ajustado para ser um equipamento equivalente
33	Water Tank: Ambient Temperature Indicator and Ambient Temperature Thermal Zone Name	Benchmark	Alteração baseada em um exemplo do EnergyPlus
34	Water Tank: Source Side Availability Schedule Name and Used Side	Benchmark	Alteração baseada em um exemplo do EnergyPlus
35	Water Tank: general	Input/Output e arquivos de exemplo do EnergyPlus	Alteração utilizando a documentação do EnergyPlus

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A Tabela 7 apresenta a análise dos erros em cada simulação, bem como os valores máximos e mínimos de consumo de energia total da edificação e do sistema de HVAC. O MBE e CVRMSE são apresentados em cada simulação para avaliar o desempenho do modelo e verificar se a simulação pode ser dita como calibrada ou não. As diferenças máximas e mínimas são apresentadas em quatro colunas divididas para a edificação total e para o sistema de HVAC. Os valores positivos indicam que a medição é maior do que a simulação, enquanto que os valores negativos indicam que a medição é menor do que a simulação. Na última coluna é informado se o modelo está calibrado ou não de acordo com o Guideline 14 da ASHRAE.

A avaliação dos indicadores estatísticos e valores máximos e mínimos foi possível devido ao tipo de variável medida que foi disponibilizada para a edificação, ou seja, os consumos de energia no formato horário e mensal para a edificação total e o consumo do sistema de HVAC no formato mensal.

A avaliação dos indicadores estatísticos ao modelo teve início na simulação 7, uma vez que foi a partir dela que o condicionamento de ar da edificação foi concluído e o modelo passou a estar mais similar à edificação real. A análise dos indicadores estatísticos antes desse input poderia enviesar os resultados, por isso optou-se por iniciar a avaliação a partir da simulação 7.

Avaliando-se primeiramente o indicador de erro de viés médio (MBE), percebe-se uma queda acentuada no modelo já que seu primeiro resultado foi de -525% e o último foi de -3%. A partir da simulação 29, o modelo apresenta resultado satisfatório para este índice e está de acordo do limite da ASHRAE referente a uma análise mensal, que dita como limite como +-.

5%. A redução no erro médio indica que a simulação está se aproximando do modelo real, porém não é possível utilizar apenas este indicador como parâmetro de calibração, uma vez que ele pode mascarar o resultado e trazer uma compensação no cálculo do erro.

Dessa forma, direciona-se a análise para o segundo indicador de erro que é o coeficiente de variação da raiz quadrada média (CVRMSE). Este parâmetro apresentou um comportamento semelhante ao parâmetro anteriormente avaliado, ou seja, inicialmente seu resultado foi bem distante do exigido pela diretriz da ASHRAE, que é um limite de 15%, e ao longo das simulações este número diminuiu correspondendo a um valor dentro deste limite. O primeiro resultado obtido foi de 532% e representa um valor alto que consequentemente indica um modelo de simulação distante do modelo real. Ao passo que as alterações do modelo foram realizadas, este número reduziu até chegar em 9%, valor este que está dentro do limite solicitado pela ASHRAE. Além disso, a partir da simulação 27, o modelo já apresentou um resultado satisfatório para este indicador chegando a 10%.

Apesar do modelo já estar com um dos seus coeficientes dentro dos limites estipulados na simulação 27, as alterações no modelo continuaram, a fim de adequar ambos os parâmetros. Somente com os dois indicadores dentro dos limites estabelecidos diz-se que o modelo está, de fato, calibrado. Dessa forma, foi possível caracterizar o modelo de simulação como calibrado a partir da modificação 29, pois ambos os índices estavam dentro dos limites propostos. Algumas variações no modelo foram realizadas na sequência com o intuito de melhorar ainda mais o modelo, porém como o resultado final sofreu pouca alteração, após 5 modificações, as tentativas cessaram.

Tabela 7 – Análise dos indicadores estatísticos referente a calibração do modelo e das diferenças do consumo total e do sistema de HVAC.

(continua)

Modelo	MBE	CVRMSE	Consumo total		Consumo HVAC		Está dentro dos critérios mensais?
			Diferença máxima	Diferença mínima	Diferença máxima	Diferença mínima	
7	-525%	532%	-486%	-435%	-1681%	-3250%	Não
8	-474%	479%	-433%	-422%	-1429%	-3065%	Não
9	-151%	152%	-116%	-211%	81%	19%	Não
10	-105%	106%	-79%	-156%	81%	21%	Não
11	-107%	108%	-81%	-157%	70%	5%	Não
12	-107%	108%	-81%	-157%	70%	4%	Não
13	-57%	58%	-37%	-94%	70%	7%	Não
14	-57%	58%	-37%	-94%	70%	7%	Não

Tabela 7 – Análise dos indicadores estatísticos referente a calibração do modelo e das diferenças do consumo total e do sistema de HVAC.

(conclusão)

Modelo	MBE	CVRMSE	Consumo total		Consumo HVAC		Está dentro dos critérios mensais?
			Diferença máxima	Diferença mínima	Diferença máxima	Diferença mínima	
15	-57%	58%	-37%	-94%	70%	4%	Não
16	-26%	28%	-10%	-55%	70%	6%	Não
17	-27%	29%	-11%	-56%	66%	-5%	Não
18	-27%	29%	-11%	-56%	66%	-5%	Não
19	-38%	39%	-22%	-62%	13%	-92%	Não
20	-38%	38%	-22%	-62%	15%	-88%	Não
21	-38%	39%	-22%	-63%	13%	-102%	Não
22	-45%	46%	-27%	-72%	-10%	-231%	Não
23	-44%	45%	-27%	-70%	-7%	-213%	Não
24	-8%	11%	5%	-24%	-7%	-211%	Não
25	-8%	11%	5%	-24%	-7%	-211%	Não
26	-8%	11%	5%	-24%	-7%	-211%	Não
27	-7%	10%	6%	-24%	-5%	-197%	Não
28	-7%	10%	6%	-24%	-5%	-197%	Não
29	-4%	10%	9%	-22%	10%	-177%	Sim
30	-4%	10%	9%	-22%	10%	-177%	Sim
31	-3%	10%	9%	-22%	13%	-170%	Sim
32	-3%	10%	9%	-22%	13%	-172%	Sim
33	-3%	10%	9%	-22%	13%	-172%	Sim
34	-3%	10%	9%	-22%	13%	-172%	Sim
35	-3%	9%	9%	-22%	13%	-172%	Sim

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Os resultados ainda mostram uma discrepância entre os valores medidos e simulados, apesar do nível de esforço de calibração. Tal diferença pode ser atribuída, em parte, à estimativas imprecisas para alguns parâmetros do modelo, resultantes de eventos imprevistos, como padrões de uso do ar condicionado. Além disso, as discrepâncias no modelo decorrem de simplificações e pressupostos realizados pelo mecanismo de simulação. Uma outra possível fonte de incerteza está na curva de capacidade dos chillers, pois a curva usada foi de um equipamento de tecnologia semelhante ao invés da curva real do equipamento usado no shopping center analisado.

Apesar de algumas limitações no processo, a partir da alteração 29, o modelo já foi considerado calibrado. Dito isso, é importante destacar que este não é um modelo único e que representa a resposta correta e exclusiva. Existem diversos modelos com diferente parâmetros

de entrada que podem chegar no modelo calibrado. Esse ponto remete que dois modelos da mesma edificação podem estar calibrados, embora contenham algumas diferenças entre si.

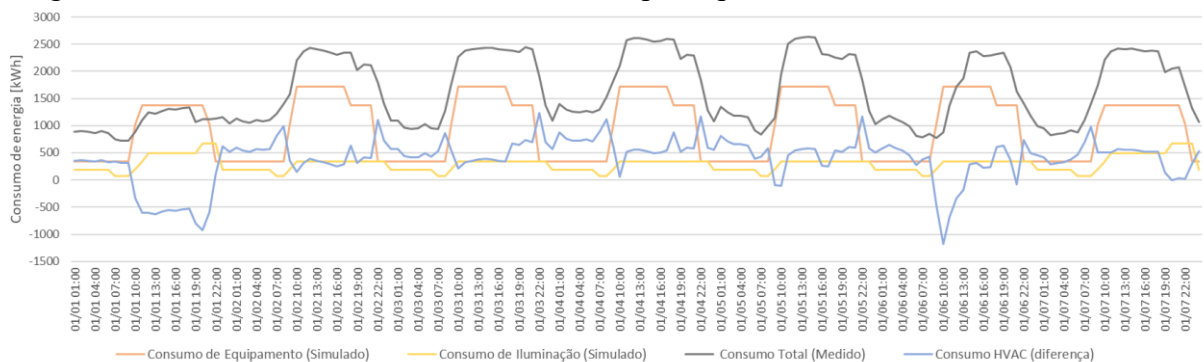
Para uma análise mais detalhada do último modelo simulado (modelo 35), avaliou-se de forma horária o comportamento das diferentes cargas da edificação. A avaliação horária foi feita considerando a composição dos dados medidos e simulados. Dessa forma, para dados simulados considerou-se a carga de base, ou seja, a soma entre o consumo simulado da iluminação e equipamentos. Como dado medido, levou-se em consideração a medição total horária, também conhecida como memória de massa. O consumo do sistema de HVAC foi estimado considerando a diferença entre o consumo total medido e a carga de base simulada.

Esta análise tem como objetivo verificar em mais detalhes o comportamento horário da simulação de um modelo calibrado mensalmente.

A Figura 32 mostra uma semana de simulação com medições ou simulações horárias. Esperava-se que a soma da carga de base com o ar condicionado resultasse no consumo total da edificação. No entanto, a análise da Figura 32 indica que, em alguns momentos do dia, a carga estimada do sistema de HVAC é negativa, ou seja, existe uma diferença entre os consumos simulados e medidos em certos momentos do dia. Esse comportamento é mais evidente entre 9h e 12h.

Em outros momentos momentos do dia, a composição da carga de base e ar condicionado resulta no consumo total da edificação, conforme esperado. Nesse caso, todas as curvas estão acima de zero.

Figura 32 – Análise horária de uma semana composta por variáveis medidas e simuladas.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Embora esta análise siga uma linha exploratória e não uma tomada de decisão do modelo de fato, indica que há pontos de melhorias na simulação. Tal situação representa também que

chegar em um modelo calibrado, isso não significa que não há oportunidade para aperfeiçoamentos na simulação.

Considerando que as diretrizes de calibração apresentam parâmetros para as análises mensais e horárias, é possível inferir que a escolha de um modelo horário pode oferecer maior confiabilidade ao processo de calibração de um modelo de simulação. Contudo, a presente pesquisa não pôde adotar uma abordagem de calibração horária, em virtude das limitações das variáveis disponibilizadas para a análise. Apesar de se ter acesso à memória de massa para a edificação total, não foi possível obter as medições horárias do consumo do sistema de HVAC.

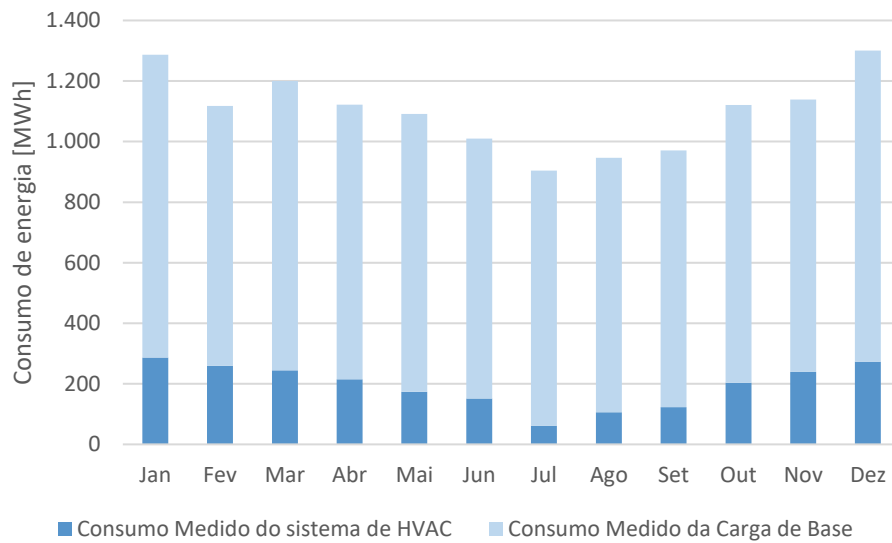
4.3 DIFERENÇAS ENTRE MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO

Uma vez obtido o modelo calibrado, procedeu-se à avaliação das diferenças entre os resultados medidos e simulados, bem como ao seu comportamento ao longo do período de simulação anual. Inicialmente, constatou-se que o consumo total, bem como os valores relativos às cargas de base e de condicionamento de ar, encontravam-se em consonância com os dados medidos. Nesse sentido, as Figuras 33 e 34 ilustram, respectivamente, os consumos totais mensais ao longo do ano de 2019 e a participação do condicionamento de ar em ambos os casos.

Observa-se que o perfil de consumo da medição (Figura 33) apresenta um maior consumo no verão e uma redução no inverno, comportamento que é seguido pela carga de ar condicionado. Esse fato representa a relação entre o consumo total e o consumo de ar condicionado, enquanto a carga de base possui pouca influência nas estações do ano e depende mais do comportamento e número de usuários no local.

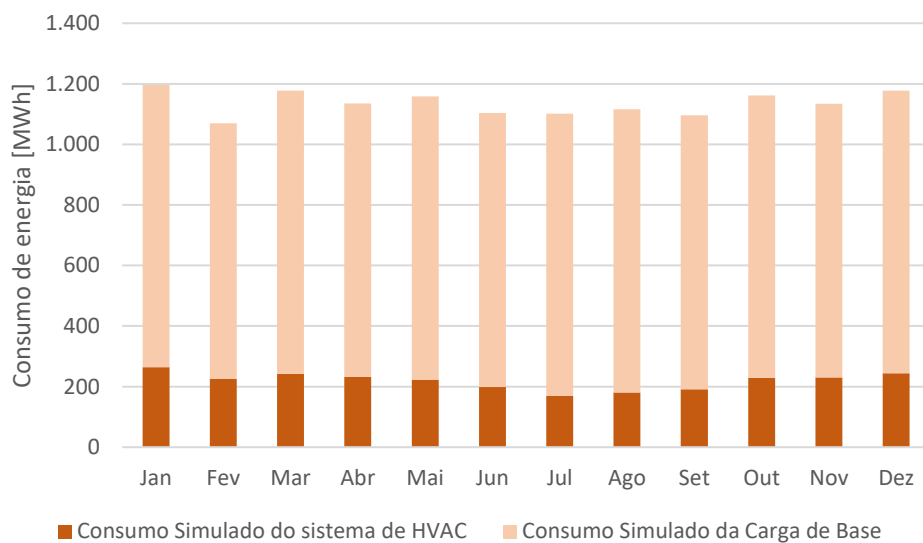
Ao avaliar a Figura 34, referente ao resultado de consumo simulado, percebe-se que o consumo total não apresentou uma variação tão expressiva no mês de inverno. Isso se deve ao perfil de consumo do ar condicionado, que foi praticamente linear ao longo do ano, não representando a realidade encontrada na medição. Esse fator será discutido com mais detalhes na próxima subseção como uma dificuldade do processo de calibração. Apesar das diferenças encontradas, os resultados simulados estão na mesma ordem de grandeza e apresentam uma diferença pequena. As diferenças entre os valores encontrados para o consumo total, o consumo de ar condicionado e a carga de base são apresentadas em mais detalhes nas Figuras 35, 36 e 37, respectivamente.

Figura 33 – Consumo total medido no ano de 2019 separado em condicionamento de ar e carga de base.



Fonte: Adaptado dos dados disponibilizados pela Administração do Shopping Center (2021).

Figura 34 – Consumo total simulado referente ao ano de 2019 separado em condicionamento de ar e carga de base.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Ressalta-se que na Tabela 6, apresentada anteriormente, há quatro colunas que apresentam as diferenças entre os maiores e menores valores entre os modelos em cada simulação. Os valores positivos indicam que a medição é maior do que a simulação (modelo subestimado), enquanto que os valores negativos indicam que a medição é menor do que a simulação (modelo superestimado). Para complementar essa análise, as Figuras 35 e 36

apresentam em que momento essas diferenças ocorrem ao longo do ano. A Tabela 6 apresentou o valor para cada simulação, ao passo que as Figuras 35 e 36 restringem-se a apresentar apenas o último caso de simulação.

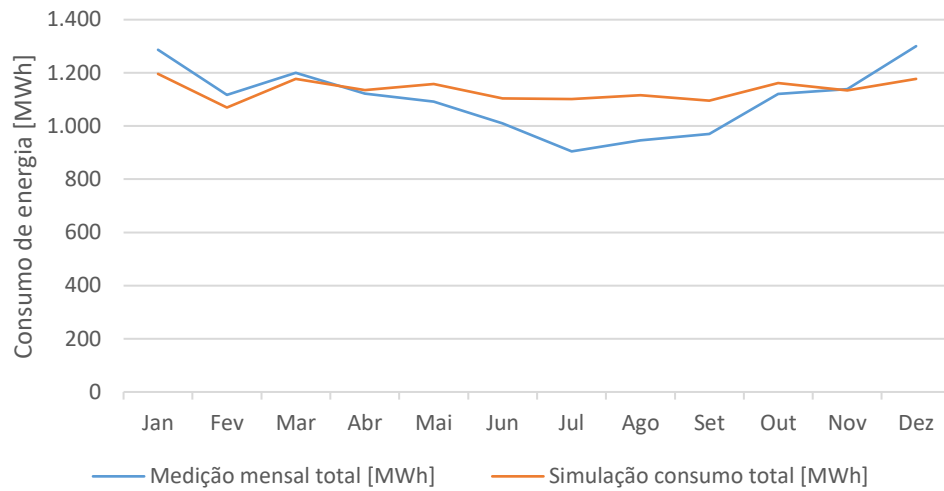
As diferenças dos valores máximos e mínimos para o consumo total da edificação na primeira simulação eram de -486% e -435%, valores distantes da realidade e que indicavam que o resultado da simulação estava superdimensionado. À medida que foram realizadas as simulações, essas diferenças foram reduzindo até chegar a 9% e -22%, em dezembro e julho, respectivamente, conforme é apresentado na Figura 35. Em julho, o consumo mensal simulado era maior que o medido, ou seja, o resultado da simulação estava superestimado. No entanto, em dezembro aconteceu o comportamento inverso, sendo o ponto de maior distância em que a medição foi maior que a simulação (modelo subestimado).

A análise das diferenças entre os pontos máximos e mínimos da simulação também foi realizada para o consumo de ar condicionado. Na primeira simulação, os valores de diferença dos pontos máximos e mínimos eram de -1681% e -3250%, respectivamente. Como os valores são negativos em ambos os casos, isso significa que, em todos os pontos analisados, o resultado da simulação era maior do que a medição, indicando que os parâmetros de entrada precisavam ser reajustados, pois estavam superestimados. Além disso, o resultado também revelou que a diferença na primeira simulação era maior para o consumo de energia do sistema de condicionamento de ar do que para o consumo total da edificação.

No decorrer do modelo, o sistema de HVAC foi aperfeiçoado e, como resultado, a diferença entre os valores dos pontos máximos e mínimos foram reduzidos para 13% e -172%. Essas situações foram analisadas nos meses de fevereiro e julho, onde a simulação apresentou uma diferença subestimada da medição em fevereiro, enquanto que em julho a medição foi menor do que a simulação e o modelo predito estava superestimado (Figura 36).

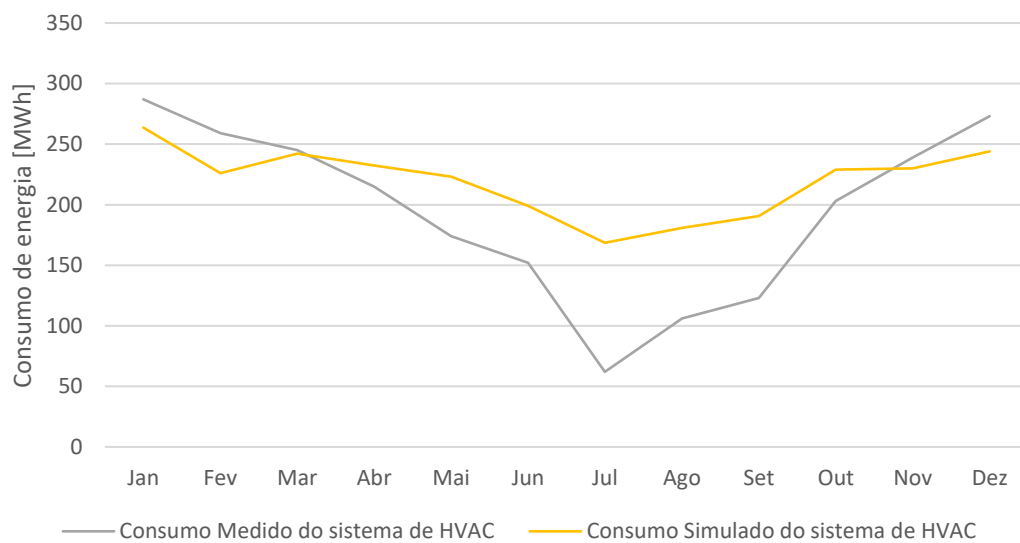
A carga de base (Figura 37) obteve valores muito próximos ao longo do ano e, por isso, não foram analisadas ponto a ponto.

Figura 35 – Comparação mensal entre os dados medidos da edificação total versus simulado.



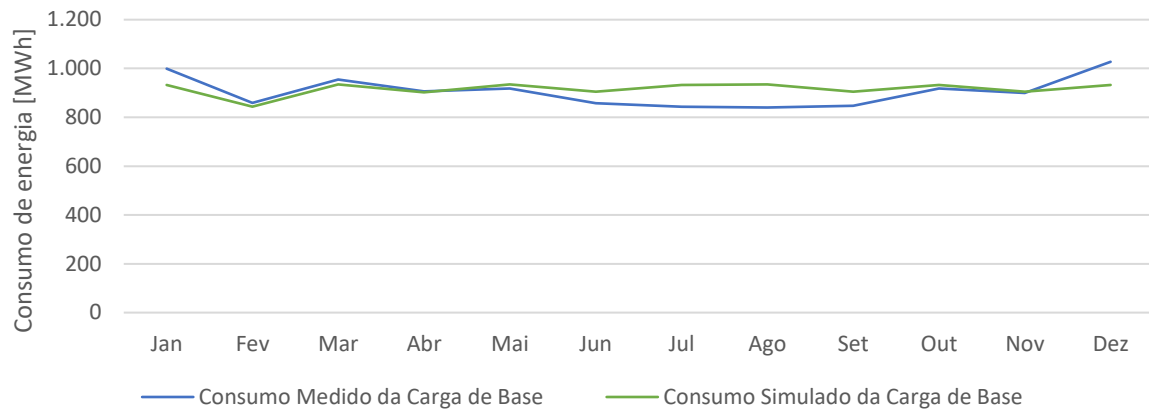
Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Figura 36 – Comparação mensal entre os dados medidos do sistema de HVAC versus simulado.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Figura 37 – Comparação mensal entre a carga de base medida versus simulado.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Outro ponto interessante a ser destacado é a inserção do tanque de armazenamento de água gelada no modelo, o qual trouxe uma grande complexidade e dificuldade na acuracidade do modelo. Esse item foi inserido na simulação a partir da revisão 28 e esperava-se uma redução em todas as variáveis - MBE, CVRMSE e diferenças máximas e mínimas – de forma que o modelo predito ficasse mais próximo do real. No entanto, as variáveis não tiveram um impacto significativo: o MBE passou de -7% para -4%; o CVRMSE permaneceu constante em 10%; e a diferença entre o erro máximo e mínimo para o sistema HVAC passou de -5% para 10% e de -197% para -177%. Mesmo após algumas revisões, o modelo não apresentou melhoria em seu índice.

Este resultado pode ser relacionado à inserção do tanque de armazenamento por meio da interface do OpenStudio. Pelos resultados obtidos e pelas poucas diferenças encontradas, acredita-se que o programa não tenha integrado bem essa entrada no arquivo IDF para realizar os cálculos do EnergyPlus. Por esse motivo, o resultado não mudou tanto quanto o esperado. Houveram tentativas para adicionar e modificar o TES diretamente no EnergyPlus, contudo o modelo apresentou falhas e impossibilitou o uso direto no programa. A inserção dessa opção de tanque de água utilizando o OpenStudio é ainda recente e, portanto, acredita-se que os erros causados são explicados por um problema de intercambialidade de informações entre OpenStudio e EnergyPlus. Até o final deste trabalho não foram desvendados os problemas e acredita-se que este ponto é considerado o de maior desafio em todo o processo de calibração do modelo.

Esse ponto acrescenta dúvidas nas conclusões percebidas do que de fato é um modelo calibrado, uma vez que acredita-se que o tanque de armazenamento não esteja funcionando

conforme sua operação real. Dessa forma, por mais que um importante equipamento não esteja desempenhando de forma correta, ainda é possível chegar a um modelo calibrado. Esse ponto abre margem para discussões da qualidade de um modelo calibrado mensalmente.

Uma das formas de aprimorar a qualidade e acuracidade do modelo, é através da obtenção de mais informações da operação dos sistemas da edificação, tais como a medição horária do sistema de HVAC e possíveis medições in loco dos consumo instantâneos dos motores dos elevadores e escadas rolantes.

Por fim, destaca-se que a calibração de modelos de simulação é um processo contínuo e dinâmico, que deve ser realizado com cuidado e atenção aos detalhes. Assim, mesmo após a calibração do modelo, podem ser necessárias modificações futuras para garantir sua eficácia e precisão.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como foco a calibração de um Shopping Center real, utilizando dados reais e visitas in loco com base na metodologia baseada em evidências. Para a criação do modelo de simulação, foram utilizados dados reais disponibilizados pela Administração da edificação, incluindo medições mensais e horárias do consumo total da edificação, medições mensais do consumo da central de água gelada, plantas elétricas e arquitetônicas, número diário de visitas e visitas presenciais guiadas por operadores do sistema, entre outros. O modelo de simulação foi criado no programa de simulação termoenergética e algumas informações que faltaram foram deixadas no modo padrão do programa, mas buscando-se a opção que mais se assemelhava ao tipo de construção ou equipamento.

Para a criação das schedules, foi realizada uma mineração de dados do website da Google a fim de buscar a curva de ocupação da edificação. Os dados foram extraídos baseado no histórico de ocupação de usuários que permitem à plataforma o rastreamento de sua localização. Após uma certa quantidade de dados, o website da Google apresenta no site quais os momentos do dia de maior ou menor ocupação. Esse ponto foi importante, pois, apesar de se ter o número diário de pessoas que frequentam o Shopping, não se sabia ao certo qual seria a distribuição desses ocupantes ao longo do dia e se haveria distinção da curva de ocupação durante a semana ou final de semana. Após a investigação, descobriu-se uma leve distinção de horário de pico, sendo este sempre no período da tarde, contudo um comportamento semelhante independente do dia da semana.

Referente aos dados disponibilizados, alguns deles foram disponibilizados do período de janeiro de 2016 a maio de 2021. Então, a fim de delimitar o ano de estudo de acordo com as informações encontradas, o ano utilizado para comparação dos valores medidos foram de 2019 por conta de diversas razões. Inicialmente, o ano de 2021 foi descartado por não possuir as informações completas ao longo do ano. Além disso, o ano de 2020 representa um ano de comportamento atípico devido a pandemia Covid-19. Restando os anos de 2016 a 2019 para avaliar qual destes possuía um número de informações mais completas. Por fim, o ano de 2019 foi o único que contou com as informações de memória de massa, ocupação diária e arquivo climático. Sendo assim, ele foi escolhido como foco da pesquisa.

Para a análise de calibração do modelo, esta pesquisa utilizou o Guideline 14 da ASHRAE baseando-se em uma calibração mensal. Os valores buscados eram de até $\pm 5\%$ e 15% para o MBE e CVRMSE, respectivamente.

Foram apresentados os valores encontrados para cada etapa de simulação do modelo, chegando a 35 melhorias. Os primeiros valores encontrados foram muito distantes do exigido para esses indicadores, mas, a medida que o modelo era melhorado, os índices também reduziam. Os últimos valores encontrados foram de -3% e 9% para o MBE e CV RMSE, respectivamente.

No entanto, vale ressaltar que a calibração de modelos de simulação é um processo contínuo e dinâmico, que deve ser realizado de forma cuidadosa e criteriosa. Por esse motivo, mesmo após a caracterização do modelo como calibrado, outras modificações podem ser necessárias em momentos futuros para garantir sua eficácia e precisão.

Além disso, é importante destacar que a análise dos erros e a caracterização do modelo como calibrado não devem ser encaradas como uma solução definitiva para a questão da eficiência energética em edificações. A calibração do modelo de simulação é uma etapa fundamental para a obtenção de resultados confiáveis, mas é preciso que haja uma avaliação crítica e uma análise integrada de todos os aspectos envolvidos no desempenho energético da edificação.

Com isso em mente, buscou-se uma análise mais aprofundada baseado em dados horários. Em uma composição de dados reais horários disponíveis na memória de massa e dados simulados dos equipamentos e iluminação, avaliou-se o comportamento da diferença entre esses valores, que seria o resultado do consumo do ar condicionado horário. Assim, a soma entre os valores de ar condicionado, iluminação e equipamento daria o consumo horário medido da memória de massa. Contudo, percebeu-se que em alguns momentos do dia, o consumo do ar condicionado ficou negativo, ou seja, a composição de equipamentos e iluminação já superou o consumo total da edificação. Embora essa análise seja qualitativa, percebeu-se um ponto frágil no processo de calibração que abre um leque de possibilidades de incoerências dentro do modelo, mas que, mesmo assim, chega a um modelo calibrado. Dessa forma, conclui-se que nem sempre que um resultado seja satisfatório, ele está longe de erros.

Para avançar no estudo ou calibração do modelo em base horária seriam necessárias mais informações que não estavam disponíveis até a finalização da pesquisa. Uma das informações essenciais para atingir uma calibração horária é o consumo horário medido do sistema de HVAC. Este ponto fica como uma sugestão para trabalhos futuros, pois possibilitaria melhorar o modelo, avaliar as incertezas hora a hora, mitigar erros avaliando o momento do dia que estes mais aparecem, entre outros.

Como considerações finais, deve-se ressaltar as limitações relacionadas à modelagem da edificação. A calibração de um modelo de simulação envolve muitas variáveis, sendo um processo delicado e criterioso. Percebeu-se uma dificuldade muito grande em encontrar todas as variáveis necessárias para adicionar ao programa, destacando-se os detalhes da construção da edificação e a curva de operação dos chillers. Neste caso, pesquisas para adicionar variáveis semelhantes foram realizadas, mas trazem consigo uma incerteza que não fora medida neste trabalho. Além disso, houveram desafios e limitações na integração do programa OpenStudio e EnergyPlus. O objetivo de utilizar o OpenStudio foi para facilitar a inserção de dados, uma vez que a interface desse programa é mais amigável que a do EnergyPlus. No entanto, conclui-se que até certo ponto a sua utilização facilita, porém ao inserir itens mais complexos, por exemplo um tanque de água gelada para armazenamento de energia térmica, a plataforma não realiza uma boa e correta integração com o EnergyPlus. Indica-se, assim, o uso direto do EnergyPlus para a análise de tanque de armazenamento de energia.

Apesar das dificuldades encontradas, o objetivo do trabalho foi alcançado. O modelo foi calibrado seguindo a metodologia baseada em evidências e uma análise crítica sobre o processo de calibração foi feita. Assim, a partir dos resultados apresentados e das análises realizadas, pode-se concluir que o processo de simulação e calibração do modelo foi bem sucedido, permitindo a obtenção de resultados precisos e confiáveis sobre o desempenho energético da edificação estudada. No entanto, é fundamental que a calibração do modelo seja vista como um processo contínuo e que outras análises e avaliações sejam realizadas de forma integrada para garantir a efetividade da calibração e melhoria no modelo.

Por fim, embora não seja o foco deste trabalho, o modelo final pode ser utilizado para analisar medidas de eficiência energética, retrofits e benchmarks com outras edificações.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As principais recomendações para trabalhos futuros são:

- Medição horária da Central de Água Gelada, buscando a calibração horária do modelo;
- Análise de medidas de eficiência energética;
- Análise mais detalhada do comportamento do tanque de armazenamento de água gelada e o impacto do mesmo no modelo;
- Análise de sensibilidade das variáveis de entrada do modelo.

REFERÊNCIAS

- ABRACEL. **Abracel**, 2023. Disponível em: <https://abraceel.com.br/mercado-livre/diferencas-entre-consumidores-livres-e-cativos/>. Acesso em: 9 mar. 2023.
- ABRASCE. 2023. Disponível em: <https://abrasce.com.br/numeros/inauguracoes/>. Acesso em: 2 mar. 2023.
- AHRI - AIR-CONDITIONING, HEATING, AND REFRIGERATION INSTITUTE. **Standard 901 (SI)**: Performance rating of thermal storage equipment used for cooling. 2014.
- ALVA, G.; LIN, Y.; FANG, G. An overview of thermal energy storage systems. **Energy**. v. 144, p. 341–378, 2018.
- ALVA, G; LIU, L.; HUANG, X.; FANG, G. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 68, p. 693–706, 2017.
- ANEKE, M.; WANG, M. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. **Applied Energy**. v. 179, p. 350–377, 2016.
- _____. **Ar Condicionado**: Guia prático sobre sistemas de água gelada. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, DF, Brasil: 2017a.
- _____. **Ar condicionado**: Manual sobre sistemas de água gelada. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, DF, Brasil: 2017b.
- ARTECONI, A.; HEWITT, N. J.; POLONARA, F. State of the art of thermal storage for demand-side management. **Applied Energy**. v. 93, p. 371–389, 2012.
- ASHRAE. **Standard 90.1: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. 2016. Disponível em: www.ashrae.org. .
- ASHRAE, “American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineering (ANSI/ASHRAE)”. **ANSI/ASHRAE 169-2013 Climatic data for building design standards**. [s.l: s.n.]. 2013. v. 8400
- ASHRAE. Guideline 14-2002: measurement of energy and demand savings. Atlanta, GA 30329: American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers; 2002.
- BERTAGNOLIO, Stéphane; ANDRE, Philippe; LEMORT, Vincent. Simulation of a building and its HVAC system with an equation solver: Application to audit. **Building Simulation**, v. 3, n. 2, p. 139–152, 2010.
- BIYANTO, Totok R. *et al.* Thermal Energy Storage Optimization in Shopping Center Buildings. **Journal of Engineering and Technological Sciences**, v. 47, n. 5, p. 549–567, 2015.
- BOINTNER, Raphael; TOLEIKYTĖ, Agnė. **ENERGY EFFICIENT DESIGN IN SHOPPING CENTRES-ENERGY DEMAND SCENARIO MODELLING UNTIL 2030**. 2016. Disponível em: <http://susproc.jrc.ec.europa.eu/activities/emas/documents/RetailTradeSector.pdf>. .
- BR MALLS. **BRMALLS**. 2016. Disponível em: <http://brmalls.riweb.com.br/historia-da-evolucao-do-setor>. Acesso em: 4 abr. 2022.

CANBAY, Caglar Selcuk; HEPBASLI, Arif; GOKCEN, Gulden. Evaluating performance indices of a shopping centre and implementing HVAC control principles to minimize energy usage. **Energy and Buildings**, v. 36, n. 6, p. 587–598, 2004.

CARRIER. 2022. Disponível em: <https://www.carrier.com/commercial/pt/pt/produtos/ar-condicionado/chillers-de-absorcao/>. Acesso em: 30 set. 2022.

CBCS. 2013. Disponível em: <http://www.cbcs.org.br/website/benchmarking-energia/show.asp>. Acesso em: 2 jun. 2022.

CCEE. 2023. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/-/mercado-livre-de-energia-bate-recorde-de-migracao-de-unidades-consumidoras-em-2021>. Acesso em: 2 jun. 2023.

CHONG, Adrian *et al.* Bayesian calibration of building energy models with large datasets. **Energy and Buildings**, v. 154, p. 343–355, 2017.

CLARKE JA, Strachan PA, Pernot C. An approach to the calibration of building energy simulation models. *ASHRAE Trans* 1993;99:917.

CLIMATE ONE. 2023. Disponível em: www.climate.onebuilding.org. Acesso em: 3 jun. 2023.

COAKLEY, D.; RAFTERY, P.; KEANE, M. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 37, p. 123–141, 2014.

CRAWLEY, Drury B. *et al.* Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 661–673, 2008.

CRAWLEY, Dru; LAWRIE, Linda. **Repository of free climate data for building performance simulation: Brazil, Region 3 - South America**. 2019. Disponível em: http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html. Acesso em: 21 nov. 2019.

CRAWLEY D, Lawrie L. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. **Energy Build** 2001;33:319–31.

DA SILVA, Pedro Paulo Fernandes; NETO, Alberto Hernandez; SAUER, Ildo Luis. Evaluation of model calibration method for simulation performance of a public hospital in Brazil. **Energies**, v. 14, n. 13, p. 1–20, 2021.

DEO. 2015. Disponível em: <https://plataformadeo.cbcs.org.br/edificio-publico/>. Acesso em: 2 fev. 2023.

DINCER, I.; ROSEN, M. A. **Thermal Energy Storage Systems and Applications**. 2nd. ed. John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

DINCER, I. On thermal energy storage systems and applications in buildings. **Energy and Buildings**. v. 34, p. 377–388, 2002.

ENERGIA. 2023. Disponível em: <https://www.mercadolivredeenergia.com.br/consumidores-livres-e-especiais/conceito/>. Acesso em: 9 mar. 2023.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2021: ano base 2020**. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf. Acesso em: 2 mar. 2023.

ESRU. ESP-r. Glasgow, Scotland G1 1XJ: Energy Systems Research Unit, University of Strathclyde; 1974.

EVO. **International Performance Measurement and Verification Protocol; Efficiency Valuation Organization**: Toronto, ON, Canada, 2011.

FASIUDDIN, M.; I. BUDAIWI; ABDU, A. Zero-investment HVAC system operation strategies for energy conservation and thermal comfort in commercial buildings in hot-humid climate. **International Journal of Energy Research**, v. 33, n. 4, p. 23–40, 2012.

GBC. 2023. Disponível em: <https://www.gbcbrasil.org.br/certificacao/certificacao-lead/>. Acesso em: 2 abr. 2023.

GOMES, Renata Maria de Almeida Bastos; PAULA, Fabio de Oliveira; MACEDO-SOARES, T. Diana L. van Aduard de. Strategic alliances of shopping centers in Brazil: network perspective. **Management Research**, v. 15, n. 2, p. 167–186, 2017.

GONÇALVES, Tiago Estevam; GUIMARÃES, Pedro; CACHINHO, Herculano. The role of shopping centres in the metropolization process in fortaleza (Brazil) and lisbon (Portugal). **Human Geographies**, v. 14, n. 2, p. 197–214, 2020.

GUIDELINE 14-2002; **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers**: Atlanta, GA, USA, 2002.

HEIER, J.; BALES, C.; MARTIN, V. Combining thermal energy storage with buildings - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 42, p. 1305–1325, 2015.

_____. **HVAC Systems and Equipments Handbook**. 2016b.

IEA. IEA. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/buildings>. .

JUAIDI, Adel *et al.* Energy benchmarking for shopping centers in Gulf Coast region. **Energy Policy**, v. 91, p. 247–255, 2016.

KANI-SANCHEZ, Cassandra; RICHMAN, Russell. Incorporating variable refrigerant flow (VRF) heat pump systems in whole building energy simulation – Detailed case study using measured data. **Journal of Building Engineering**, v. 12, n. April, p. 314–324, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2017.06.016>.

Klein SA, Beckman WA, Mitchell JW, Duffie JA, Duffie NA, Freeman TL, et al. TRNSYS 16-A, transient system simulation program. Madison, WI, USA: University of Wisconsin; 1979. For more info, (<http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>).

LAM, Khoo Poh *et al.* An energyplus whole building energy model calibration method for office buildings using occupant behavior data mining and empirical data. *Em*: , 2014. **2014 ASHRAE/IBPSA-USA Building Simulation Conference**. 2014. p. 160–167. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/272814313_An_energyplus_whole_building_energy_model

_calibration_method_for_office_buildings_using_occupant_behavior_data_mining_and_empirical_data.

LAM, Joseph C; LI, Danny H W. **Electricity consumption characteristics in shopping malls in subtropical climates**. 2002. Disponível em: www.elsevier.com/locate/enconman. .

LIU, Mingsheng; CLARIDGE, D. E. Use of calibrated hvac system models to optimize system operation. **Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME**, v. 120, n. 2, p. 131–138, 1998.

LYU, Yan *et al.* An automated process to calibrate building energy model based on schedule tuning and signed directed graph method. **Journal of Building Engineering**, v. 35, n. November 2020, 2021.

M&V Guidelines: **Measurement and Verification for Performance-Based Contracts Version 4.0**; U.S. Department of Energy: Washington, DC, USA, 2015.

NETO, Alberto Hernandez; FIORELLI, Flávio Augusto Sanzovo. Comparison between detailed model simulation and artificial neural network for forecasting building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 12, p. 2169–2176, 2008.

NORFORD, L. K. *et al.* Two-to-one discrepancy between measured and predicted performance of a “low-energy” office building: insights from a reconciliation based on the DOE-2 model. **Energy and Buildings**, v. 21, n. 2, p. 121–131, 1994.

PAN, Yiqun; HUANG, Zhizhong; WU, Gang. Calibrated building energy simulation and its application in a high-rise commercial building in Shanghai. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 6, p. 651–657, 2007.

PENG, Bao *et al.* Building energy consumption prediction and energy control of large-scale shopping malls based on a noncentralized self-adaptive energy management control system. **Energy Exploration and Exploitation**, v. 39, n. 5, p. 1381–1393, 2021.

RAFTERY, Paul; KEANE, Marcus; COSTA, Andrea. Calibrating whole building energy models: Detailed case study using hourly measured data. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 12, p. 3666–3679, 2011.

RAFTERY, Paul; KEANE, Marcus; O'DONNELL, James. Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 9, p. 2356–2364, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.020>.

REDDY, T. A. Literature review on calibration of building energy simulation programs: Uses, problems, procedure, uncertainty, and tools. **ASHRAE Transactions**, v. 112 PART 1, n. 4844, p. 226–240, 2006. Disponível em: http://auroenergy.com/wp-content/uploads/2016/05/2006_Reddy_ASHRAE-Trans_Literature-Review-on-Calibration.pdf.

REDDY, T. Agami; ANDERSEN, Klaus K. An evaluation of classical steady-state off-line linear parameter estimation methods applied to chiller performance data. **HVAC and R Research**, v. 8, n. 1, p. 101–124, 2002.

REDDY, T. Agami; MAOR, Itzhak; PANJAPORNPON, Chanin. Calibrating detailed building energy simulation programs with measured data—part I: General methodology (RP-1051). **HVAC and R Research**, v. 13, n. 2, p. 221–241, 2007a.

REDDY, T. Agami; MAOR, Itzhak; PANJAPORNPNON, Chanin. Calibrating detailed building energy simulation programs with measured data—part II: Application to three case study office buildings (RP-1051). **HVAC and R Research**, v. 13, n. 2, p. 243–265, 2007b.

REDDY, T. Agami; MAOR, Itzhak; PANJAPORNPNON, Chanin. Calibrating detailed building energy simulation programs with measured data—part II: Application to three case study office buildings (RP-1051). **HVAC and R Research**, v. 13, n. 2, p. 243–265, 2007c.

RISMANCHI, B.; SAIDUR, R.; BOROUMANDJAZI, G.; AHMED, S. Energy, exergy and environmental analysis of cold thermal energy storage (CTES) systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 16 p. 5741–5746, 2012a.

SHOPPING CENTER A. 2023. Disponível em: <https://revistashoppingcenters.com.br/capa/shopping-centers-censo/>. Acesso em: 2 jun. 2022.

SHOPPING CENTER B. 2023. Disponível em: <https://revistashoppingcenters.com.br/vitrine/mercado-livre/>. Acesso em: 2 jun. 2022.

SALTELLI, A. *et al.* **Global Sensitivity Analysis: the primer**. Ispra: John Wiley & Sons, Ltd, 2008. *E-book*. Disponível em: http://www.andreasaltelli.eu/file/repository/A_Saltelli_Marco_Ratto_Terry_Andres_Francesca_Campolongo_Jessica_Cariboni_Debora_Gatelli_Michaela_Saisana_Stefano_Tarantola_Global_Sensitivity_Analysis_The_Primer_Wiley_Interscience_2008_.pdf. Acesso em: 2 jun. 2023.

SENTELHAS, Paulo Cesar *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

SOARES GERALDI, Matheus *et al.* Assessment of the energy consumption in non-residential building sector in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 273, 2022.

STOECKER, W.F.; JONES, J.W. **Refrigeração e ar condicionado**. McGraw Hill. São Paulo: 1985.

SUN, Kaiyu *et al.* Stochastic modeling of overtime occupancy and its application in building energy simulation and calibration. **Building and Environment**, v. 79, p. 1–12, 2014.

SUN, Y.; LIU, L.; ZHU, T.; CHEN, S., CAO, Z. Peak load shifting control using different cold thermal energy storage facilities in commercial buildings: A review. **Energy Conversion and Management**. v. 71, p. 101–114, 2013.

TRANE A. 2022. Disponível em: <https://www.trane.com/commercial/latin-america/br/pt/products-systems/chillers/air-cooled-chillers.html>. Acesso em: 30 set. 2022.

TRANE B. 2022. Disponível em: <https://www.trane.com/commercial/latin-america/br/pt/products-systems/chillers/water-cooled-chillers.html>. Acesso em: 30 set. 2022.

TOURETZKY, C. R.; BALDEA, M. A hierarchical scheduling and control strategy for thermal energy storage systems. **Energy and Buildings**. v. 110, p. 94–107, 2016.

ZHENG, Zhuling *et al.* A method to evaluate building energy consumption based on energy use index of different functional sectors. **Sustainable Cities and Society**, v. 53, 2020.

WINKELMANN F, Birdsall B, Buhl W. DOE-2 supplement: version 2.1 e. LBL-34947. Berkeley: Calif Lawrence Berkeley Lab; 1993.

APÊNDICE A – Parâmetros do sistema de climatização de ar no programa EnergyPlus

A Planilha 1 apresenta os parâmetros de entrada dos sistemas de climatização de ar, inseridos no programa OpenStudio e utilizado como base para o EnergyPlus.

Planilha 1 – Parâmetros dos sistemas de climatização de ar.

Objeto do EnergyPlus	Parâmetro no EnergyPlus	Unidade	Valor
Design Specification: OutdoorAir	Outdoor Air Flow per Person	m ³ /s.person	0,0075
Sizing: Parameters	Cooling Sizing Factor	-	1,15
Sizing:Zone	Zone Cooling Design Supply Air Temperature	°C	14
Sizing:Zone Fan:Variable Volume	Zone Cooling Design Supply Air Temperature Difference	°C	11,11
	Zone Cooling Design Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryair	0.0085
	Fan Total Efficiency	-	0.691
Fan:Variable Volume Coil:Cooling: Water	Pressure rise	Pa	434.12
	Fan Power Minimum Flow Fraction	-	172.907
	Motor efficiency	-	0.93
	Motor In Airstream Fraction	-	1
	Design Water Flow Rate	m ³ /s	0.022106805
Coil:Cooling: Water Pump:Variable Speed (circuito primário)	Design Air Flow Rate	m ³ /s	44.43385178
	Design Inlet Water Temperature	°C	autosize
	Design Inlet Air Temperature	°C	autosize
	Design Outlet Air Temperature	°C	autosize

Objeto do EnergyPlus	Parâmetro no EnergyPlus	Unidade	Valor
Coil:Cooling: Water Pump:Variable Speed (circuito primário)	Design Inlet Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryair	autosize
	Design Outlet Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryair	autosize
	Rated Flow Rate	m³/s	0.046166
Pump:Variable Speed (circuito primário) Pump:Variable Speed (circuito secundário)	Rated Pump Head	Pa	147062
	Rated Power Consumption	W	8826
	Motor Efficiency	-	0,9
	Fraction of Motor Inefficiencies to Fluid Stream	-	0
	Rated Flow Rate	m³/s	0.046166
Pump:Variable Speed (circuito secundário) Pump:Variable Speed (circuito de condensação)	Rated Pump Head	Pa	147062
	Rated Power Consumption	W	8826
	Motor Efficiency	-	0,9
	Fraction of Motor Inefficiencies to Fluid Stream	-	0
	Rated Flow Rate	m³/s	0.208111
Pump:Variable Speed (circuito de condensação) Chiller:Electric: EIR (circuito primário)	Rated Pump Head	Pa	254907.6
	Rated Power Consumption	W	67224
	Motor Efficiency	-	0,9
	Fraction of Motor Inefficiencies to Fluid Stream	-	0
	Reference Capacity	kW	3868200

Objeto do EnergyPlus	Parâmetro no EnergyPlus	Unidade	Valor
Pump:Variable Speed (circuito de condensação) Chiller:Electric: EIR (circuito primário)	Fraction of Motor Inefficiencies to Fluid Stream	-	0
	Reference Capacity	kW	3868200
Chiller:Electric: EIR (circuito primário) Chiller:Electric: EIR Cooling Capacity Function of Temperature Curve Name Curve Biquadratic 15	Reference COP	W/W	6.5
	Reference Leaving Chilled Water Temperature	°C	12.3
	Reference Entering Condenser Fluid Temperature	°C	29,4
	Reference Chilled Water Flow Rate	m³/s	autosize
	Reference Condenser Fluid Flow Rate	m³/s	0.092364
	Minimum Part Load Ratio	-	0.1
	Maximum Part Load Ratio	-	1
	Optimum Part Load Ratio	-	1
	Minimum Unloading Ratio	-	0.2
	Condenser Type	-	Water
	Fraction of Compressor Electric Consumption Rejected by Condenser	-	1
	Leaving Chilled Water Lower Temperature Limit	°C	5.555
Chiller:Electric: EIR (circuito primário) Chiller:Electric: EIR Cooling Capacity Function of Temperature Curve Name Curve Biquadratic 15	Chiller Flow Mode	-	ConstantFlow
	Sizing Factor	-	0.7
	Coefficient1 Constant		0.09566057

Objeto do EnergyPlus	Parâmetro no EnergyPlus	Unidade	Valor
Chiller:Electric: EIR Cooling Capacity Function of Temperature Curve Name Curve Biquadratic 15 Chiller:Electric: EIR Electric Input to Cooling Output Ratio Function of Temperature Curve Name Curve Biquadratic 16	Coefficient2 x		-0.02457943
	Coefficient3 x ²		-0.006827143
	Coefficient4 y		0.0711936
	Coefficient5 y ²		-0.00204768
	Minimum Value of x		5.555
	Maximum Value of x		8.89
	Minimum Value of y		23.89
	Maximum Value of y		35
	Coefficient1 Constant		1.243313
Chiller:Electric: EIR Electric Input to Cooling Output Ratio Function of Temperature Curve Name Curve Biquadratic 16 Chiller:Electric: EIR Electric Input to Cooling Output Ratio Function of Part Load Ratio Curve Name Curve Quadratic 11	Coefficient2 x		-0.03031784
	Coefficient3 x ²		0.003452464
	Coefficient4 y		-0.02739941
	Coefficient5 y ²		0.00091417
	Coefficient6 x*y		-0.00100008
	Minimum Value of x		5.555
	Maximum Value of x		8.89
	Minimum Value of y		23.89
	Maximum Value of y		35
	Coefficient1 Constant		0.1871377

Objeto do EnergyPlus	Parâmetro no EnergyPlus	Unidade	Valor
Chiller:Electric: EIR Eletric Input to Cooling Output Ratio Function of Part Load Ratio Curve Name Curve Quadratic 11 ThermalStorage: ChilledWater Stratified	Coefficient2 x		0.5849639
	Coefficient3 x ²		0.2291447
	Minimum Value of x		0.2
	Maximum Value of x		1.03
	Tank Volume	m ³	3750
ThermalStorage: ChilledWater Stratified CoolingTower:Single Speed (circuito de condensação)	Tank Height	m	10
	Tank Shape	-	Vertical Cylinder
	Deadband Temperature Difference	°C	2.5
	Temperature Sensor Height	m	5
	Minimum Temperature Limit	°C	4
	Ambient Temperature Indicator	-	Zone
	Uniform Skin Loss Coefficient per Unit Area to Ambient	W/m ² .K	0.5
	Use Side Inlet Height	m	9.85
	Use Side Outlet Height	m	0.15
	Use Side Heat Transfer Effectiveness	-	1
	Use Side Design Flow Rate	m ³ /s	autosize
	Source Side Inlet Height	m	9.85
	Source Side Outlet Height	m	0.15

Objeto do EnergyPlus	Parâmetro no EnergyPlus	Unidade	Valor
ThermalStorage: ChilledWater Stratified CoolingTower:Single Speed (circuito de condensação)	Source Side Design Flow Rate	m ³ /s	autosize
	Tank Recovery Time	hr	4
	Number of Nodes	-	6
	Design Water Flow Rate	m ³ /s	0.2077778
CoolingTower:Single Speed (circuito de condensação)	Design Air Flow Rate	m ³ /s	Autosize
	Fan Power at Design Air Flow Rate	W	44129.9
	Evaporation Loss Factor	%/°C	0.87
	Design Inlet Air Dry-Bulb Temperature	°C	35
	Design Approach Temperature	°C	29.5
	Design Range Temperature	°C	5.5