



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Veronica Martins Gnecco

Desenvolvimento de um modelo de *benchmarking* local para as escolas públicas de ensino infantil de Florianópolis

Florianópolis

2021

Veronica Martins Gnecco

Desenvolvimento de um modelo de *benchmarking* local para as escolas públicas de ensino infantil de Florianópolis

Defesa submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina, para obtenção do título de mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Profa. Michele Fossati, Dra.

Coorientadora: Maria Andrea Triana Montes, Dra.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pela autora,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC

Gnecco, Veronica Martins

Desenvolvimento de um modelo de benchmarking local para as escolas públicas de ensino infantil de Florianópolis/ Veronica Martins Gnecco; orientadora, Michele Fossati, coorientadora, Maria Andrea Triana, 2021.

99 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Benchmarking energético. 3. Edificação educacional. 4. Auditorias energéticas. 5. Simulação energética. I. Fossati, Michele. II. Triana, Maria Andrea. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Veronica Martins Gnecco

Desenvolvimento de um modelo *benchmarking* local para as escolas públicas de ensino infantil de Florianópolis

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Roberto Lamberts, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Profª. Ana Paula Melo, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Ana Carolina de Oliveira Veloso, Dra.
Centro Universitário UNA

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Arquitetura e Urbanismo

Prof. Paolo Colosso, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

Profª. Michele Fossati, Dra.
Orientadora

Florianópolis, 2021.

Este trabalho é dedicado aos pesquisadores do Brasil.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos aqueles que me auxiliaram no meu desenvolvimento pessoal e profissional ao longo desses dois anos de mestrado.

Primeiramente às minhas orientadora e coorientadora, Michele Fossati e Andrea Triana, que sempre estiveram dispostas para encontrar um caminho possível, com paciência e dedicação.

À minha família, que apoiou as minhas escolhas profissionais e me deu a segurança necessária para seguir em frente: meu pai, Ivan Gnecco, minha mãe, Rose Miriam Martins Gnecco, e meu irmão, Davi. Ao Manuel Orlandini, pela paciência, apoio e amor em todos os momentos.

Aos meus amigos, por buscar entender as minhas dúvidas, compartilhar momentos de alegria e me ajudar a compreender melhor os meus objetivos, em especial à Giovanna Tanferri e ao Caio Escoté.

Aos meus colegas de laboratório, que participaram de pesquisas e discussões, compartilharam experiências e me motivaram no dia-a-dia: Artur Kamimura, Rafael Giaretta, Matheus Geraldi e Emeli da Guarda.

Por fim, um agradecimento especial à Universidade Federal de Santa Catarina, por permitir que haja ensino e produção científica de qualidade mesmo com todas as dificuldades do momento atual no país.

*“La sostenibilità consiste nel costruire
pensando al futuro” (Renzo Piano)*

RESUMO

Os modelos de *benchmarking* auxiliam no processo de decisão para engenheiros, arquitetos e investidores. O método e o modelo utilizados para construção dos *benchmarks* energéticos têm impacto direto nesses resultados. Quando a edificação analisada possui valores de consumo energético mais elevados que o valor típico do estoque de que faz parte, por exemplo, indica a necessidade de melhorias de desempenho e medidas de *retrofit* energético. O objetivo dessa dissertação de mestrado é construir um modelo local de *benchmarking* das escolas públicas de ensino infantil, para posterior comparação com o modelo que representa o estoque nacional de edificações. O primeiro foi desenvolvido a partir dos dados obtidos para o município de Florianópolis-SC; o segundo foi obtido de um projeto do Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. O modelo local foi construído em quatro etapas: coleta de dados, incluindo auditorias energéticas nas edificações; construção do arquétipo; simulações energéticas e regressão linear múltipla, para formação da equação de *benchmark*. Os usos-finais das edificações auditadas também foram discutidos. Por fim, os dois modelos de *benchmarking* foram comparados com a utilização de dados reais de 12 edificações de ensino infantil de Florianópolis, por meio de classificação energética do desempenho e de um teste ANOVA, considerando os resultados encontrados para o consumo energético típico das edificações, nas duas escalas. Os resultados mostraram que não existem diferenças significativas entre os dois modelos de *benchmarking* para o caso das escolas de ensino infantil de Florianópolis. Essa dissertação propõe uma discussão sobre a abrangência de modelos de *benchmarking* e se a avaliação de desempenho de edificações específicas pode ser realizada com modelos que consideram um grande estoque de análise.

Palavras-chave: Simulação energética. Edificações educacionais. Arquétipo. Auditorias energéticas. Modelo de *benchmarking*.

ABSTRACT

Urban planners, architects, engineers and stakeholders benefit from energy benchmarking models for the decision-making process. Both method and sample used to build the benchmarking models impact directly in its results. Energy consumptions higher than the typical value of a building stock, for example, indicate a need for performance improvement and refurbishment measures. This study aims to construct a *benchmarking* model for the public nursery schools of Florianópolis, and then compare with the national *benchmarking* model. The first one was developed using local data of the Southern Brazilian city Florianópolis. The national benchmarking model was obtained from a project by the Brazilian Council for Sustainable Construction. The local benchmarking model was constructed in four steps: data collection, including the performance of energy audits; archetype modelling; energy simulations and multiple linear regression to form the benchmark equation. The energy end-use for the audit building were also discussed. Then, the models were compared using data of 12 actual nursery schools, through the comparison of their energy performance classification and an ANOVA test considering the results found for the typical values. No significant differences between the models were found for the specific city analysed. It should be performed after the national benchmarking model was concluded and analysed. This paper proposes a discussion of the comprehensiveness of benchmarking models and if they indeed are able to evaluate the energy performance of specific buildings.

Keywords: Energy simulation. Educational building. Archetype. Energy audit. Benchmarking model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo energético de edificações públicas por tipologia: Florianópolis	17
Figura 2 - Áreas para coleta de dados para a criação de edificações de referência.....	28
Figura 3 – Representação geométrica do modelo de <i>benchmarking</i> energético das escolas infantis brasileiras, (a) volumetria e (b) planta baixa esquemática	37
Figura 4 - Método da pesquisa	43
Figura 5 - Mapa das escolas infantis de Florianópolis	45
Figura 6 - Distribuição da análise de projetos arquitetônicos e auditorias energéticas.....	47
Figura 7 – Condicionamento das salas de aula em cada cenário.....	54
Figura 8 - Esquema das salas de aula em escolas infantis.....	63
Figura 9 - Fachada externa e corredor interno na escola de ensino infantil B08	64
Figura 10 – Planta baixa esquemática da escola de ensino infantil B01	64
Figura 11 - Medição com o <i>Yokogawa</i> dos refrigeradores.....	48
Figura 12 - Lavanderia na escola de ensino infantil B11	66
Figura 13 - Estratégias de Proteção Solar nas escolas de ensino infantil B04	68
Figura 14 - Comparação do Consumo Real com o Consumo Estimado para a escola de ensino infantil B11	69
Figura 15 - Resumo dos usos finais para o consumo energético estimado na escola de ensino infantil B11	70
Figura 16 - Usos Finais estimados, considerando condicionamento artificial nas salas de aula, na escola de ensino infantil B11	71
Figura 17 – Modelo 3D do arquétipo local (a).....	72
Figura 18 – Planta baixa esquemática para o arquétipo local.....	73
Figura 19 - Consumo energético nos três cenários descritos, nas quatro orientações.....	74
Figura 20 – Resultados da análise de sensibilidade com as variáveis: (a) densidade de iluminação; (b) padrão de iluminação; (c) envoltória; (d) densidade de pessoas; (e) porcentagem de uso de condicionamento de ar em salas de aula; (f) porcentagem de uso de condicionamento de ar em salas administrativas; (g) padrão de uso de condicionamento de ar em salas de aula	75
Figura 20 – Processo de decisão para construção e estudo de modelos de <i>benchmarking</i>	82

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características coletadas dos projetos arquitetônicos	46
Quadro 2 - Parâmetros variados nas simulações energéticas	55
Quadro 3 – Características das edificações de ensino infantil analisadas em profundidade....	61
Quadro 4 – Valores e parâmetros adotados no arquétipo local	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características variadas durante as simulações energéticas para o modelo de <i>benchmarking</i> nacional.....	39
Tabela 2 – Quantidade de dados analisados para cada etapa da pesquisa.....	48
Tabela 3 – Levantamento do número de pavimentos das edificações da amostra	58
Tabela 4 – Levantamento do formato das edificações da amostra	58
Tabela 5 – Levantamento das cores nas paredes externas e nas coberturas das edificações da amostra	59
Tabela 6 – Resumo dos valores de consumo energético por unidade de área e do número de alunos encontrados para a amostra analisada	60
Tabela 7 – Valores medidos em equipamentos nas escolas de ensino infantil.....	66
Tabela 8 – Porcentagens dos principais usos finais nas escolas de ensino infantil	71
Tabela 9 – Variáveis para o <i>benchmark</i> local.....	78
Tabela 10 – Classificação de desempenho para 12 escolas de ensino infantil de Florianópolis	79
Tabela 11 – Diferenças entre o consumo energético real e os resultados pelos modelos de <i>benchmarking</i>	80
Tabela 12 – Resumo do teste ANOVA	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN - Balanço Energético Nacional

CB3E - Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações

CBCS - Conselho Brasileiro de Construção Sustentável

COP - *Coefficient of Performance*

EIA - *U.S. Energy Information Administration*

EPBD - *Energy Performance of Buildings Directive*

EUA - Estados Unidos da América

EUI - *Energy Use Intensity*

IEA - *International Energy Agency*

INI-C - Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas

INI-R - Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

LED - *Light Emitting Diode*

LEED - *Leadership in Energy and Environmental Design*

NBR - Norma Técnica Brasileira

NZEB - Nearly Zero Energy Buildings – Edificações de Energia Quase Zero

PEE - Programa de Eficiência Energética

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos.....	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
1.2	Delimitações da pesquisa.....	19
1.3	Organização do documento	20
2	Referencial teórico.....	21
2.1	Eficiência energética em edificações: uma demanda global	21
2.2	<i>Benchmarking</i>.....	23
2.2.1	Processo de <i>benchmarking</i> em edificações	24
2.2.1.1	<i>Auditoria</i>	25
2.2.1.2	<i>Edificações de referência</i>	27
2.2.1.3	<i>Simulação</i>	30
2.2.1.4	<i>Análise de sensibilidade</i>	33
2.2.1.5	<i>Avaliação do desempenho energético de edificações</i>	35
2.2.2	Modelo de <i>Benchmarking</i> energético nacional para escolas de ensino infantil	36
2.3	Considerações sobre o capítulo	41
3	Método.....	43
3.1	Coleta e tratamento de dados	43
3.1.1	Dados levantados de imagens de satélite.....	45
3.1.2	Análise de projetos arquitetônicos.....	46
3.1.3	Auditorias energéticas	47
3.2	Construção do arquétipo local.....	49
3.3	Simulação energética	51
3.3.1	Configurações do modelo energético	51
3.3.2	Variações adotadas no modelo de simulação paramétrica	52
3.3.2.1	<i>Densidade de iluminação das salas de aula</i>	52

3.3.2.2	<i>Padrão de iluminação nas salas de aula</i>	53
3.3.2.3	<i>Absortância solar das paredes e das coberturas</i>	53
3.3.2.4	<i>Densidade de alunos nas salas de aula</i>	54
3.3.2.5	<i>Carga do sistema de condicionamento de ar nas salas de aula e salas administrativas</i>	54
3.3.2.6	<i>Padrão de uso de condicionamento de ar nas salas de aula</i>	54
3.4	Equação de <i>benchmark</i> energético local	56
3.5	Análise de dados	56
4	Resultados e discussões	58
4.1	Coleta e análise de dados	58
4.1.1	Caracterização da amostra	58
4.1.2	Análise de projetos	63
4.2	Visitação às escolas de ensino infantil de Florianópolis	65
4.2.1	Operação	65
4.2.2	Equipamentos	65
4.2.3	Iluminação	67
4.2.4	Estimativa dos usos finais e da operação das escolas de ensino infantil	68
4.3	Construção do arquétipo local	72
4.4	Equação de <i>Benchmark</i> energético local	74
4.5	Análise de dados	78
5	Considerações finais	83

1 INTRODUÇÃO

Segundo o *U.S. Energy Information Administration* (EIA), a Administração de Informação Energética dos Estados Unidos, o crescimento mundial do consumo energético de energia primária global aumentará 1,3% ao ano até 2050 (EIA, 2020). Esse aumento será mais acentuado nos países em desenvolvimento, dentre eles o Brasil, com destaque para a China. Também é destacado pela mesma pesquisa que nos países em desenvolvimento, o setor com maior uso energético é o industrial. Entretanto os demais setores também apresentam crescimento acentuado, inclusive nas projeções para os próximos anos.

No Brasil, o relatório elaborado pelo *British Petroleum Company* (2019) aponta projeção de crescimento do consumo de energia primária de 2,2% ao ano, 1,0% maior que o indicado para o aumento global, durante o período de 2017 até 2040. Ainda, a demanda energética que mais crescerá no país até 2040 é a das edificações, sendo 91% maior que a atual e representando 29% do consumo total de energia primária, dentro do período. Nos países em desenvolvimento, é ainda mais importante que esse aumento seja controlado, uma vez que, caso contrário, são exigidos altos investimentos também nas redes de distribuição de energia e em novas formas para geração de energia para suprir a considerável demanda (BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014).

De acordo com o Balanço Energético Nacional (EPE, 2020), o setor público no Brasil gasta, atualmente, 92,23% do total da energia em energia elétrica e, do total de energia elétrica utilizada no país, o setor representa 8,5% do consumo. Portanto, além da redução de gastos para o setor, essa economia poderia ser aplicada diretamente em programas educativos, reinvestimento em eficiência ou utilizado para outros fins de interesse da sociedade, que trariam benefícios a longo prazo para o país.

A avaliação do consumo das edificações é muitas vezes dificultada pela escassez de dados de perfil de consumo, principalmente nos países em desenvolvimento de climas tropical e subtropical, com maior demanda por resfriamento, como o Brasil (DIAS PEREIRA *et al.*, 2014). Segundo Feng *et al.* (2019), mais de 90% dos projetos listados no Programa de Aquecimento e Resfriamento Solar da Agência Internacional de Energia (IEA) são localizados em regiões desenvolvidas da União Europeia e dos Estados Unidos. Desses casos, 11 deles são em regiões quentes e úmidas, sendo apenas três com informações técnicas suficientes para caracterização como edificações de alto desempenho, todos localizados em países desenvolvidos.

Iniciativas para eficiência energética em edificações no Brasil podem ser realizadas por mudanças graduais, em instituições de administração pública ou, nas escolas infantis, de ensino público, onde projetos já começam a surgir no país e são alvo de análise desse trabalho.

Mesmo de forma inicial, o desenvolvimento de estratégias para promoção da eficiência energética nas instituições públicas brasileiras acontece em algumas esferas. No Paraná, uma parceria do *Green Building Council* (GBC) com o Governo do Estado do Paraná visa a transformação de 4.000 escolas do estado em Edificações de Energia Quase Zero (NZEBS). As NZEBs são edificações de baixo consumo energético que incluem estratégias de eficiência energética e geração de energia local e renovável (BRASIL, 2021). O projeto terá início com 180 escolas que, quando operantes, levarão o Brasil a se destacar na área de edificações autossuficientes (GBC, 2019).

No Programa de Eficiência Energética (PEE) da ANEEL nº 74/2020, 40 escolas de Florianópolis foram beneficiadas com a troca de iluminação ineficiente por LED e 16 delas ainda terão a instalação de painéis fotovoltaicos para a geração energética. A iniciativa vai atingir 14.800 alunos de 27 bairros da cidade (CELESC, 2019). Frisando que, se tratando de NZEBs, a adoção de estratégias de eficiência energética é exigida antes da instalação das energias renováveis.

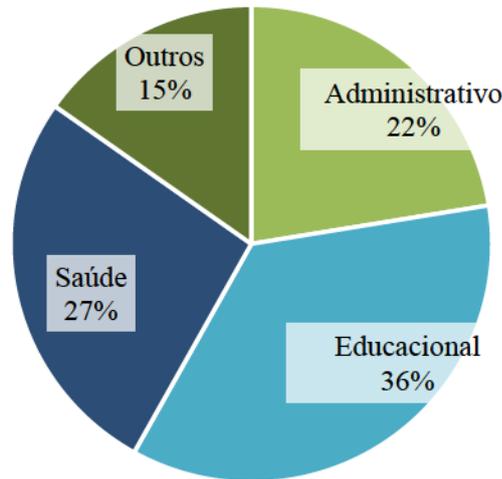
Ainda em Florianópolis, a creche Hassis é um exemplo de estratégias de eficiência energética na região. O edifício obteve o selo LEED Platinum ao aliar estratégias bioclimáticas, como uso da ventilação e iluminação natural, e uso de sistemas mais eficientes à geração de energia fotovoltaica (BARATTO, 2019).

As escolas têm se tornado alvos interessantes de projetos de eficiência energética e investigação científica, tendo em vista todo o caráter pedagógico das instituições (CBCS, 2018; MYLONAS *et al.*, 2019; STANKOVIC, 2016). Em todos os níveis de educação, cada escola compreendendo ocupação de diferentes faixas etárias, merecem atenção especial, uma vez que a educação dos estudantes em termos de sustentabilidade já é um investimento para o futuro, ligado com o processo de formação dos cidadãos (MYLONAS *et al.*, 2019; STANKOVIC, 2016).

Considerando a representatividade nos gastos públicos, em Florianópolis, por exemplo, foram levantados pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), no âmbito do projeto Cidades Eficientes, dados de consumo energético de edifícios públicos, sendo a tipologia educacional a maior consumidora em termos energéticos e a maior consumidora de água. O consumo por edifício não é elevado em relação aos demais setores, entretanto a quantidade de edificações é muito maior do que de outras secretarias. A Figura 1 mostra os

dados de consumo para as edificações em 2019, com funcionamento normal das estruturas municipais e antes da pandemia do COVID-19 (CBCS, 2020).

Figura 1 - Consumo energético de edificações públicas por tipologia para Florianópolis, obtidos pelo Projeto Cidades Eficientes



Fonte: CBCS (2020).

O projeto Cidades Eficientes é uma iniciativa do CBCS com o apoio do Instituto Clima e Sociedade, e tem como um dos objetivos a organização da gestão de consumo dos edifícios públicos municipais e a proposição de políticas públicas de redução do consumo energético, através de medidas permanentes de eficiência (CBCS, 2019).

Uma estratégia interessante para a redução do uso energético, promoção da eficiência energética de edifícios em operação e fornecimento de dados de operação, é o desenvolvimento de *benchmarks* energéticos, definido como a avaliação de edificações na sua operação (CHUNG, 2011; HONG *et al.*, 2014). São examinadas tipologias de edificações a serem estudadas, criando um comparativo entre os edifícios existentes e determinando o nível de eficiência a ser alcançado (CHUNG, 2011; HONG *et al.*, 2014). Em diversos trabalhos, para a obtenção de *benchmarks* em edificações, são anteriormente elaboradas edificações de referência, que representam edificações de mesma tipologia, clima e função (BENEJAM *et al.*, 2010; FILOGAMO *et al.*, 2014).

O CBCS já vem atuando no desenvolvimento de *benchmarks* energéticos para edificações no projeto Desempenho Energético Operacional em Edificações (DEO), a fim de avaliar o desempenho de consumo de edifícios em comparação com o existente no mercado (CBCS, 2014). Já foram desenvolvidos *benchmarks* em agências bancárias (BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014), em escritórios corporativos (BORGSTEIN, 2014) e em edifícios públicos

administrativos (LAMBERTS *et al.*, 2017). Um novo projeto abordou o desenvolvimento de *benchmarks* energéticos nacionais em mais 15 tipologias, incluindo três edificações educacionais (Universidades, Escolas de Ensino Fundamental e Médio, e Escola de Ensino Infantil), onde iniciativas locais de coleta e análise de dados podem colaborar na especificação de *benchmarks* mais detalhados (PROCEL, 2020). O projeto teve início em 2018 e conclusão em 2021 com o convênio firmado com a Eletrobrás no projeto intitulado “Estruturação do setor de edificações por meio de estudos e desenvolvimentos de base de dados com indicadores”, consolidando pela primeira vez informações de *benchmarks* nacionais no Brasil.

O Projeto TABULA (Typology Approach for Building Stock Energy Assessment) também buscou estabelecer *benchmarks* residenciais para 20 países Europeus, através de uma abordagem sistemática para a classificação do estoque (LOGA; STEIN; DIEFENBACH, 2016). A proposta para o setor não residencial ainda não foi totalmente implementada (STEIN *et al.*, 2021).

Iniciativas locais, para estudos específicos de certas regiões, também já foram realizadas e ajudam na compreensão mais detalhada do uso de energia em edificações. O Departamento de Energia dos Estados Unidos (*U.S. Department of Energy - DOE*), por exemplo, desenvolveu 16 edificações de referência, uma para cada tipologia desenvolvida, considerando também 16 regiões distribuídas pelos Estados Unidos e três diferentes períodos de construção (CORGNATI *et al.*, 2013).

Alguns trabalhos semelhantes a esse já foram realizados, ou estão em desenvolvimento, como modelos de *benchmarking* para escolas, principalmente em países europeus (ASCIONE *et al.*, 2017; HONG *et al.*, 2014; LODI *et al.*, 2017). Entretanto, nenhum trabalho busca entender a influência do uso de modelos nacionais ou locais na análise do desempenho das edificações. Sendo assim, cria-se um incentivo para elaboração de novos trabalhos nesse âmbito e a multiplicação de edificações mais eficientes e sustentáveis pelo país.

A partir disso, pode-se estabelecer uma lacuna no campo do conhecimento: o uso de modelos de *benchmarking* nacionais, realizados a partir da coleta de dados no país todo, ou locais, realizados em uma localidade ou cidade específica, podem ter impacto na classificação de desempenho energético de edificações? Tal fator pode também influenciar na tomada de decisões quanto às medidas de eficiência energética a serem implantadas posteriormente nas edificações.

Baseado nessas informações e a importância das edificações educacionais, neste trabalho pretende-se responder à seguinte pergunta de pesquisa: “**É possível representar o estoque de**

edificações públicas de ensino infantil de Florianópolis através de um modelo de *benchmarking* local?

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo de *benchmarking* local para as edificações de ensino infantil públicas de Florianópolis.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir um arquétipo das edificações públicas de educação infantil existentes em Florianópolis;
- Investigar a sensibilidade das variáveis analisadas nas simulações energéticas, quanto à classificação do desempenho das edificações públicas de ensino infantil em Florianópolis;
- Elaborar uma equação de *benchmark* local para as edificações públicas de ensino infantil em Florianópolis;
- Classificar e comparar o desempenho energético de uma amostra das edificações públicas de ensino infantil existentes em Florianópolis segundo os modelos de *benchmarking* local e nacional estabelecidos.

1.2 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

No presente estudo serão abordadas apenas escolas públicas de ensino infantil, localizadas no município de Florianópolis. A investigação será realizada para o clima desta região e serão abordados aspectos ligados diretamente ao consumo de energia e ao desempenho operacional das edificações existentes. Não será tratado o conforto térmico dos ocupantes na edificação. Nas simulações energéticas não será considerada a influência do entorno. Além disso, o método para realizar a equação de *benchmark* foi o de regressão linear que, apesar de trazer resultados satisfatórios, vem sendo substituído por métodos de treinamento de redes neurais e outros mais sofisticados. A geração de energia das edificações, presente em uma das escolas avaliada, não foi descontada do consumo energético das escolas para a classificação de desempenho, devendo, entretanto, ser avaliada em pesquisas futuras.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este texto está organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo é introdutório e apresenta a contextualização do tema, a problemática, as justificativas, os objetivos e as delimitações da pesquisa. No segundo capítulo é abordado o referencial teórico do tema, onde são definidos conceitos sobre a temática estudada e expostos os principais trabalhos e pesquisas desenvolvidas na área de estudo. No terceiro capítulo aborda-se a metodologia da pesquisa, onde os materiais, métodos e procedimentos aplicados para atingir os resultados são discutidos. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos na pesquisa. No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais e conclusões. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas da pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são abordados tópicos relacionados ao referencial teórico dos temas de pesquisa. Nesse âmbito, busca-se esclarecer conceitos e metodologias já existentes, as quais servirão de base para o presente trabalho.

2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES: UMA DEMANDA GLOBAL

O consumo energético configura uma relação de causalidade com o crescimento econômico dos países, de maneira mais forte entre aqueles desenvolvidos e menos acentuada naqueles em desenvolvimento (CHONTANAWAT; HUNT; PIERSE, 2008). O acordo de Paris, adotado na 21ª Conferência das Partes (COP21) da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, ocorrida em 2015, trouxe metas oficiais para o Brasil. O documento (BRASIL, 2021a), chamado de Contribuições Nacionalmente Determinadas, NDC na sigla em inglês, definiu que o país teria como metas:

- Reduzir a emissão de gases de efeito estufa em 37% em relação aos níveis de 2005 até 2025 e ampliar para 43% até 2030;
- Alcançar 10% de ganhos em eficiência energética no setor elétrico até 2030;
- Aumentar a participação da bioenergia na matriz energética em 18% até 2030;
- Reflorestar 12 milhões de hectares de florestas;
- Elevar para 45% a participação dos renováveis na matriz energética.

Dessa forma, o interesse contínuo na busca de alternativas para elevar a eficiência energética no setor de edificações nos leva à busca pela promoção de alternativas de eficiência energética em edificações. As modificações de padrões de comportamento e projeto geralmente iniciam-se na esfera pública para, depois, serem implementadas na esfera privada. Tal comportamento já foi observado em programas nos Estados Unidos, como o Ato de Segurança e Independência Energética de 2007, ou *Energy Independence and Security Act of 2007* (U.S. CONGRESS, 2007), e na Europa com a EPBD, a *European Performance of Building Directive* (EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2010).

A Diretiva Europeia determina que:

“O setor público dos Estados-Membros deverá dar o exemplo no domínio do desempenho energético dos edifícios e, conseqüentemente, os planos nacionais deverão estabelecer objetivos mais ambiciosos para os edifícios ocupados por autoridades públicas.” (EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2010, p. 4)

Entretanto, ainda são registradas baixas taxas de renovação de edifícios, em torno de 1%, com redução do consumo energético do setor em apenas 5%, durante o período de 2005 a 2018. Mais incentivos aos Estados-Membros devem ser criados para o alcance das metas estabelecidas até o ano de 2050 (ZANGHERI *et al.*, 2021).

Já o Ato de Segurança e Independência Energética de 2007 é o último volume de uma série de legislações energéticas e apoia iniciativas para redução do consumo de energia em edificações, a partir de novas exigências, ferramentas e novas tecnologias (DIXON *et al.*, 2010; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2007). Um dos fatores que colaboraram para o sucesso das políticas de eficiência energética nos EUA foram a colaboração entre instituições públicas e privadas, associações de manufatura e associações profissionais (PÉREZ-LOMBARD *et al.*, 2011).

Escolas públicas infantis podem ser edificações estratégicas para a promoção de tais medidas, pela baixa complexidade dos sistemas instalados e maior área de cobertura para a implantação de energia renovável solar. Florianópolis, por exemplo, conta com a Creche Hassis, finalizada em 2015, edificação modelo em eficiência energética e de energia quase zero. O edifício de 1.182m², que possui a certificação LEED *Platinum*, conta com geração de energia fotovoltaica, aquecimento solar de água, reaproveitamento de água da chuva e estratégias para aproveitamento da luz natural. Inclusive o ensino possui programa pedagógico pautado por questões ambientais e de sustentabilidade (BOS; SCHWARTZ; LICHERI, 2018). O projeto foi viabilizado através de investimento do Banco Internacional de Desenvolvimento e do Ministério da Educação.

O município de Florianópolis também foi selecionado para um Programa de Eficiência Energética (PEE) da ANEEL, por meio de chamada pública da CELESC, a Companhia de Energia Elétrica de Santa Catarina. O projeto prevê beneficiar 40 escolas em 2020 e 2021, com a substituição da iluminação por soluções mais eficientes e pela instalação de painéis fotovoltaicos em 16 delas (CELESC, 2019). Em outros municípios, projetos para melhoria da eficiência energética em escolas também têm sido viabilizados: no Rio de Janeiro, a Concessionária Light lançou em 2020 uma Chamada Pública de Projetos com o investimento de R\$ 60 milhões para fontes incentivadas em escolas, creches estaduais, municipais ou filantrópicas. Os recursos são disponibilizados pelo PEE, regulado pela ANEEL (PROCEL INFO, 2020).

O Paraná também possui uma iniciativa para escolas de energia zero. O objetivo do projeto é levar as estratégias para cerca de 4.000 escolas nos 399 municípios do estado, através de uma parceria entre o Paranacidade, o *Green Building Council* e a Fomento Paraná. Na primeira etapa

serão visadas 180 escolas, onde após ser alcançado o consumo energético mínimo com as estratégias, será elaborado um projeto para a geração de energia fotovoltaica, pretendendo alcançar o nível de energia zero (GBC, 2019).

Sobre a necessidade de adaptações das edificações educacionais, o documento do Ministério da Educação (MEC) (2006), que dispõe sobre Padrões de Infra-estrutura para Espaço Físico Destinado à Educação Infantil, destaca a necessidade de reformas nessa tipologia, devido à influência da escola na vida dos indivíduos. São levantados os procedimentos sistemáticos da Avaliação Pré-Projeto (APP) e Avaliação Pós-Ocupação (APO), para investigação de projetos e direcionamento de futuras intervenções corretivas e reformas, destacando que novos projetos se configuram como oportunidades de questionar os projetos já existentes (KOWALTOWSKI; DELIBERADOR, 2014).

Uma ferramenta interessante para a melhoria do desempenho energético em edificações é a construção de *benchmarks* energéticos. A EPBD exigiu, em 2012, a criação de *benchmarks* energéticos para os países membros da União Europeia para a classificação de edificações e melhora dos níveis energéticos (EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2012). Quase 10 anos depois, muitos países ainda não cumpriram todas as metas do acordo, e outros já se preocupam com a automatização da coleta de dados e com metas mais exigentes para atender metas climáticas nos próximos anos (EUROPEAN BUILDING AUTOMATION CONTROLS ASSOCIATION, 2021). Entretanto, o uso de *benchmarks* energéticos ainda figura como essencial para o estudo do desempenho energético de edificações.

2.2 BENCHMARKING

Benchmarking, termo sem tradução direta para o português, é uma análise usual para avaliação de edifícios na fase operacional, verificando uma única performance em contraste com outras edificações de mesma tipologia. Pérez-Lombard *et al.* (2009) explicam que, inicialmente, o *benchmarking* era usado apenas para fixar um ponto de referência no terreno, em análises topográficas. Na década de 70, algumas empresas começaram a desenvolver ferramentas de *benchmark*, para comparações iniciais de desempenho, sendo o termo “*benchmarking* energético” utilizado apenas nos anos 90, quando realizadas comparações do uso energético de edifícios.

O *benchmarking* energético compara a Energia Total Primária Requerida por unidade de área (ou outro indicador) com o consumo médio da amostra levantada. O *benchmark*, ou o desempenho típico, pode ser considerado o desempenho de 50% dessas amostras, sendo uma

edificação considerada eficiente a que consome menos energia que o *benchmark* (VAISI; PILLA; MCCORMACK, 2018). Bannister e Hinge (2006) definem ainda o “*benchmarking* empírico”, onde é comparado o desempenho de edificações existentes com aqueles do mercado da construção.

Para dimensionar a importância do *benchmarking*, a norma ISO 50.001: Sistemas de Gestão de Energia – Requisitos com orientação para uso, com tradução publicada pela ABNT exige o seu uso, traduzido como “linhas de base energéticas” na aplicação de sistemas de gestão energética (ABNT, 2018).

Djuric e Novakovic (2009) relacionam o *benchmarking* com a estratégia de comissionamento de edifícios, ou seja, garantir o correto funcionamento das instalações de um edifício, de acordo com as intenções de projeto em harmonia entre os sistemas. O *benchmarking* entra como medida de desempenho do edifício num nível macroscópico, servindo, muitas vezes, para um maior entendimento das cargas existentes e necessárias para operação.

Segundo Chung (2011) e Hong *et al.* (2014), o *benchmarking* mostra-se como uma técnica interessante para a promoção da eficiência energética. Pode-se classificar ainda dois tipos principais de *benchmarking* dependendo do seu uso, os públicos, com acesso geral, e os internos, disponíveis apenas para a equipe executora (CHUNG, 2011). De acordo com a literatura, esses dois tipos de *benchmark* são desenvolvidos de maneiras diferentes e, neste trabalho, serão abordados os públicos, pela natureza dos dados analisados.

A nível municipal, o *benchmarking* e o entendimento do consumo energético podem trazer importantes economias. Estratégias utilizadas para isso são a obrigatoriedade da abertura de dados públicos e a transparência de resultados, criando um banco de dados público de consumo energético dos edifícios. Essa estratégia é aplicada nos Estados Unidos, em que é obrigatório o levantamento e classificação energética para edifícios acima de uma certa área, dependendo da tipologia estudada (ENERGY STAR, 2012). No caso de escolas infantis, a área mínima para obtenção de uma classificação é de 465m². A iniciativa mostra que a partir do controle de uso energético é possível melhorar o nível de eficiência energética ao longo dos anos.

2.2.1 Processo de *benchmarking* em edificações

Para o *benchmarking* energético de edificações, algumas ferramentas e técnicas auxiliam na precisão e análise do estoque de edificações. A seguir, serão apresentados em maior detalhe os procedimentos de auditoria energética, análise de sensibilidade, simulação energética, edificações de referência e de avaliação do desempenho energético de edificações.

2.2.1.1 Auditoria

As auditorias energéticas são importantes instrumentos para a definição de padrões de uso e equipamentos de certas tipologias, auxiliando na tradução mais próxima da realidade das edificações de estudo e na identificação prática de medidas para a redução energética. Simples auditorias energéticas podem identificar medidas sem custo ou de baixo custo para alcançar as metas energéticas, assim como um plano para futuras modificações. As auditorias energéticas são o primeiro passo para simples medidas de *retrofit* ou para investimentos a longo prazo (BAECHLER; STRECKER; SHAFE, 2011).

Os levantamentos podem exigir, ainda, alto esforço humano e financeiro, além de disponibilidade de tempo, e provavelmente não atingindo todas as edificações da tipologia estudada, sendo utilizadas estratégias de seleção de procedimentos mais adequados e dos edifícios relevantes para análises mais detalhadas (LODI *et al.*, 2017).

Segundo Borgstein e Lamberts (2014) as informações podem ser levantadas em três níveis de detalhe: dados simples, dados detalhados e dados de visitas técnicas. Os dados simples constituem as informações mínimas para realização de um *benchmarking*, como localização, área, consumo anual e tipologia; dados mais detalhados desses edifícios já incluiriam detalhes dos sistemas presentes no edifício. Já as informações retiradas de visitas permitiriam a elaboração de um arquetipo mais refinado para representação das características do setor.

No livro de Thumann, Niehus e Younger (2013) são classificados quatro tipos de auditorias energéticas possíveis, a partir de um estudo realizado nos procedimentos para auditorias em edificações comerciais pelo Manual da ASHRAE para sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado (AVAC) (KELSEY; PEARSON, 2011):

- Tipo 0 – Auditoria para *Benchmarking*: análise preliminar do uso energético e dos custos da edificação e determinação de índices de *benchmarking*, como kWh/m². É sugerido o uso da ferramenta EPA/DOE Energy Star Portfolio Manager¹ para execução;
- Tipo 1 – Auditoria com visitação: também chamada de inspeção *walk-through*, é a avaliação mais básica da edificação a ser estudada. São avaliadas as faturas energéticas e é conduzida uma breve visita à edificação, para a identificação e inspeção dos

¹ Ferramenta online para medição de consumo de água, energia e emissão dos gases do efeito estufa de uma edificação ou de um estoque. As edificações recebem uma pontuação de 1 até 100, onde uma pontuação de 50 representa um desempenho energético mediano e 75 uma edificação de alto desempenho, podendo ser elegível para a classificação ENERGY STAR.

sistemas. Não são realizados cálculos ou análises detalhadas, apenas recomendações simplificadas para o usuário;

- Tipo 2 – Auditoria padrão: consiste em quantificar o uso energético e as perdas, através de análise mais profunda dos equipamentos, dos sistemas e da operação da edificação. Pode incluir medições em campo e recomendações para conservação energética;
- Tipo 3 – Simulação computacional: inclui mais detalhes do uso energético e dos padrões de uso, utilizando-se de uma simulação computacional para isso, que irá incluir variáveis climáticas. O objetivo da simulação é atingir uma base sustentável de comparação com o edifício real. É o tipo de auditoria mais complexa e custosa, porém garante análise precisa do objeto de estudo.

Alguns autores já desenvolveram metodologias para a realização de auditorias energéticas em edificações educacionais, a nível local, para a criação de *benchmarks*. Guan, Nord e Chen (2016) levantaram a carga de demanda e o uso energético dos edifícios do campus universitário de uma universidade norueguesa, para o uso das metodologias no planejamento energético de sistemas urbanos. Desenvolveu-se a metodologia através de fatores de coincidência e análise de clusters para a identificação dos edifícios com potencial de otimização operacional, mostrando ao final que uma avaliação qualitativa das edificações representa a solução mais viável.

No caso de Escobedo *et al.* (2014), foi estimado o uso energético e a emissão de gases de efeito estufa para os edifícios em instalações de um campus universitário no México, selecionando uma amostra para o levantamento por categoria. Concluiu-se que o maior consumo foi devido à iluminação, com 28% do total do uso energético, e que se fossem aplicadas tecnologias de eficiência energética, o consumo e as emissões de CO₂ poderiam ser 7,5% e 11,3% menores, respectivamente.

Attia, Shadmanfar e Ricci (2020) elaboraram um *benchmarking* energético em 30 escolas de alto desempenho energético em várias regiões da Bélgica, analisando o consumo energético em visitas às edificações. A maior parte do consumo era proveniente da ventilação mecânica, dos sistemas de aquecimento e de resfriamento, em todas as escolas analisadas.

Outra forma de levantar dados para *benchmarking* e edifícios de referência é a realização de questionários. Hernandez, Burke e Lewis (2008), por exemplo, distribuíram questionários em 500 escolas da Irlanda, para coleta de características construtivas, atividades e padrões de uso energético, com uma taxa de resposta de 13%. Zhou *et al.* (2013) também realizaram um

questionário, na região de Guangdong, na China, obtendo retorno de 70% das universidades participantes. Foram coletados dados referentes ao consumo das mesmas, seja elétrico, de gás ou de água. Além disso, foram analisados os métodos de medição energética, trabalhos já realizados de *retrofit* e os planos de conservação energética.

Nacionalmente, foi desenvolvido no Brasil pelo CBCS e pelo Ministério do Meio ambiente (MMA) uma plataforma para a comparação dos consumos de energia dos edifícios públicos, no projeto de Desempenho Energético Operacional (DEO) e no Projeto 3E, respectivamente (CBCS, 2014). As análises podem ser feitas em nível de cidade, comparando a Intensidade de Uso Energético (EUI), em kWh/(m².ano). A partir das características fornecidas pelo usuário, a plataforma compara o edifício real com o nível típico e “boa prática”. O edifício típico baseia-se na média das edificações existentes e o “boa prática” na versão energeticamente eficiente do nível típico (VELOSO *et al.*, 2021).

Com os dados necessários coletados em auditorias energéticas e, possivelmente, outros recursos como projetos arquitetônicos e complementares, é possível realizar uma simulação energética para a edificação específica ou para uma representação de todo o estoque (edificação de referência). Com isso, usos finais de energia e variações dos mesmos podem ser estudados mais a fundo como, além da determinação de quais variáveis impactam mais no consumo de energia (ALSHIBANI, 2020).

2.2.1.2 Edificações de referência

As edificações de referência são modelos representativos de uma mesma tipologia, funcionalidade e clima (CORGNATI *et al.*, 2013). A principal vantagem do uso de edificações de referência é a redução do número de análises de uma tipologia construtiva, de características delimitadas (SCHAEFER; GHISI, 2016). Os países membros da União Europeia foram instruídos pela Regulação 244/2012 a criar edificações de referência, para o uso no cálculo do custo ótimo e para alcançar as mínimas exigências relacionadas ao desempenho energético de edificações, em nível nacional ou local (EUROPEAN COMMISSION, 2012).

O uso de edifícios de referência possui diferentes objetivos; alguns trabalhos podem usá-los para a avaliação de estratégias de economia energética em edifícios já existentes (GAGLIA *et al.*, 2007; MATA; SASIC KALAGASIDIS; JOHNSSON, 2014; TOMMERUP; SVENDSEN, 2006) e outros preocupam-se em estabelecer os edifícios típicos para o desenvolvimento do *benchmark* energético e da definição do consumo energético de certas tipologias (BENEJAM

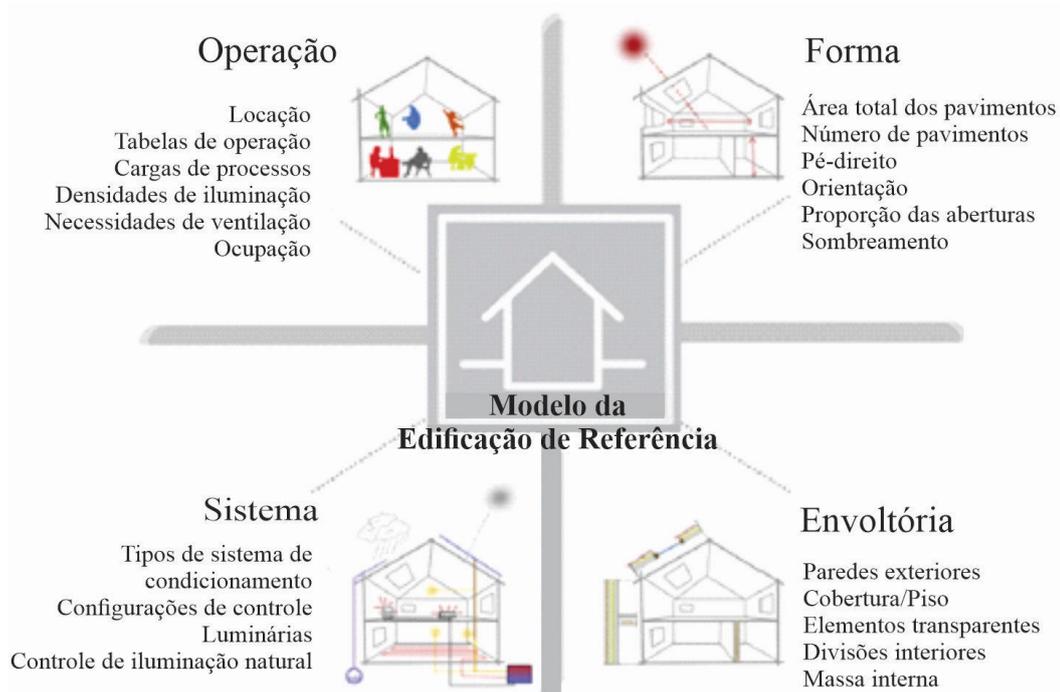
et al., 2010; BORGSTEIN, Edward; LAMBERTS, 2014; FILOGAMO *et al.*, 2014; HERNANDEZ; BURKE; LEWIS, 2008).

Ainda não existe uma metodologia universal pré-estabelecida para a obtenção de edificações de referência (CORGNATI *et al.*, 2013) e no Brasil o desenvolvimento destas, para qualquer tipologia, ainda são primárias e incipientes, necessitando aprimoramento e pesquisas mais aprofundadas (BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014). A criação dos edifícios de referência não é simples e depende do nível de detalhamento na definição do mesmo, sendo a falta de informações normalmente um dos problemas encontrados por pesquisadores (CORGNATI *et al.*, 2013). Os autores também esclarecem que os dados coletados para a criação das edificações de referência podem ser divididos em quatro áreas de investigação:

- Forma: relacionada às características geométricas da edificação;
- Envoltória: relacionada às propriedades termofísicas dos materiais da envoltória da edificação;
- Sistema: relacionado aos sistemas utilizados para aquecimento e resfriamento da edificação, bem como aqueles utilizados para geração energética; e
- Operação: relacionada ao funcionamento e ao uso da edificação, expressado geralmente através de schedules, como para iluminação e equipamentos.

A Figura 2, adaptada de Corgnati *et al.* (2013) e baseada em (TORCELLINI *et al.*, 2008), ilustra as quatro áreas para a coleta de dados.

Figura 2 - Áreas para coleta de dados para a criação de edificações de referência



Fonte: adaptado de Corgnati *et al.* (2013).

Ballarini, Corgnati e Corrado (2014) definem três abordagens metodológicas para o estabelecimento de edifícios de referência:

- *Real Example Building* (ReEx): a escolha da edificação é baseada na experiência, selecionada em um certo tipo climático, sendo o mais representativo em dimensão e da época construtiva. Usado na falta de dados estatísticos.
- *Real Average Building* (ReAv): feito mediante uma análise estatística, os dados são manipulados para dar origem a um edifício real que tenha características geométricas e construtivas semelhantes com a média dos edifícios analisados.
- *Synthetical Average Building* (SyAv): chamado de arquétipo é um edifício virtual, caracterizado por um conjunto de propriedades individuais levantadas estatisticamente de uma categoria de edifícios.

A criação de edificações de referência é um passo inicial do *benchmarking* energético de edificações, definindo um modelo estocástico, ou seja, aquele que incorpora também elementos probabilísticos. Tal modelo pode ser elaborado com a realização de uma regressão ou através da seleção de elementos estatisticamente representativos, dentro da amostra analisada (LARA *et al.*, 2015). A adoção de regressão linear para o estabelecimento de relações entre variáveis apresenta algumas vantagens, como sua aplicação simples e a exigência de um número baixo de suposições. Entretanto, algumas desvantagens devem ser apresentadas, como a sua limitação a relacionamentos lineares entre as variáveis e a necessidade que os dados sejam independentes entre si. Em estudos de modelos de *benchmarking* a regressão linear é aplicada vastamente, como no estudo nacional brasileiro, tratado no item 2.2.2.

Aqueles edifícios semelhantes de uma grande amostra podem ser agrupados em clusters ou grupos. Schaeffer e Ghisi (2016) aplicaram a técnica de análise de clusters para a redução do número de dados, onde uma grande amostra pode ser dividida e caracterizada em grupos menores e homogêneos. Esse tipo de aplicação não é interessante para estudos com uma amostragem pequena ou que as características de análises sejam muito semelhantes.

No caso de escolas, o uso de edificações de referência já foi utilizado para análise do gasto energético e conseqüente criação de estratégias para sua redução. Lara *et al.* (2015) aplicaram uma análise de correlação para identificação das características que mais impactavam no consumo energético do estoque em escolas da cidade de Treviso. As amostras foram divididas em *clusters*, de acordo com a arquitetura representativa de cada grupo. Os modelos foram validados por múltiplas regressões lineares, sendo úteis para a determinação do consumo no

aquecimento de água e do ar, para encontrar o custo ótimo das medidas de *retrofit* de cada grupo. As análises energéticas após as modificações realizadas foram realizadas apenas nos edifícios de referência, obtendo resultados satisfatórios para todo o grupo.

Gaitani *et al.* (2010) analisaram o consumo para o aquecimento e a iluminação de 1.100 edificações educacionais da Grécia, agrupando-as em cinco diferentes grupos de acordo com a despesa energética. Assim, foi possível a identificação das melhores estratégias para redução do uso de energia e para determinação do desempenho pretendido para cada grupo.

Entretanto, a maioria dos estudos para a criação de *benchmarks* energéticos não comparam o desempenho dos modelos nacionais e locais e suas possíveis implicações. Ali *et al.* (2019), por exemplo, desenvolveram um arquétipo multi-escala (nacional, municipal, local e distrital) para edificações residenciais na Irlanda e identificaram diferenças em termos de modelagem energética quando os dados nacionais eram usados para uma descrição local.

As normas existentes são válidas para ambos os tipos de modelos: A ISO 52003-1:2017 (ISO, 2017), que determina indicadores, requisitos e escalas para desempenho energético de edificações, estabelece padrões para *benchmarks* analisados a nível nacional e local. Os Estados membro da União Europeia fazem de maneira semelhante para o cumprimento das exigências da EPBD (EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2010). A influência do modelo utilizado na avaliação do desempenho energético da edificação precisa ser melhor compreendida.

Corgnati *et al.* (2013) relatou que ainda existe discordância sobre a precisão das edificações de referência entre os especialistas. Durante a reunião para o regulamento complementar da Diretiva 2010/31/EC, alguns especialistas assumem que os modelos devem ser o mais detalhados possível e outro que essa ideia é irrealista e custosa, e dependem de fontes de informação nem sempre disponíveis.

As edificações de referência são importantes para o estabelecimento de um padrão para as tipologias, servindo de base para os mais variados estudos. Uma modalidade muito explorada, seja para geração de dados para modelos de *benchmarking*, seja para estudos individualizados de sistemas ou características, são as simulações energéticas computacionais.

2.2.1.3 Simulação

As simulações computacionais para a avaliação do desempenho de edificações, também chamadas de simulações dinâmicas ou modelagens térmicas dinâmicas, buscam aproximações da realidade em modelos de computador, para a reprodução do desempenho de edificações em determinadas condições. Essas simulações podem ser usadas para analisar o consumo da

iluminação e dos sistemas de ar condicionado, assim como a ventilação e o conforto dos usuários (BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS; HENSEN, 2018).

Mesmo as simulações sendo mais utilizadas para novas edificações, o uso para monitoramento de operação e a avaliação do desempenho daquelas já existentes também tem sido bastante empregado. Borgstein, Lamberts e Hensen (2016) definiram os procedimentos usuais para a avaliação de edificações através de simulação:

- i. Construção de um modelo da geometria, propriedades dos materiais, o ambiente externo e demais especificações do edifício;
- ii. Acréscimo de dados referentes à operação dos sistemas e ao seu desempenho;
- iii. Acréscimo de dados referentes à operação pelos usuários e seus padrões de uso;
- iv. Realização da simulação dinâmica por períodos anuais, utilizando-se de dados climáticos da localização correspondente;
- v. Avaliação dos resultados da simulação e da performance energética;
- vi. Comparação dos resultados com dados de desempenho, para criação de benchmarks ou para marcos regulatórios.

Problemas geralmente associados a simulações são a falta de consenso nos padrões de calibração dos modelos, alto esforço financeiro e de mão-de-obra para a criação de modelos precisos, dificuldade de integração entre *softwares* de simulação e outros de modelagem, simplificação dos modelos e o conhecimento técnico exigido para modelagem (COAKLEY; RAFTERY; KEANE, 2014).

Para garantir a certeza do modelo, é necessário realizar sua validação e, caso necessário, sua calibração. Os resultados da simulação energética, quando realizada a avaliação de edificações já existentes, podem ser comparados com dados de consumo disponíveis da mesma, chamada de validação empírica (BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS; HENSEN, 2018). Um modelo pode ser considerado calibrado quando atinge os critérios estatísticos em avaliações horárias ou mensais, estando em intervalos permitidos do Desvio das Médias ou *Mean Bias Error* (MBE), e do Coeficiente de Variação da Raiz do Erro Quadrático Médio, ou *Coefficient of variation of the Root mean square error* (CV(RMSE)) (REDDY; MAOR; PANJAPORNPON, 2007).

Um processo utilizado para a calibração é o descrito pelo *International Performance Measurement & Verification Protocol* (IPMVP). O método “D” descrito no documento, de simulação calibrada, propõe a criação de um modelo base para a comparação com as medições

de edificações existentes, assumindo um intervalo de erro médio aceitável (IPMVP, 2003; ASHRAE, 2014). O modelo é redefinido até uma calibração aceitável ser alcançada.

Na avaliação da ventilação natural em salas de aula, Rackes *et al.* (2015) fizeram considerações para realização de uma simulação de uma edificação com projeto existente no *EnergyPlus*. O modelo adotado foi o multizonal, onde cada ambiente é representado por um nó em que o fluxo de ar atua através de diferença de pressão. Além disso, foram tomados cuidados em relação ao contato da edificação com o solo e aos materiais adotados, condizentes com os padrões construtivos comumente adotados no Brasil. A consideração da ventilação ganha importância no Brasil, uma vez que é a principal estratégia bioclimática indicada para o país, conforme a NBR 15220-3 (ABNT, 2005).

O *software* EnergyPlus também é utilizado para construção de metamodelos nas Instruções Normativas de Eficiência Energética para Edificações no Brasil: a INI-C e a INI-R, que serão abordadas em mais detalhe no item 2.2.1.5. O objeto *IdealLoadAirSystem* é utilizado para simulação do condicionamento das zonas, tendo como resultado a carga térmica utilizada nos horários de funcionamento. Para simulações da ventilação natural, o objeto *AirFlowNetwork* é empregado. O uso do objeto *Unitary Air Conditioning Systems*, por outro lado, simula aparelhos de ar condicionado individuais, aparelhos mais populares no Brasil (SILVA, HERNANDEZ, SAUER; 2021) Essas metodologias já foram testadas e são comumente utilizadas na comunidade científica para a modelagem de sistemas de ar condicionado, trazendo resultados satisfatórios.

A avaliação do modo misto de condicionamento, com uso de ar condicionado e ventilação natural na mesma edificação, pode ser feita no *software* EnergyPlus, através do objeto *Energy Management System* (EMS). Veiga *et al.* (2019) estudou o comportamento dessa ferramenta do *software* com materiais translúcidos, como janelas. O objeto conseguiu representar satisfatoriamente

A nível nacional, o estudo de Attia, Shadmanfar e Ricci (2020) para a criação de dois modelos de referência em escolas de alto desempenho na Bélgica, também teve calibração dos dados. Para isso, foram comparados aos resultados da simulação os valores das faturas energéticas, como também a conferência do Erro Médio de Tendência e Coeficiente de Variação da Raiz do Erro Quadrático Médio.

De maneira semelhante, Hong *et al.* (2014) incluíram dados para a melhora do *benchmark* entre escolas de educação primária e secundária na Inglaterra, sendo as informações primeiramente filtradas por critérios como área útil e classificação operacional, este último baseado no Certificado Energético do Reino Unido (DECs). A análise dos dados coletados foi

realizada através de redes neurais artificiais e chegou-se à conclusão de que algumas características das escolas tinham maior influência no uso energético, como o número de alunos e densidade de ocupação, o tipo de escola, a área de superfície e a proporção de vidros na fachada ocidental. Geralmente, para compreender quais variáveis influenciam de maneira mais e menos acentuada no consumo energético em edificações, são realizadas análises de sensibilidade, tratadas no próximo tópico.

2.2.1.4 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade pode configurar um importante papel na implementação de estratégias para a redução do consumo energético em edificações. A análise de sensibilidade é o estudo de como a incerteza nos dados de saída de um modelo pode ser atribuída a diferentes fontes de incerteza dos dados de entrada (SALTELLI *et al.*, 2004). De maneira simplificada, a análise de sensibilidade pode, no campo da eficiência energética em edificações, auxiliar na determinação de quais características influenciam mais no seu consumo energético, através da modificação dos dados de um modelo e avaliação dos resultados (CALLEJA RODRÍGUEZ *et al.*, 2013).

A análise de sensibilidade pode configurar-se nos métodos local, no qual as características de análise são modificadas de maneira individual, e no global, onde todos os parâmetros são analisados de maneira simultânea (SALTELLI *et al.*, 2008).

Veloso (2017) realizou testes de sensibilidade para identificar quais fatores possuíam mais influência no consumo energético de edificações de escritório. A autora utilizou o teste de variância (ou teste ANOVA) para a comparação das médias entre duas amostras diferentes. A análise de variância parte do princípio de que se X não influencia Y, o valor esperado de Y poderia ser estimado pela média aritmética simples das observações. Entretanto, caso essa influência exista, pode-se ter melhor aproximação com a consideração da comparação dos resíduos, nas duas situações. Considerando uma amostra normal, aleatória e a independência entre os grupos de variáveis, a variância de uma amostra, que é a média dos quadrados dos desvios em relação à média do grupo, pode ser medida entre as amostras (VEA) e dentro das amostras (VDA).

A frequência esperada é obtida dividindo VEA por VDA. O valor do $F_{\text{crítico}}^2$ depende dos graus de liberdade do denominador e do numerador da amostra e do seu nível de significância. A hipótese nula, nesse caso, admite que as variações acontecem devido a variações aleatórias da amostra, sendo as médias populacionais consideradas iguais. Caso $F \leq F_{\text{crítico}}$, é admitida a hipótese nula.

Alshibani (2020) investigou a influência de diferentes fatores em escolas no clima quente úmido da Arábia Saudita. O autor encontrou forte correlação entre o consumo e o número de salas de aula, a área total condicionada e a área de cobertura e uma correlação baixa entre o consumo e a idade das edificações, devido provavelmente ao sistema eficiente de manutenção nas escolas. No contexto brasileiro, o sistema de manutenção nas escolas é geralmente insatisfatório gerando ônus para os alunos e para a sociedade (LACERDA; CONCEIÇÃO; YONAMINE, 2016).

A análise de sensibilidade para características das edificações em escolas também já foi explorada no âmbito econômico por D'Agostino *et al.* (2018), numa pesquisa conduzida para a análise de estratégias passivas, envolvendo diferentes tipos de isolamento e de janelas, em uma escola na Itália central. Os autores concluíram que a análise conjunta do custo ótimo com o tempo de *payback* pode trazer conclusões mais definitivas sobre as soluções.

Compreendendo quais fatores tem mais influência no consumo energético de uma edificação, um caminho que poderia ser seguido é a criação de uma equação de *benchmarking* energético (SENEL SOLMAZ; HALICIOGLU; GUNHAN, 2018). Os métodos matemáticos utilizados na construção do *benchmarking* para edificações públicas, citados por Chung (2011), são a Normalização Simples, o Método dos Mínimos Quadrados e a Fronteira Estocástica, respectivamente.

Pode-se, também, explorar três tipos diversos para classificação dos métodos de *benchmarking* energético: modelos caixa-branca, caixa-preta ou caixa-cinza, como a criada para as modelagens matemáticas. Modelos caixa-branca abordam questões físicas do objeto na modelagem da edificação, necessitando de informações projetuais. Já modelos de caixa-preta necessitam de um modelo estatístico pré-selecionado, já que utilizam técnicas de ajuste de dados e não conhecimentos físicos. Por fim, os modelos caixa-cinza, que combinam técnicas físicas da caixa-branca e de ajuste de dados da caixa-preta para formação de um modelo energético, chamados por essa razão de modelos híbridos (LI; HAN; XU, 2014; VERSAGE, 2015).

² O valor de frequência crítica é tabelado e define o limite para as médias da amostra serem consideradas ou iguais.

O processo de *benchmarking* energético pode auxiliar na avaliação do desempenho energético de edificações e para a melhoria de seus sistemas (BALLARINI; CORGNATI; CORRADO, 2014). Com o entendimento do consumo energético típico do estoque de edificações, é possível entender também onde aquela que está sendo analisada se situa em relação ao restante da amostra.

2.2.1.5 Avaliação do desempenho energético de edificações

Borgstein, Lamberts e Hensen (2018) buscam entender em sua pesquisa o que seria um bom desempenho energético em edifícios existentes. Para a avaliação do desempenho de edifícios, geralmente deve-se iniciar com um exercício de *benchmarking*, assunto já abordado, onde são comparadas as edificações analisadas com uma base de referência (BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS; HENSEN, 2018; BORGSTEIN, E.; LAMBERTS, 2014).

A IEA (2016) cita ainda os seis fatores que influenciam no consumo energético em edificações: clima, envoltória da edificação, sistemas da edificação, operação e manutenção, comportamento do usuário e condições do ambiente interno. Antes da pesquisa, deve ser definido especificamente qual desses fatores será avaliado, já que o funcionamento em conjunto dessas variáveis pode distorcer dados e não trazer conclusões relevantes sobre a eficiência da edificação. Nesse sentido, Deshko e Shevchenko (2013) demonstram as possibilidades e os problemas do uso da certificação para classificação de 114 campi universitários existentes na Ucrânia. O estudo demonstra que a comparação entre as edificações de mesma tipologia é necessária para considerar diferentes fontes energéticas e o conforto dos usuários. Na Ucrânia, cerca de 58% das universidades analisadas demandavam medidas de eficiência energética. O desenvolvimento de sistema de classificação para edificações educacionais, individualmente, poderia auxiliar na redução do consumo geral dessas edificações (CEN, 2008).

Alguns métodos para classificação de edificações utilizam cálculos simplificados, geralmente em fases iniciais de projeto, com vantagens claras como facilidade de uso, rapidez de cálculo e relação mais clara com os parâmetros físicos (BORGSTEIN; LAMBERTS; HENSEN, 2018).

A classificação energética de edifícios é uma ferramenta que têm ganhado relevância no mundo, sendo precedida da criação de uma escala para a eficiência do consumo energético. Segundo o padrão europeu (CEN, 2008), existem duas abordagens: cálculo ou medição. O método de cálculo trata da contabilização do consumo energético da edificação, por meio de projetos e desenhos, de uma edificação já existente ou em fase de projeto. Já o método de

medição é baseado em dados operacionais da própria edificação, com a soma de toda energia por esta utilizada.

No Brasil, iniciativas para avaliação da eficiência de edificações ainda são tímidas, quando comparadas a nível mundial. Em 2009, foi publicado o Regulamento Técnico para Eficiência Energética de Edificações Comerciais, Serviços e Públicas (RTQ-C, 2009), seguido em 2017 por uma atualização, a Instrução Normativa Inmetro para Classe de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviço e Públicas (INI-C) (INMETRO, 2017) e em 2021 pela mais recente (INMETRO, 2021). As revisões surgem devido a limitações dos métodos anteriores, agora com dados provenientes de um metamodelo e com o treinamento otimizado de redes neurais (LAMBERTS; CLETO, 2019).

O método consiste na avaliação da envoltória da edificação, do seu sistema de condicionamento, de iluminação e de aquecimento de água, tudo com base na energia primária, dando origem a uma classificação global de eficiência para a edificação, e uma classificação específica para cada sistema avaliado. Na última versão (LABEEE, 2020), foi incluso um anexo tratando de geração de energia local renovável, onde foram conceituadas as edificações de energia quase zero (NZEBS) e as edificações de energia positiva (EPPs).

Além disso, modelos de *benchmarking* também foram produzidos para 15 diferentes tipologias construtivas nacionalmente, no projeto DEO do CBCS (VELOSO *et al.*, 2021). As principais características do modelo de escolas infantis serão descritas no tópico a seguir.

2.2.2 Modelo de *Benchmarking* energético nacional para escolas de ensino infantil

A expansão do projeto Desempenho Energético Operacional (DEO), que previamente executou modelos de *benchmarking* energéticos para três tipologias, incluiu mais 15 tipologias nas análises, como escolas de ensino infantil e básicas. O projeto utilizou informações do Projeto de Assistência Técnica dos Setores de Energia e Mineral (META), que busca fortalecer a administração de recursos elétricos e minerais para crescimento econômico sustentável e auxilia na construção de *benchmarks* energéticos nacionais (EPE, 2017).

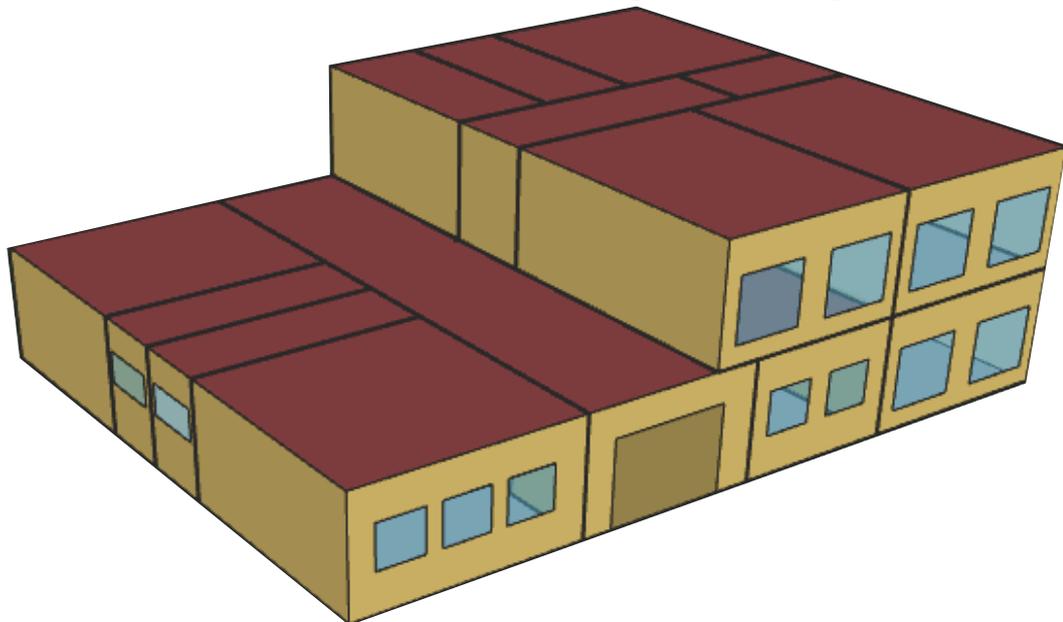
Para as escolas de ensino infantil, foi utilizada uma amostra com 116 edificações de 16 das 27 unidades federativas brasileiras. As edificações continham informações de idade de construção, quantidade de funcionários, quantidade de salas de aula e de refrigeradores. Ainda, foram conduzidas auditorias energéticas em seis dessas edificações (VELOSO *et al.*, 2021).

A amostra analisada apresentou um consumo energético por unidade de área médio de 50,14 kWh/m².ano, variando de 17,86 a 50,29 kWh/m².ano entre o primeiro e o terceiro quartil. Com

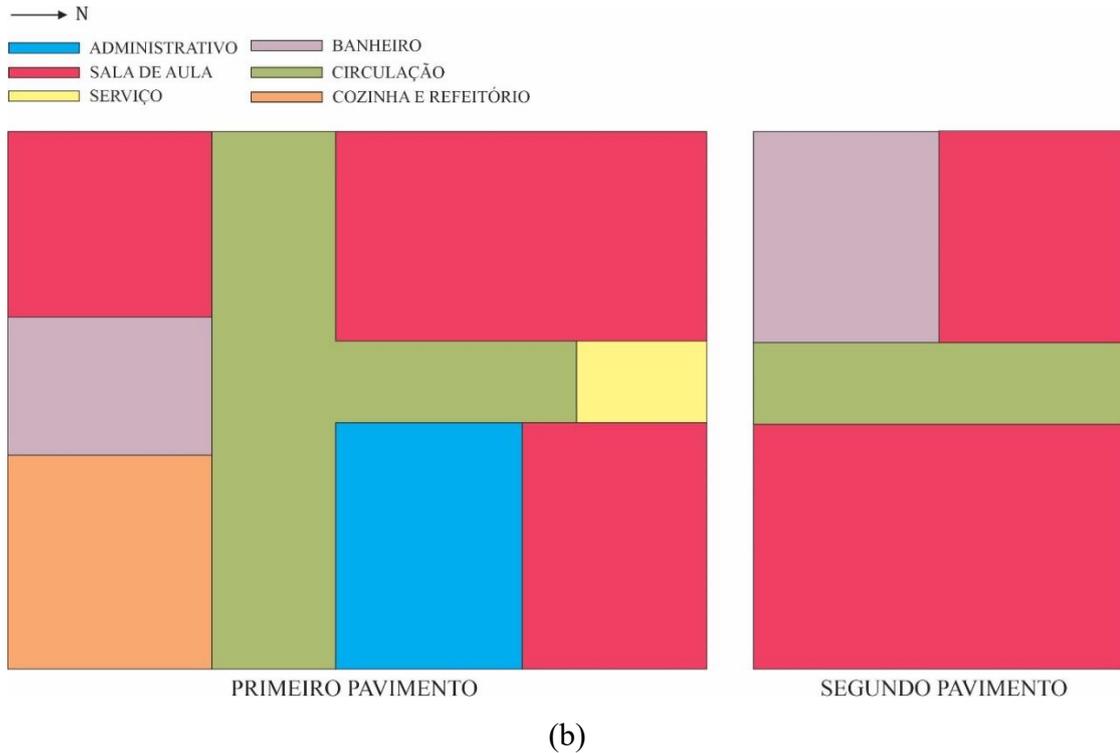
relação a área construída, o valor médio encontrado para a amostra foi de 503,14 m², sendo que 77% das edificações possuíam área construída até 600 m². Em média, encontrou-se até cinco salas de aula por edificação. Além disso, 79% das edificações analisadas apresentavam apenas um pavimento. A densidade de ocupação média, considerando o número de alunos, de funcionários e de área construída média, é de 1,6 m²/pessoa.

A partir dessas informações e do uso de pesquisas virtuais com o *Google Earth* e *Google Street View*, o modelo geométrico para representação das edificações de ensino infantil brasileiras foi construído. A Figura 3 representa (a) a volumetria e (b) a planta baixa esquemática da edificação modelada.

Figura 3 – Representação geométrica do modelo de *benchmarking* energético das escolas infantis brasileiras, (a) volumetria e (b) planta baixa esquemática



(a)



Fonte: elaboração própria (2021).

A área total do modelo é de 464,35m², com 50,54% deste valor atribuído às salas de aula e 6,27% às salas administrativas. Com o uso do modelo geométrico representativo, ou arquétipo, foram conduzidas simulações energéticas representando dados operacionais e construtivos levantados na etapa de coleta de dados. As simulações para escolas condicionadas e apenas com o uso de ventiladores foram realizadas separadamente. Na modelagem do sistema de ar condicionado, foi utilizado o objeto *HVACTemplate:Zone:PTHP*. Os *setpoints* de temperatura adotados para aquecimento e resfriamento de ambientes ocupados adotados foram de 21°C e 24°C, respectivamente.

Para o cálculo dos critérios de contato com o solo, a classe de objetos *Site:GroundTemperature* foi utilizada, através do método de diferenças finitas para a transferência de calor entre o solo e a superfície do piso.

Diferentes cenários para a iluminação, o turno, a densidade de pessoas, as características da envoltória, a orientação solar, o uso de venezianas e o cenário de renovação de ar foram executados, para oito cidades brasileiras de três zonas bioclimáticas: ZB1, ZB3 e ZB8. O arquivo climático utilizado foi do tipo INMET (2001-2010). A Tabela 1 resume as características simuladas.

Tabela 1 – Características variadas durante as simulações energéticas para o modelo de *benchmarking* nacional

Parâmetro	Número de variações	Valores e características utilizadas
Iluminação	2	16,32 W/m ²
		9,90 W/m ²
Turno	2	Aulas nos períodos manhã e tarde
		Aulas no período da manhã
Densidade de pessoas	3	1m ² /aluno
		2m ² /aluno
		4m ² /aluno
Absortância solar	2	$\alpha = 0,7$
		$\alpha = 0,3$
Envoltória	2	$U_{envoltória}=3,85 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}; U_{cobertura}=2,09 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
		$U_{envoltória}=2,55 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}; U_{cobertura}=1,01 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
Orientação solar	4	Fachada principal voltada para o Norte
		Fachada principal voltada para o Sul
		Fachada principal voltada para o Leste
		Fachada principal voltada para o Oeste
Veneziana	2	Janelas simples sem barreiras opacas
		Janelas com venezianas de alumínio
AVAC	2	Sistema split nas salas de aula e administrativas (<i>Coefficient of Performance</i> – COP =3,43W/W)
		Apenas ventiladores nas salas de aula e administrativas
Renovação de ar	2	Com renovação de ar
		Sem renovação de ar

Fonte: adaptado de Veloso *et al.* (2021)

Mais informações serão publicadas no relatório público que será divulgado em breve. Algumas observações sobre os valores considerados podem ser realizadas, a partir do conhecimento adquirido no estudo do estoque de edificações das escolas públicas de ensino infantil de Florianópolis:

- A densidade de iluminação, apesar de ter sido embasada na Instrução Normativa Inmetro para Classificação de Eficiência Energética de edificações Públicas, Comerciais e de Serviço (INI-C), não representa a realidade das escolas públicas de ensino infantil de Florianópolis, com valores acima do normal;

- Poucas escolas na rede pública apresentam sistemas de ar condicionado como o descrito;
- O sistema de renovação de ar, apesar de importante para a saúde dos ocupantes, ainda não é instalado em muitas escolas na rede pública;
- Escolas públicas dificilmente possuem apenas um período de funcionamento;

A partir dos resultados de consumo energético obtidos por meio das simulações energéticas com o arquétipo nacional e após análises de sensibilidade, duas equações de *benchmark* foram elaboradas, aplicáveis ao clima de Florianópolis (VELOSO *et al.*, 2021). As Equações 1 e 2 descrevem, respectivamente, o modelo com condicionamento de ar e outra para aquelas apenas com ventiladores.

$$\begin{aligned}
 EUI \text{ (kWh/m}^2\text{/ano)} &= \left((-9,36 + 3,695 \times \log GHR - 4,583 \times \log GDA + 0,8920 \times ILUM \right. \\
 &\quad \left. - 3,2194 \times PESS + 16,7 \times TURN) \times (A_{SalaAula} + A_{Administração}) \right. \\
 &\quad \left. + (-0,533 + 1,01988 \times ILUM + 7,39638 \times TURN) \times A_{demais} \right) / A_{total}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Onde:

EUI é a Intensidade de Uso Energético (kWh/m².ano);

GHR são os Graus-Hora de Resfriamento da cidade onde se localiza a edificação;

GDA são os Graus-Dia de Aquecimento da cidade onde se localiza a edificação;

ILUM é a densidade de potência de iluminação instalada (W/m²);

PESS é a densidade de pessoas em sala de aula (m²/crianças);

TURN são os turnos oferecidos na instituição (1-manhã ou 2- manhã/tarde);

A_{SalaAula} é a área de sala de aula;

A_{Administrativo} é a área das salas administrativas;

A_{Demais} são os ambientes não condicionados;

A_{total} é a área interna total.

$$EUI \text{ (kWh/m}^2\text{/ano)} = -4,7207 + 1,21214 \times ILUM + 11,8923 \times TURN - 1,1608 \times PESS \tag{2}$$

Onde:

EUI é a Intensidade de Uso Energético (kWh/m².ano);

ILUM é a densidade de potência de iluminação instalada (W/m²);

PESS é a densidade de pessoas em sala de aula (m²/crianças);

TURN são os turnos oferecidos na instituição (1-manhã ou 2- manhã/tarde).

As análises realizadas demonstram quais fatores tiveram maior impacto no consumo energético das edificações estudadas do estoque nacional de escolas infantis. A partir da expansão da amostra, o modelo poderá ser aprimorado e refinado, representando cada vez mais a realidade. Entretanto, por se tratar de uma investigação mais abrangente, características mais particulares de determinadas regiões podem acabar não sendo abordadas.

2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

Os *benchmarks* energéticos são uma estratégia já consolidada na Europa e nos Estados Unidos, para entendimento do desempenho energético das edificações. Entretanto, em países em desenvolvimento, como o Brasil, os estudos ainda são iniciais e precisam de mais investigações. Uma questão que surge na elaboração de *benchmarks* energéticos é a influência da amostra utilizada, que pode ser nacional, dentro de todo o território de um país, ou local, que considera apenas uma localidade ou cidade específica. A partir disso, alguns questionamentos podem ser levantados: a amostra utilizada pode impactar de maneira significativa nos resultados de desempenho energético das edificações? Quando *benchmarks* locais são indicados, considerando o maior custo e trabalho demandado para seu desenvolvimento?

Para construção de um *benchmark* energético, diferentes ferramentas podem ser empregadas, de acordo com o nível de detalhe pretendido de cada análise. Auditorias energéticas fornecem informações preciosas que não podem ser encontradas em projetos, principalmente relacionadas à operação da edificação e aos seus equipamentos. Informações geométricas, de operação, dos sistemas existentes e da envoltória predominantes na amostra analisada podem dar origem a uma edificação de referência virtual, também chamada de arquétipo.

Esse arquétipo pode ser utilizado nas análises seguintes, fornecendo um maior volume de dados a partir de variações de características mais impactantes no consumo energético por meio de simulações energéticas. Os resultados das simulações energéticas podem ser utilizados, então, para a criação de uma equação de *benchmark* energético, que irá auxiliar na classificação de desempenho energético de edificações existentes. As equações de *benchmark* podem ser realizadas de diversos métodos, como regressões lineares múltiplas, ou modelos mais sofisticados de treinamento de redes neurais. Apesar de apresentarem limitações, as regressões lineares múltiplas podem representar adequadamente modelos com variáveis independentes entre si. Esse método será utilizado no presente trabalho e também no modelo de *benchmarking* nacional.

As etapas que foram descritas podem ser reproduzidas em uma amostra nacional ou local, provavelmente com obtenção de resultados diferentes. Procura-se investigar se essas diferenças são ou não significativas para a classificação de desempenho energético das edificações. A classificação do nível de eficiência energética das edificações pode auxiliar nesse processo.

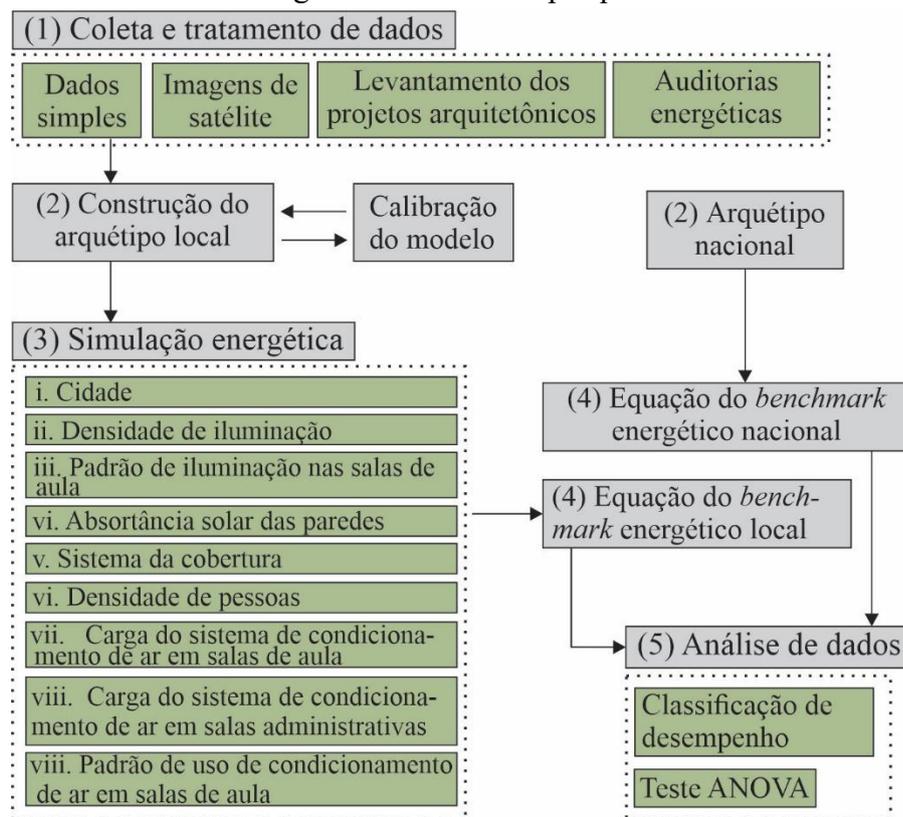
As escolas públicas de ensino infantil de Florianópolis foram escolhidas como objeto de estudo para a realização dessa pesquisa, devido a sua crescente inclusão no escopo de projetos relacionados à eficiência energética, sua representatividade no consumo energético dos municípios e sua relevância para a sociedade. Os benefícios dessas práticas são não só para os governos, com redução do custo em energia, mas também para o aprendizado das crianças de forma lúdica sobre sustentabilidade, em um ambiente mais agradável. Uma abordagem metodológica local para as escolas de ensino infantil, contemplando suas especificidades ainda é necessária e será tratada nessa pesquisa.

3 MÉTODO

Este trabalho, busca criar um modelo de *benchmarking* local das edificações de ensino infantil de Florianópolis. Adicionalmente, foi feita a comparação com o modelo nacional, feito pelo CBCS (VELOSO *et al.*, 2021). O modelo de *benchmarking* local foi desenvolvido neste estudo, pelas etapas: (1) coleta e tratamento de dados; (2) construção do arquétipo local; (3) simulação energética; (4) equação do *benchmark* energético local e; (5) análise de dados.

A última etapa do trabalho consistiu na comparação dos modelos local e nacional, com o uso de dados de edificações de ensino infantil existentes em Florianópolis, de duas formas. Primeiramente, as edificações foram classificadas de acordo com os dois modelos, em ineficientes, típicas ou eficientes, segundo a escala descrita. Em seguida, um teste ANOVA foi realizado entre os resultados dos valores de consumo energético típico para os dois modelos, para entendimento se existem características significativamente diferentes. A Figura 4 apresenta o fluxograma do método.

Figura 4 - Método da pesquisa



Fonte: elaboração própria (2021).

3.1 COLETA E TRATAMENTO DE DADOS

A Prefeitura Municipal de Florianópolis dispõe de dados sobre as instituições públicas de educação operantes na cidade, como projetos arquitetônicos, número de alunos e dados de

consumo energético. A partir da disponibilidade desses dados e do interesse dos órgãos públicos em tornar essa tipologia de edificações mais eficientes e menos custosas à sociedade, foi realizado um levantamento das creches ligadas à Prefeitura de Florianópolis, chamadas de Núcleos de Educação Infantil Municipal (NEIM), que se encaixariam na tipologia abordada neste trabalho.

Para realização da pesquisa, foram cedidos pelo Projeto Cidades Eficientes do CBCS dados simples de 63 escolas infantis municipais, sendo a localização, o consumo energético, a área útil total e o número de alunos. Os dados de consumo energético são referentes aos anos de 2018 e 2019. Os dados de 2020 não foram considerados, uma vez que o consumo energético foi distorcido devido à emergência do COVID-19. Em seguida, foi realizada uma limpeza de dados, com a retirada dos *outliers* da amostra, ou seja, os dados que diferem de maneira significativa dos demais. Sendo assim, os limites inferior e superior são apresentados nas Equações 3 e 4, descrita por Barbetta (P. A. BARBETTA, 2019).

$$\text{Limite inferior} = 1^{\circ} \text{ Quartil} - 1,5 \times (3^{\circ} \text{ Quartil} - 1^{\circ} \text{ Quartil}) \quad (3)$$

$$\text{Limite superior} = 3^{\circ} \text{ Quartil} + 1,5 \times (3^{\circ} \text{ Quartil} - 1^{\circ} \text{ Quartil}) \quad (4)$$

Como o resultado do limite inferior foi menor que zero, apenas o limite superior de 57,93 kWh/m²/ano foi válido para a retirada de *outliers*, mantendo 57 escolas na amostra final. A Figura 5 ilustra a localização das escolas infantis da amostra em Florianópolis, onde 12 delas serão analisadas em mais detalhe, com projetos e/ou visitação, representadas pelo triângulo. Essas 12 escolas foram nomeadas de B01 até B12.

Figura 5 - Mapa das escolas infantis de Florianópolis



Fonte: elaboração própria (2021).

3.1.1 Dados levantados de imagens de satélite

Para melhor compreensão da amostra, também foram levantados dados a partir de imagens de satélite, utilizando ferramentas como o *Google Earth* e o *Google Street View*. Para as 57 escolas que compuseram a amostra, foram estudadas a volumetria das escolas, incluindo número de andares e formato, e as cores de coberturas e paredes, que se traduzem em valores de absorção solar. Os critérios para a classificação dos formatos da edificação seguiram o descrito em Geraldi *et al.* (2021b). No trabalho, os autores identificaram a existência de uma influência do formato da edificação no resultado do *benchmarking* energético, dividindo o

estoque analisado em sete diferentes formatos. As absorptâncias solares seguiram os valores relatados nos trabalhos de Dornelles (2008) para as paredes e Dornelles (2021) para as coberturas, a partir das cores das superfícies.

Dados relativos ao condicionamento das escolas infantis não puderam ser retirados nessa etapa da coleta de dados, uma vez que as escolas possuem muros ao redor do seu perímetro e são edificações térreas ou com poucos pavimentos.

3.1.2 Análise de projetos arquitetônicos

A próxima etapa da coleta de dados consistiu na análise dos projetos arquitetônicos de nove escolas públicas de ensino infantil do município, pertencentes à amostra final de análise. As informações coletadas foram utilizadas para concepção do arquétipo local, representando de maneira adequada a amostra analisada. Foram observadas características da organização dos ambientes das escolas, características da envoltória e dos equipamentos. O Quadro 1 sumariza os dados levantados.

Quadro 1 - Características coletadas dos projetos arquitetônicos

Variável	Unidade
Organização dos ambientes na edificação e funcionalidade	-
Densidade de iluminação	W/m ²
Área média das salas de aula e administrativas	m ²
Percentual de Abertura de Fachada (PAF)	%
Número de salas de aula	unidade
Número de salas administrativas	unidades
Características construtivas (materiais, cores utilizadas...)	-

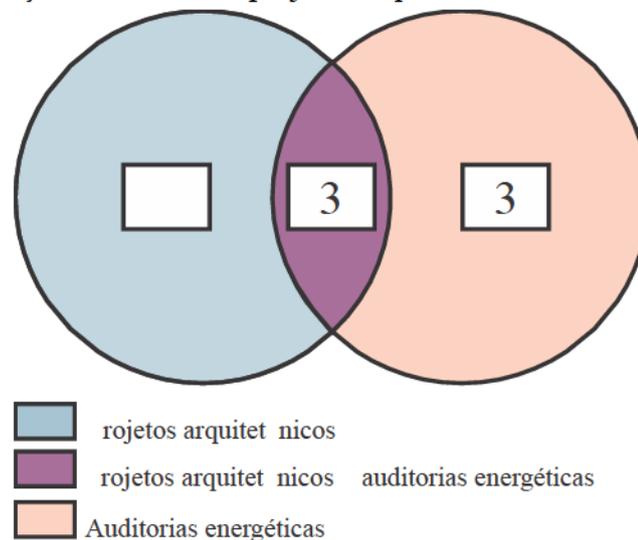
Fonte: elaboração própria (2021).

Os valores médios coletados dos projetos para a área das salas de aula e salas administrativas, para o percentual de abertura de fachada e para o número de salas de aula e salas administrativas foram utilizados para a construção do arquétipo local. A diferença entre o valor medido e o valor aplicado no arquétipo ficou abaixo de 10%, respeitando variações necessárias devido à conectividade de ambientes e critérios arquitetônicos de funcionalidade.

3.1.3 Auditorias energéticas

Dados de operação das escolas infantis puderam ser coletados de seis escolas que receberam auditorias energéticas, além da confirmação do que havia sido observado nos projetos, como as características construtivas. As auditorias conduzidas podem ser classificadas como Tipo 2, onde houve medição *on-site*. As escolas selecionadas para essa etapa dependeram da disponibilidade do local para visitação e precisaram ter agendamento anterior, devido ao funcionamento em escala reduzida, afetado pela emergência sanitária do COVID-19. Dessa forma, nem todas as escolas de ensino infantil puderam cumprir as duas condi es: três escolas não possuíam projetos, mas receberam auditorias energéticas. Figura 6 mostra a situa o das análises dos projetos arquitetônicos e das auditorias energéticas.

Figura 6 - Distribui o da análise de projetos arquitetônicos e auditorias energéticas



Fonte: elabora o própria (2021).

O protocolo seguido para a medi o dos equipamentos também teve que ser adaptado: as medi es ocorreram durante o período de uma hora para as geladeiras e freezers, com o aparelho *Yokogawa* (Figura 7), e no período de um ciclo de lavagem para as máquinas de lavar e de secar.   importante observar que as escolas não estavam com sua opera o normal, podendo, portanto, apresentar uma pequena varia o aos valores medidos.

Figura 7 - Medição com o *Yokogawa* dos refrigeradores

Fonte: a autora (2021).

Foram coletados dados da densidade de iluminação dos ambientes e dos equipamentos de cada ambiente, assim como das soluções arquitetônicas adotadas. Quando não era possível, consumos nominais dos equipamentos foram adotados. Equipamentos de ar condicionado haviam sido instalados no ano de 2020 em várias escolas de ensino infantil inspecionadas nas visitas. Portanto, esses equipamentos não foram considerados nas análises, uma vez que não foram contabilizados no consumo real de energia, do ano de 2019.

No fim de cada visita, foi realizada uma entrevista estruturada com o responsável pela operação da edificação, geralmente um diretor. Nesse momento, as principais informações de uso da edificação puderam ser coletadas.

As visitas foram conduzidas dos meses de agosto a outubro de 2020, durante a pandemia de COVID-19. Todas as medidas foram tomadas para redução da contaminação pelo vírus, como redução da equipe, uso de máscaras e distanciamento social. As escolas estavam operando como suporte para a comunidade e apenas com atividades administrativas reduzidas (GERALDI *et al.*, 2021a). A Tabela 2 organiza os dados analisados em cada etapa.

Tabela 2 – Quantidade de dados analisados para cada etapa da pesquisa

Etapa de análise de dados	Número de edificações analisadas
Número de edificações de ensino infantil total na Prefeitura de Florianópolis (com <i>outliers</i>)	63
Quantidade de edificações com dados simples e imagens de satélite	57
Quantidade de escolas com projetos arquitetônicos analisados	9
Quantidade de escolas com auditorias energéticas realizadas	6

Fonte: elaboração própria (2021).

Para o levantamento das auditorias energéticas foi utilizada uma planilha para a consolidação dos dados e comparação do consumo estimado e real. Essa planilha foi construída a partir do cruzamento dos dados de potência de equipamentos, do uso de equipamentos em horas/dia,

operação e ocupação. A potência dos equipamentos foi pesquisada pelos modelos observados nas auditorias; o uso dos equipamentos em horas por dia transcreve o número de horas de utilização máxima em um dia de funcionamento; a matriz de operação traduz o quanto esses equipamentos seriam usados em cada mês, em um índice de zero até um; e a matriz de ocupação interpreta a ocupação das classes de ambientes por mês, divididos em ambientes transitórios (corredores, depósitos, entre outros), de escritório (secretaria, diretoria, sala dos professores, entre outros) e salas de aula, também em um índice de zero à um. Buscou-se alcançar uma diferença menor que 10% entre os consumos energéticos totais reais e estimados.

3.2 CONSTRUÇÃO DO ARQUÉTIPO LOCAL

A concepção do arquétipo local tem o objetivo de estabelecer uma representação geométrica do estoque de edificações de ensino infantil de Florianópolis. O principal recurso para a criação do modelo foram a análise dos projetos, disponibilizados pela prefeitura de Florianópolis.

Algumas características chave para o consumo energético, segundo pesquisas descritas na etapa de revisão bibliográfica, foram observadas com atenção:

- Área total: um valor de área total foi adotado a partir da média dos valores encontrados nas 12 edificações analisadas com projetos arquitetônicos e/ou auditorias energéticas. Uma tolerância de 10% foi admitida na construção do arquétipo, por possíveis variações que podem existir devido às soluções arquitetônicas adotadas.
- Área das salas de aula e das salas administrativas: uma área padrão para as salas de aula foi determinada pela média das salas de aulas encontrada nas 12 edificações analisadas com projetos arquitetônicos e/ou auditorias energéticas. O mesmo procedimento foi feito para as áreas de salas administrativas. Uma tolerância de 10% foi admitida na construção do arquétipo, por possíveis variações que podem existir devido às soluções arquitetônicas adotadas.
- Número de salas de aula e salas administrativas: para a construção do arquétipo foi utilizado o valor médio do número de salas de aula e salas administrativas encontrado nas 12 edificações analisadas com projetos arquitetônicos e/ou auditorias energéticas. Quando os valores encontrados não eram inteiros, foram arredondados para o valor inteiro mais próximo. Esse dado impacta diretamente na área

condicionada da edificação, responsável por parcela significativa do consumo energético;

- Número de pavimentos: através das imagens de satélite, foi analisado o número de pavimentos predominante das escolas de ensino infantil de Florianópolis. O valor predominante será adotado para construção do arquétipo.
- Formato da edificação: essa característica pode ter efeitos no consumo energético das edificações, segundo a pesquisa realizada por Geraldini *et al.* (2021b), que também teve participação da autora do presente trabalho. Assim, para essa análise, foram examinadas as imagens de satélite das 57 escolas de ensino infantil pertencentes à amostra e o formato predominante das volumetrias foi adotado para o arquétipo local.
- Percentual de Abertura de Fachada (PAF): valor obtido pela divisão da área total de janelas pela área total da fachada em que pertence. Foi adotado o valor médio dos dados analisados nas 12 edificações analisadas com projetos arquitetônicos e/ou auditorias energéticas. O tipo de janela normalmente utilizado nos ambientes das escolas infantis também foi levado em consideração;
- Configuração dos ambientes: a organização dos ambientes dentro da edificação, como a posição das salas de aula e salas administrativas em relação a banheiros, cozinhas e refeitórios foi observada nos projetos analisados e nas auditorias energéticas. Comumente edificações de ensino infantil priorizarão a segurança das crianças e agilidade dos professores.

Depois da construção do arquétipo, uma calibração do modelo foi realizada, seguindo os padrões do Protocolo Internacional para Medida e Verificação de Desempenho (IPMVP, 2003). Para essa calibração, o consumo do arquétipo foi comparado com o consumo real de uma edificação com área e operação semelhantes. A escola infantil B04 foi escolhida, pela área semelhante àquela do arquétipo, três salas administrativas condicionadas e 10 salas de aula sem condicionamento. Para apenas essa situação foi simulada no arquétipo, utilizando ventilação natural e condicionamento de maneira mista, através do objeto *Energy Management System* (EMS) do *EnergyPlus*. As demais características do modelo foram adotadas conforme a condição base de simulação, descrita em 3.3.2. As quatro orientações da fachada foram simuladas.

Após esse teste, também foi realizada uma primeira análise de sensibilidade para verificar se a orientação da edificação exercia grande influência no consumo energético da edificação. Para isso, o arquétipo foi submetido a simulações energéticas em três cenários, nas quatro

orientações (Norte, Sul, Leste e Oeste): o primeiro considerando o modo misto (EMS), com ventilação natural e condicionamento para as salas administrativas; o segundo, com salas de aula e salas administrativas somente condicionadas e; o terceiro, considerando o modo misto para salas de aula e salas administrativas. Caso os resultados indiquem que a orientação apresenta uma variação de mais de 10% no consumo energético da edificação, na próxima etapa, de simulação energética, serão simuladas as quatro orientações.

3.3 SIMULAÇÃO ENERGÉTICA

3.3.1 Configurações do modelo energético

O modelo geométrico do arquétipo foi construído no *Trimble Sketchup*, com o *plugin* do *OpenStudio*, e os dados energéticos inseridos no *EnergyPlus* versão 9.4, para execução da simulação. O objetivo das simulações energéticas é ampliar o volume de dados para a construção da equação de *benchmark* energético, variando as condições base do arquétipo a partir das condições observadas no estoque de edificações.

Para as simulações, foi utilizado um único arquivo climático para a cidade de Florianópolis, no formato TMYx (2004-2018), já que se tratava de um modelo local.

Em relação à modelagem do condicionamento de ar, foi estabelecido horários fixos de condicionamento, dependendo da época do ano. O sistema de condicionamento adotado foi o *HVACTemplateSystem:Unitary*, ou seja, já considerando o COP dos aparelhos, de 3,6 W/W, diferente do modelo nacional, segundo o valor mais usual observado nas auditorias energéticas. Os *setpoints* de temperatura para aquecimento e resfriamento seguiram o mesmo padrão preconizado pelo modelo nacional. Os cenários condicionados consideraram uso das 8:00 horas às 12:00 horas e das 14:00 horas às 18:00 horas para os meses de verão e primavera e das 15:00 horas às 18:00 horas para os meses de inverno e outono. Sistemas de aquecimento, apesar de não comuns nas escolas brasileiras, podem ser necessários no nível infantil em Florianópolis, devido ao clima mais frio e a maior sensibilidade das crianças até seis anos a temperaturas fora da faixa de conforto.

Foram estabelecidos também critérios para o contato com o solo do piso da escola. A classe de objetos *Site:GroundTemperature* foi utilizada, através do método de diferenças finitas para a transferência de calor entre o solo e a superfície do piso.

Características como janelas zenitais, por vezes existentes em escolas de ensino infantil, não foram simuladas.

3.3.2 Variações adotadas no modelo de simulação paramétrica

O modelo base, com a operação padrão, considera o funcionamento regular do ano letivo de salas de aula e salas administrativas das 8:00 horas até as 18:00 horas, do dia 15 de fevereiro até 10 de dezembro. Para as salas administrativas, ainda é considerado um funcionamento de 15 de janeiro até 15 de fevereiro e de 10 de dezembro até 15 de dezembro, com 50% da ocupação regular, das 8:00 horas às 16:00 horas. Nos demais dias do ano, não é considerado nenhum tipo de atividade nas escolas de ensino infantil. No modelo nacional, diferentes períodos de operação do ano foram considerados nas simulações, não seguindo um padrão. Entretanto, períodos sem funcionamento também foram adotados.

Os valores de equipamentos foram considerados fixos em todas as simulações: 15W/m² para os equipamentos de cozinha e salas administrativas, operantes nos períodos ocupados; 5500W para chuveiros, sendo uma unidade por banheiro, usada 45 minutos por dia letivo e; 1200W para máquinas de lavar e secar, operantes 3 horas por dia letivo. Os valores utilizados para o uso dos equipamentos foram determinados pela experiência obtida com as auditorias energéticas conduzidas nas escolas de ensino infantil.

O calor dissipado adotado para pessoas foi de 70W/m² para as salas administrativas e de 108W/m² para as salas de aula, em todos os cenários. A densidade de potência de iluminação e de pessoas considerada, tanto para salas de aula como para salas administrativas, foi de 6,5 W/m² e 2,5 m²/pessoa, respectivamente, considerando o observado nas auditorias. Esse cenário foi utilizado para o primeiro teste de sensibilidade, variando as orientações da fachada principal da edificação. Em seguida, após definir se a orientação é uma característica de impacto para o consumo energético, o arquétipo foi submetido às variações descritas a seguir.

Ao todo, foram realizadas 2.160 simulações, considerando oito diferentes características, que foram combinadas entre si por meio da ferramenta *Parametric* do *software* EnergyPlus, em que é possível realizar também a combinação das variáveis entre si.

3.3.2.1 Densidade de potência iluminação das salas de aula

As densidades de potência iluminação nas salas de aula escolhidas para a simulação adotam os valores observados nas análises de projeto e auditorias energéticas. A partir do menor valor e do mais elevado, foram estabelecidas cinco diferentes densidades para compor os cenários de simulação energética. Foram mantidos intervalos regulares entre as densidades. Uma consideração importante a ser feita é que muitas escolas de Florianópolis já adotam sistemas de iluminação eficientes, com uso de lâmpadas LED, devido a incentivos criados por políticas públicas do município. Valores que destoavam muito dos coletados no restante da amostra foram considerados pouco representativos e não utilizados.

3.3.2.2 Padrão de iluminação nas salas de aula

O padrão de iluminação nas salas de aula considera um cenário com 100% das luzes ligadas, durante os horários de operação, e outro de economia de energia, onde apenas 50% das luzes estão ligadas, das 8:00 horas até as 12:00 horas, durante os meses de verão e primavera. O cenário de economia de energia considera que as luzes mais próximas às janelas poderão ser desligadas, para aproveitamento da luz natural.

3.3.2.3 Sistemas construtivos de paredes e das coberturas

A absorvância solar das paredes e os sistemas construtivos da cobertura foram escolhidos conforme dados predominantes observados nas auditorias energéticas e na análise de projetos arquitetônicos. Predominantemente as paredes eram estruturas de blocos cerâmicos, reboco interno e externo e pintura, com cores mais claras, como o branco, até médias, como o laranja. Esse sistema construtivo foi testado, com as duas absorvâncias predominantes.

Os sistemas de cobertura predominantes constatados pelas auditorias energéticas e análise de projetos arquitetônicos foram sistemas com telhas de fibrocimento, câmara de ar e laje de concreto (10cm), com ou sem isolamento de lã de rocha abaixo das telhas. Foram testados dois sistemas, com maior e menor transmitância e duas absorvâncias. Os valores também seguiram o observado nas auditorias.

Os valores de absorvância solar adotados para os sistemas receberam ainda um acréscimo devido à degradação, definido na NBR 15.575-1:2021 (ABNT, 2021) pela Equação 5.

$$\alpha_{t=3} = 0,07 \times (\alpha_{t=0})^2 + 0,59 \times \alpha_{t=0} + 0,27 \quad (5)$$

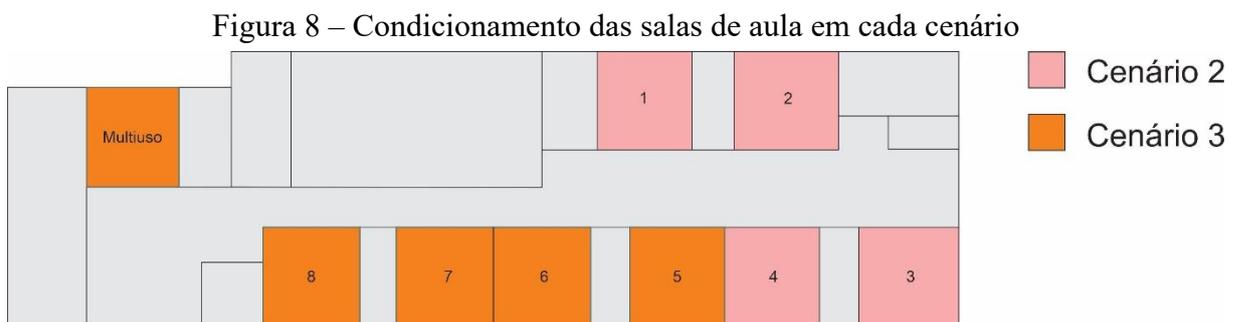
3.3.2.4 Densidade de alunos nas salas de aula

A densidade de alunos nas salas de aula seguiu o determinado no decreto municipal para escolas de ensino infantil, considerando os limites superior, 20 alunos, e inferior, 15 alunos, para ocupação. Para determinar a área disponível por aluno utilizada nas simulações, a área média das salas de aula do arquétipo foi dividida pelos limites inferior e superior para o número de alunos, formando os dois valores analisados para a variável.

3.3.2.5 Carga do sistema de condicionamento de ar nas salas de aula e salas administrativas

As cargas do sistema de condicionamento de ar nas salas de aula e nas salas administrativas apresenta três cenários: uso total da capacidade do sistema de ar condicionado (100%), uso parcial (75%) e sem uso do sistema condicionamento de ar (0%). Para a modelagem dos cenários, foram modificadas as frações de uso nas *schedules* responsáveis pela determinação dos horários condicionados.

3.3.2.6 Padrão de uso de condicionamento de ar nas salas de aula



Fonte: elaboração própria (2021).

Por fim, o padrão de uso de condicionamento de ar nas salas de aula simula um cenário intermediário de instalação de aparelhos, com diferentes salas de aula condicionadas simuladas. No primeiro cenário, todas as salas de aula são condicionadas; no segundo cenário, apenas as

salas 1, 2, 3 e 4 e; no terceiro cenário, apenas as salas 5, 6, 7, 8 e multiuso. A escolha foi feita pela correspondência de áreas mais próxima, em salas localizadas em fachadas opostas. A

Figura 8 mostra a localização das salas em cada cenário. Para as salas administrativas, apenas o preconizado no item 3.3.2.5.

O Quadro 2 descreve os cenários simulados descritos anteriormente. Nas abreviações, U é considerado como transmitância térmica, CT como capacidade térmica e ARS como Absortância à Radiação Solar.

Quadro 2 - Parâmetros variados nas simulações energéticas

Parâmetro	Número de variações	Valores e características utilizadas
Densidade de iluminação nas salas de aula (W/m^2)	5	2,00; 4,00; 6,00; 8,00 e 10,00
Padrão de iluminação das salas de aula	2	100% e 50%
Absortância solar das paredes	2	U= 2,40 $W/m^2.K$; CT= 140,30 $kJ/m^2.K$; ARS=0,38 U= 2,40 $W/m^2.K$; CT= 140,30 $kJ/m^2.K$; ARS= 0,505
Sistemas construtivos da cobertura	2	U= 2,13 $W/m^2.K$; CT= 308,40 $kJ/m^2.K$; ARS=0,44; U= 0,43 $W/m^2.K$; CT= 252,80 $kJ/m^2.K$; ARS=0,72
Densidade de alunos ($m^2/aluno$)	2	6,94 $m^2/pessoa$ e 5,26 $m^2/pessoa$
Carga do sistema de condicionamento de ar nas salas de aula	3	Caso 01:100%; Caso 02: 75%; Caso 03: 0%.
Carga do sistema de condicionamento de ar nas salas administrativas	3	Caso 01:100%; Caso 02: 75%; Caso 03: 0%.
Padrão de uso de condicionamento de ar nas salas de aula	3	Caso01: Todas as salas de aula condicionadas, Caso 02: salas de aula 1, 2, 3 e 4 condicionadas; Caso 03: salas de aula 5, 6, 7, 8 e multiuso condicionadas.

Fonte: elaboração própria (2021).

Para realizar as simulações energéticas e análises das auditorias, os ambientes das escolas foram divididos em três categorias: (1) salas de aula, (2) salas administrativas, considerando coordenação, sala dos professores e secretarias, e (3) ambientes transitórios, onde foram incluídos banheiros, refeitórios, cozinhas e corredores.

3.4 EQUAÇÃO DE *BENCHMARK* ENERGÉTICO LOCAL

Antes da elaboração da equação de *benchmark* energético do modelo local, foi realizada uma análise de sensibilidade das variáveis para compreender quais delas teriam maior impacto no consumo energético das escolas de ensino infantil, através de uma análise de sensibilidade. O teste considerou um índice baseado na variância, já realizado por Silva e Ghisi (SILVA; GHISI, 2014). Dois índices foram calculados para cada caso: (1) um global, determinado pela divisão da variância do EUI de um caso da variável considerada (por exemplo, a variância de todos os casos com as paredes do tipo 1) e a variância total do EUI de todos os casos; (2) e um médio, determinado pela divisão da variância do EUI médio da variável considerada (por exemplo, variância do EUI médio das paredes nos casos 1 e 2) pela variância total do EUI de todos os casos simulados. Para considerar a variável na equação de *benchmark*, o resultado do índice médio deve ser maior que 5%. O índice global demonstra a importância dos valores adotados para cada variável.

Depois que as variáveis para a composição a equação foram escolhidas, pode-se prosseguir para sua elaboração. Foi escolhido o método da regressão linear múltipla. Dessa forma, as 2.160 simulações energéticas realizadas, variando as características apresentadas na etapa anterior, forneceram um valor de consumo energético para cada caso, assim como valores para as variáveis consideradas na equação. A equação para o *benchmark* energético local seguiu o modelo genérico apresentado pelo Equação 6.

$$EUI = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_px_p \quad (6)$$

Onde:

EUI é a Intensidade de Uso Energético (kWh/m².ano);

a é o coeficiente linear do modelo de regressão;

b é o coeficiente angular da variável “p” do modelo de regressão;

x é cada variável significativa “p” do modelo de regressão.

No caso do modelo de *benchmarking* local, será utilizada apenas uma equação para descrever os casos condicionados e não condicionados, já que nas simulações ambas as situações são abrangidas pelos cenários simulados, diferentemente do modelo de *benchmarking* nacional. Uma variável abordando a área condicionada será considerada. Para garantir a congruência do modelo, o coeficiente de determinação da equação foi analisado.

3.5 ANÁLISE DE DADOS

Para essa última etapa do método, foram usados dados de 12 escolas de ensino infantil de Florianópolis, pertencentes à amostra de 57 escolas encontradas após o processo de limpeza da

amostra. As escolas foram escolhidas devido à disponibilidade de dados. Os valores de consumo típico foram obtidos pelas equações de *benchmark* local e nacional.

A primeira comparação entre os dois *benchmarks*, nacional e local, foi feita pela classificação de desempenho energético, através de uma escala, que classificava as edificações em ineficientes, típicas ou eficientes, mesma escala utilizada para o modelo de *benchmarking* nacional. Para a determinação da classificação de cada escola, a escala baseou-se no valor típico, encontrado por cada equação. Quando o valor real de consumo energético por unidade de área é maior que o típico mais o desvio padrão (σ) do EUI resultante das simulações, a edificação é classificada como “ineficiente” (I). Quando o valor de consumo energético por unidade de área é menor que o valor típico menos esse desvio padrão, a edificação é classificada como “eficiente” (E). Quando o valor do consumo energético por unidade de área está entre esses dois limites, a edificação é classificada como “típica”. Cada edificação recebeu duas escalas próprias, segundo os resultados de consumo energético típico fornecidos pelas equações de *benchmark* local e nacional. É importante observar que o modelo de *benchmarking* nacional possui, segundo o relatório do projeto, uma outra forma de classificação, que não foi adotada nesse estudo.

Em seguida, foi realizado o teste ANOVA (análise de variância) para entender se as diferenças entre os valores de EUI típico obtidos pelas duas equações eram estatisticamente significativas e, por isso, deveriam ser levadas em conta na classificação de desempenho das edificações. Foi considerado um teste com dois tratamentos, as equações local e nacional, o EUI como variável resposta e um nível de significância de 95%. A hipótese nula, H_0 , significa que não existe evidência estatística que as equações trazem resultados diferentes, e a H_1 , significa o contrário da hipótese nula. Os p-valores com valor menor que 5% demonstram uma rejeição de H_0 , indicando que existe evidência estatística de diferenças nos EUI típicos resultantes das duas equações.

As escolas de ensino infantil avaliadas foram especificadas em condicionadas e não condicionadas, destacando a influência desse sistema na classificação de desempenho da edificação. A definição das características de condicionamento das escolas avaliadas nessa etapa de comparação de dados foi realizada por meio da análise de projetos arquitetônicos ou das auditorias energéticas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir do método apresentado e das análises executadas, são apresentados os resultados e discussões neste capítulo, a fim de cumprir com os objetivos deste trabalho e responder à pergunta de pesquisa. As escolas públicas de ensino infantil de Florianópolis serão abordadas em detalhe.

4.1 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

4.1.1 Caracterização da amostra

A análise do estoque de edificações foi realizada a fim de melhor representar as características da amostra de edificações públicas de ensino infantil de Florianópolis. A partir das imagens de satélite, foram coletadas informações sobre o formato das edificações, do número de pavimento das edificações e das cores das paredes externas e coberturas das escolas de ensino infantil. Destas, três edificações, mesmo pertencentes a amostra, não apresentavam imagens claras via satélite e não foram contabilizadas. Das edificações analisadas, 89% são térreas e as demais são edificações com dois pavimentos. Quando possuem mais de um pavimento, a edificação possui rampas para a comunicação entre os andares. A Tabela 3 apresenta os resultados dessa análise.

Tabela 3 – Levantamento do número de pavimentos das edificações da amostra

Número de pavimentos	Quantidade de edificações
1º pavimento	48
2º pavimento	6
Total	54

Fonte: elaboração própria (2021).

Além disso, tratando-se do formato da edificação, 68% foram classificadas como retangulares; portanto, foi adotado como formato predominante (Tabela 4). Edificações retangulares possuem um corredor central, com as salas de aula, administrativas e de serviços distribuídas nas extremidades. Essas decisões arquitetônicas são relevantes para descrever a tipologia e visam a segurança e mobilidade facilitada das crianças. Da mesma forma, nem todas as edificações puderam ser analisadas.

Tabela 4 – Levantamento do formato das edificações da amostra

Formato da edificação	Quantidade de edificações
Retangular	37
Formato T	4
Formato L	5

Formato da edificação	Quantidade de edificações
Formato U	7
Formato O	1
Total	54

Fonte: elaboração própria (2021).

Em relação as cores das paredes externas e das coberturas das edificações analisadas, 54% das edificações possuem paredes laranjas e 59% com coberturas de cor cinza (cor do material fibrocimento). As cores analisadas, reunidas na Tabela 5, serviram de base para a escolha dos valores de absorvância à radiação solar utilizadas nas simulações energéticas. Como no caso dos levantamentos anteriores, não foi possível coletar informações de todas as edificações.

Tabela 5 – Levantamento das cores nas paredes externas e nas coberturas das edificações da amostra

Categoria	Cor	Número de edificações com a cor nas paredes externas	Número de edificações com a cor na cobertura
Branco		5	0
Bege		9	14
Laranja		29	8
Amarelo		8	0
Azul		2	0
Cinza médio		1	32
Total		54	54

Fonte: elaboração própria (2021).

Pode-se perceber, pelos resultados apresentados, que as cores nas coberturas e paredes externas variam significativamente. Por esse motivo, nas simulações energéticas, foi adotado um valor representativo de ARS para cores mais claras e outro para cores mais escuras, tanto para paredes externas como para coberturas. Absorvâncias solares com menos de cinco edificações foram consideradas pouco representativas e não analisadas.

A Tabela 6 mostra um resumo dos dados importantes para a amostra analisada, referentes ao EUI (kWh/m²) e para o número de crianças. Os dados de consumo, área construída e número de alunos foram retirados da análise dos dados simples das 57 escolas de ensino infantil da amostra, recebidos da prefeitura de Florianópolis.

Tabela 6 – Resumo dos valores de consumo energético por unidade de área e do número de alunos encontrados para a amostra analisada

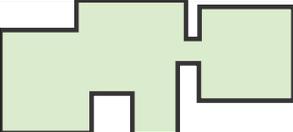
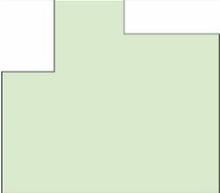
Variável	Número de alunos	EUI (kWh/aluno.ano)	EUI (kWh/m².ano)
Valor mínimo	41	24,67	5,66
Valor máximo	412	226,39	56,58
Valor médio	168	90,74	27,14
Valor mediano	164	90,76	25,40
Desvio padrão	80	38,78	10,64

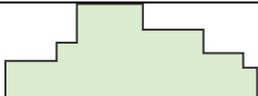
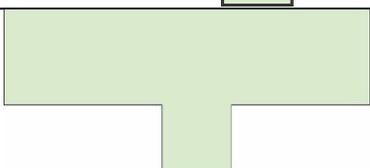
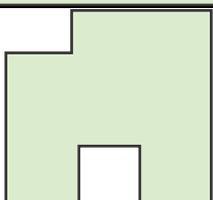
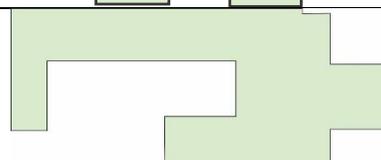
Fonte: elaboração própria (2021).

A partir dos valores da Tabela 6, percebe-se como o modelo é heterogêneo e as características de consumo energético e população não podem ser generalizadas. Essas variáveis estão ligadas diretamente com outros dados da edificação, como número de salas de aula, turnos de atendimento e área condicionada, que serão estudadas nas análises de sensibilidade. Os valores de média e mediana se aproximam, tanto no consumo energético relativo ao número de alunos como aquele relativo à área. Além disso, o desvio padrão é ligeiramente maior no índice calculado com o número de alunos. Por essa variação maior e pela maior parte das edificações não possuírem condicionamento de ar, o índice relativo à área foi utilizado nas análises.

Considerando a amostra inicial de 57 edificações, 12 delas tiveram uma análise mais detalhada, pela análise de projetos e/ou auditorias energéticas. O Quadro 3 resume as características das edificações de ensino infantil analisadas. Alguns projetos não possibilitaram o levantamento do PAF das edificações.

Quadro 3 – Características das edificações de ensino infantil analisadas em profundidade

Formato da edificação	ID	Análises	Área construída total (m²)	Número de alunos	PAF médio (%)	Existência de ar condicionado nas salas de aula (S/N)	Densidade de iluminação (W/m²)
	B01	Projetos	1242,48	169	31,43	Sim	7,33
	B02	Auditoria	724,63	216	-	Não	8,59
	B03	Projetos	511,00	120	19,84	Sim	4,90
	B04	Auditoria/ Projetos	963,71	202	29,31	Sim	6,95
	B05	Projetos	422,00	105	24,87	Sim	6,13
	B06	Projetos	454,22	112	-	Não	5,00

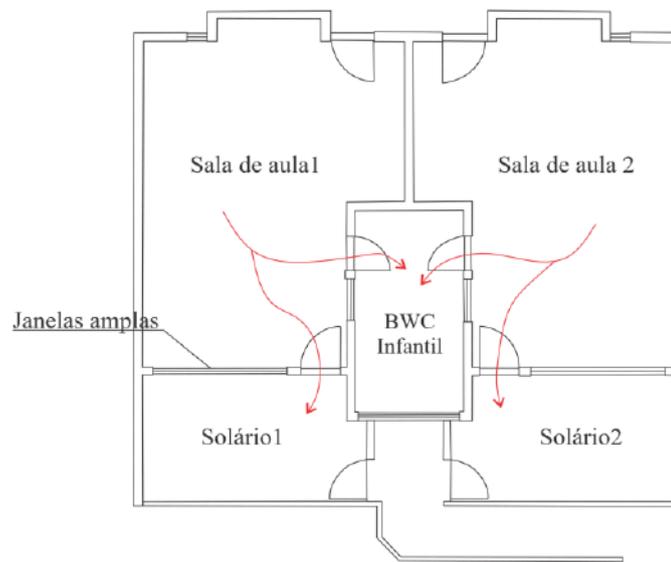
Formato da edificação	ID	Análises	Área construída total (m²)	Número de alunos	PAF médio (%)	Existência de ar condicionado nas salas de aula (S/N)	Densidade de iluminação (W/m²)
	B07	Auditoria	504,63	132	-	Não	1,97
	B08	Auditoria/ Projetos	384,27	172	38,37	Sim	13,52
	B09	Projetos	1084,29	253	-	Sim	7,86
	B10	Auditoria	176,75	41	-	Sim	5,63
	B11	Auditoria	350,33	97	-	Não	6,67
	B12	Projetos	887,26	240	24,22	Sim	2,50

4.1.2 Análise de projetos

Das 12 edificações analisadas no Quadro 3, a Prefeitura de Florianópolis cedeu projetos arquitetônicos de nove para realização do estudo. Assim, pode-se ter uma ideia inicial das divisões dos espaços, estratégias arquitetônicas e demais características das tipologias. As principais características são relatadas nos próximos parágrafos.

Os banheiros infantis são de fácil acesso às salas de aula, geralmente entre duas salas, reduzindo a distância percorrida pela criança quando necessário utilizá-los. As salas de aula geralmente dispõem de um solário externo, permitindo brincadeiras externas, mas com supervisão das professoras (Figura 9).

Figura 9 - Esquema das salas de aula em escolas infantis



Fonte: elaboração própria (2021).

As janelas são amplas e possibilitam o aproveitamento da iluminação e ventilação natural, facilitando também a entrada de calor (Figura 10). Mesmo assim, a maior parte das salas dos projetos analisados possui ar condicionado e ventiladores. Outro equipamento que apresenta consumo representativo são as máquinas de lavar e secar roupas, inexistentes em outros níveis de educação, necessárias para a lavagem diária do jogo de cama utilizado pelas crianças.

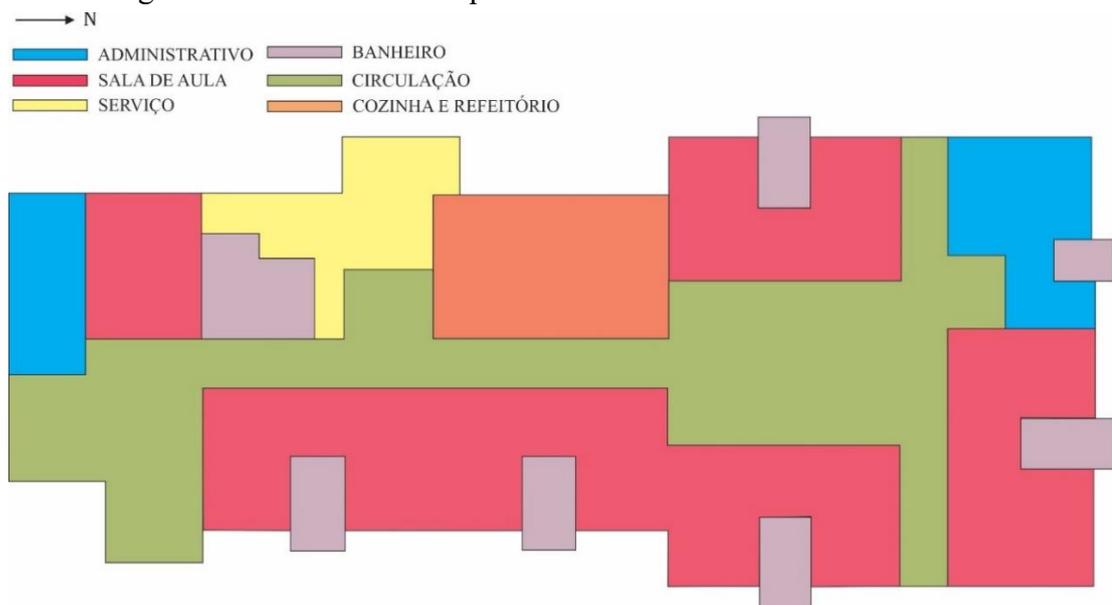
Figura 10 - Fachada externa e corredor interno na escola de ensino infantil B08



Fonte: a autora (2021).

Os ambientes de permanência transitória foram simulados apenas com ventilação natural, como observado nas auditorias energéticas. O *layout* dos ambientes e a organização das escolas foram necessários para construção do arquétipo, apresentado nas próximas etapas. Na entrada da escola, ficam localizadas salas administrativas e de recepção, para acolhimento de pais e alunos. Logo, são distribuídos ao redor de um corredor central, as salas de aula, ambientes de serviço e o refeitório. A sala dos professores geralmente fica aos fundos, entre às salas de aula, ou juntamente com as demais salas administrativas. A planta baixa esquemática da escola B01 representa o descrito na Figura 11.

Figura 11 – Planta baixa esquemática da escola de ensino infantil B01



Fonte: a autora (2021).

4.2 AUDITORIAS ENERGÉTICAS ÀS ESCOLAS DE ENSINO INFANTIL DE FLORIANÓPOLIS

Com o objetivo de verificar quais eram os sistemas presentes nas edificações, averiguar informações contidas nos projetos e levantar dados sobre a operação da edificação, foram conduzidas visitas em seis edificações de ensino infantil de Florianópolis, chamadas de B02, B04, B07, B08, B10 e B11.

A escolha baseou-se na disponibilidade de agendamento das visitas e na representatividade das edificações na amostra em relação ao seu consumo energético anual por unidade de área. Ou seja, buscaram-se escolas com diferentes valores de consumo energético por unidade de área.

4.2.1 Operação

O horário de funcionamento das escolas é das 8:00 horas às 18:00 horas, com funcionamento em período integral. A Portaria nº 345/2018 da Prefeitura de Florianópolis (PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS, 2018) estabelece o limite de alunos nas salas de aula das escolas de ensino infantil do município, que deve estar no intervalo de 15 até 20 alunos por sala de aula.

4.2.2 Equipamentos

Pelas auditorias, foi percebido que três escolas de ensino infantil tiveram a instalação de aparelhos de ar condicionado nas salas de aula apenas para o ano letivo de 2020. Ou seja, os dados de consumo energético recebidos não contam com esse adicional. Todas as salas possuem ventiladores, utilizados nos dias de calor. Os aparelhos de ar condicionado, quando existentes, possuem potência variando de acordo com o tamanho do ambiente refrigerado, com valor de COP mais comum sendo de 3,6 W/W.

Outro consumo que se mostra importante para a tipologia, tanto de energia como de água, são o uso das máquinas de lavar e de secar também medidas durante as visitas às edificações (Figura 12). As máquinas de secar suprem a necessidade quando não há espaço ou condições para secagem ao ar livre. O uso diário depende do tamanho da escola, mas estaria dentro do intervalo de três até cinco ciclos de lavar roupa por dia e um até três ciclos de secar. A utilização dos aparelhos está diretamente ligada com o número de alunos das escolas de ensino infantil.

Figura 12 - Lavanderia na escola de ensino infantil B11



Fonte: a autora (2021).

Os valores medidos nas edificações de ensino infantil para geladeiras, freezers e máquinas de lavar e secar estão dispostos na Tabela 7. Os equipamentos de escolas que receberam auditorias energéticas e não estão relatadas na tabela não puderam ser medidos. Os valores medidos foram utilizados para aproximação dos usos finais reais com os estimados.

Tabela 7 – Valores medidos em equipamentos nas escolas de ensino infantil

Escola	Equipamento	Tempo de medição	Valor (kWh)
B02	Geladeira 1	1 hora	23
	Geladeira 2	1 hora	24
B04	Máquina de lavar	1 ciclo	240
	Máquina de secar	1 ciclo	1550
	Geladeira 1	1 hora	31
	Geladeira 2	1 hora	46
	Freezer 1	1 hora	58
B07	Geladeira 1	1 hora	31
	Geladeira 2	1 hora	31
	Freezer 1	1 hora	94
	Freezer 2	1 hora	94
B08	Geladeira 1	1 hora	18
	Geladeira 2	1 hora	18
	Geladeira 3	1 hora	66
	Freezer 1	1 hora	131
B10	Geladeira 1	1 hora	18
	Geladeira 2	1 hora	18

Escola	Equipamento	Tempo de medição	Valor (kWh)
	Freezer 1	1 hora	30
B11	Geladeira 1	1 hora	22
	Geladeira 2	1 hora	48
	Geladeira 3	1 hora	66
	Geladeira 4	1 hora	78
	Geladeira 5	1 hora	96
	Máquina de lavar 1	1 ciclo	240
	Máquina de lavar 2	1 ciclo	310
	Máquina de secar	1 ciclo	600

Fonte: a autora (2021).

4.2.3 Iluminação

Como mencionado na revisão bibliográfica, a iluminação costuma ter valor significativo no consumo de uma edificação educacional. Nas visitas realizadas, percebeu-se que a troca de lâmpadas incandescentes e fluorescentes por lâmpadas LED já acontece, reduzindo o gasto energético. É importante que a intensidade luminosa não seja afetada, permitindo que as atividades nas áreas administrativas e educacionais aconteçam normalmente. Nas visitas, foi percebido muitas vezes que as lâmpadas de ambientes não ocupados eram mantidas acesas, afetando conseqüentemente no consumo energético mensal. A potência de cada lâmpada foi anotada para cada edificação visitada, resultando em uma potência total.

O uso da iluminação natural, apesar de reduzir o consumo energético da edificação e de melhorar a sensação de conforto dos usuários, conflita diretamente com a entrada de calor e o ofuscamento no interior dos ambientes. Algumas estratégias foram usadas para proteção solar como cortinas internas ou externas e pérgolas (Figura 13).

Figura 13 - Estratégias de Proteção Solar nas escolas de ensino infantil B04



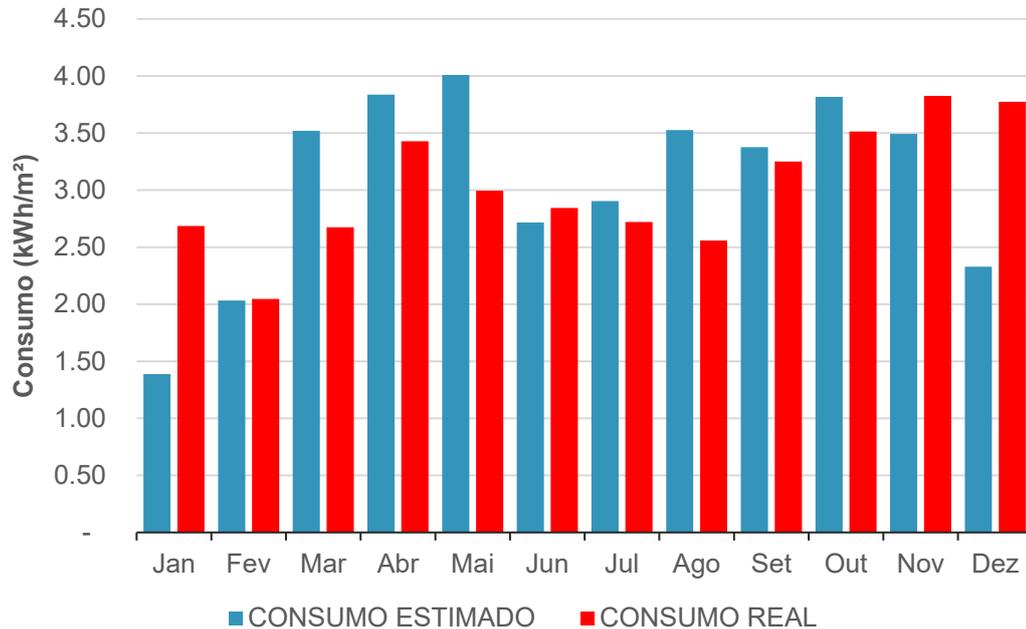
Fonte: a autora (2021).

4.2.4 Estimativa dos usos finais e da operação das escolas de ensino infantil

Após as visitas, foram tabulados os dados coletados, como o número, descrição e potência dos equipamentos e lâmpadas. Fazendo uma breve conversa com os gestores da edificação, foi possível compreender melhor o uso das mesmas. Os resultados foram então utilizados para realizar as primeiras aproximações dos usos finais, facilitando na posterior execução das simulações. Para aproximação dos resultados, foram feitas duas tabelas: uma de operação e outra de ocupação, com a definição de valores percentuais para cada mês do ano. Com as porcentagens, definidas pelas conversas com gestores, e as horas de operação por dia de cada equipamento levantado, foi possível chegar em um uso estimado próximo do real.

Como exemplo, os resultados para a escola de ensino infantil B11, não condicionada, são mostrados nas Figura 14 e 15. A diferença percentual do consumo total anual estimado e real para a escola B11 foi de 1,71%.

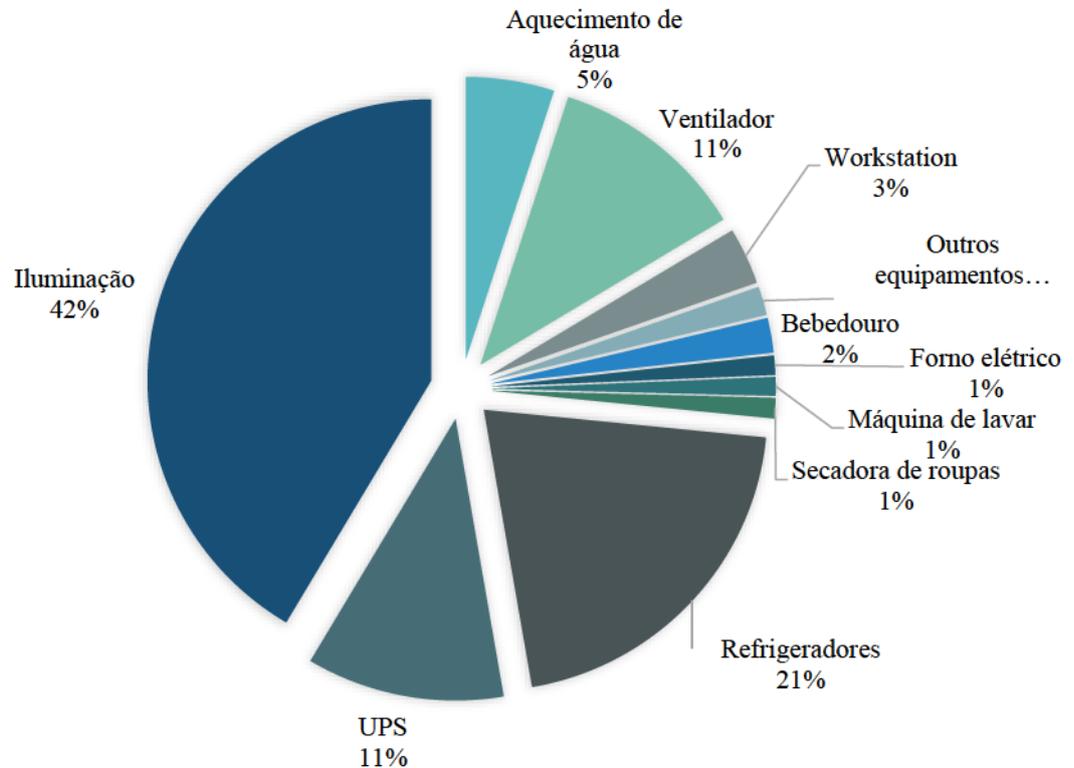
Figura 14 - Comparação do Consumo Real com o Consumo Estimado para a escola de ensino infantil B11



Fonte: elaboração própria (2021).

Como observado, foi possível aproximar de maneira satisfatória o consumo energético real anual do estimado, realizado através dos levantamentos em campo. Foram considerados a iluminação, o aquecimento de água por chuveiros elétricos, ventiladores, ar condicionados (quando existentes), refrigeradores, máquinas de lavar e secar roupas, UPS (Fonte de Alimentação Ininterrupta, do inglês *Uninterruptible Power System*), fornos, bebedouros e outros equipamentos, nos quais estão inclusos aparelhos de televisão e impressoras. As UPS funcionam sem interrupções, pois são responsáveis por fornecer energia estabilizada quando ocorre interrupção na rede primária. Os usos finais foram obtidos por meio da planilha de consolidação de dados, já descrita no item 3.1.3 do Método.

Figura 15 - Resumo dos usos finais para o consumo energético estimado na escola de ensino infantil B11

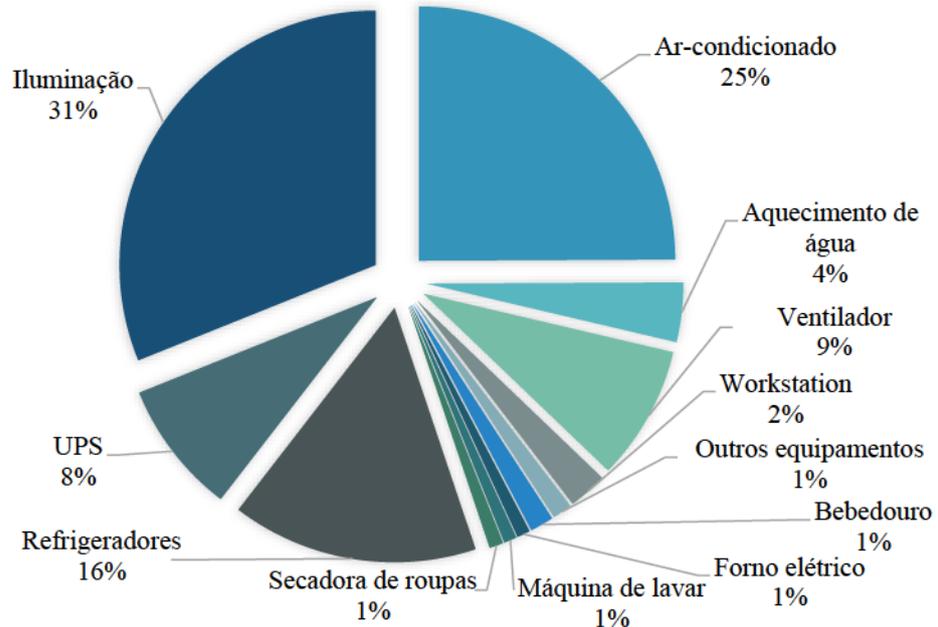


Fonte: elaboração própria (2021).

Como esperado, na Figura 15 percebe-se que a iluminação tem grande representatividade no consumo energético da edificação de ensino infantil, chegando a 41%, seguida pelos refrigeradores, com 21%.

Considerando-se a situação hipotética onde há o uso de ar condicionado no período letivo nas salas de aula, durante quatro horas diárias nos meses de verão e primavera e duas horas nos meses de inverno e outono, os consumos aumentavam em 4.297,72kWh/ano (24,93% do total) ou 12,27kWh/m²/ano (Figura 16), do valor inicial de 12.943 kWh/ano. A estimativa foi realizada pela adição do consumo do sistema de ar condicionado na tabela de consolidação de dados. Quando acontecer futuramente, o uso deve ser monitorado e orientado, evitando o desperdício e o uso indiscriminado do condicionamento artificial.

Figura 16 - Usos Finais estimados, considerando condicionamento artificial nas salas de aula, na escola de ensino infantil B11



Fonte: elaboração própria (2021).

A partir da coleta de dados e da tabulação realizada, foi possível chegar em uma aproximação por uso final para as seis escolas visitadas. Na Tabela 8 são apresentados os principais usos finais e sua porcentagem de representação no consumo energético total, além da média calculada para as escolas condicionadas e não-condicionadas separadamente. Os usos mais representativos são de iluminação, UPS, refrigeradores e, quando existentes, ar condicionados. A diferença do valor do consumo total real anual e estimado também foi apresentada.

Tabela 8 – Porcentagens dos principais usos finais nas escolas de ensino infantil

ID da edificação	Principais usos finais (%)							Diferença entre cons. energ. real e estimado anual (%)
	Ar-condicionado	Iluminação	UPS	Refrigeradores	Aq. de água	Ventiladores	Máquina de lavar e secar roupas	
B02	0	64,95	12,56	2,39	5,14	1,45	3,42	4,44
B04	14,70	21,84	53,27	2,84	0	3,44	4,51	0,35
B07	0	12,69	17,66	16,66	9,78	9,91	3,06	1,89
B08	14,22	21,22	6,37	8,78	13,20	14,16	3,83	9,81
B10	26,75	18,49	20,98	6,05	4,35	10,24	5,42	9,49
B11	0	40,56	11,02	16,05	4,98	11,11	7,80	1,71
Média cond.	18,56	20,51	26,87	17,76	5,85	9,28	4,59	6,55
Média não-cond.	0	39,40	13,75	11,70	6,63	7,49	4,76	2,68

Fonte: elaboração própria (2021).

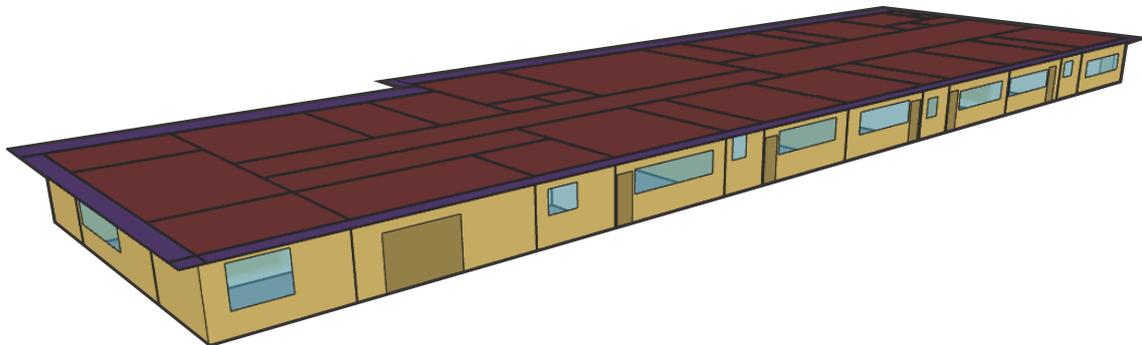
Para fazer uma análise mais justa, escolas condicionadas e não condicionadas foram separadas. Para as três edificações não condicionadas, o valor de consumo energético médio para o sistema de ar-condicionado é de 18,56% do total. As escolas analisadas possuem condicionamento apenas nas zonas administrativas.

É possível perceber também que, quando o sistema de condicionamento de ar não é existente, a representatividade da iluminação cresce de 19,28% nas escolas condicionadas para 39,40% nas escolas não condicionadas. A média da porcentagem de erro admitida entre o consumo real e estimado é próxima nas duas condições, ambas menores que 10%.

4.3 CONSTRUÇÃO DO ARQUÉTIPO LOCAL

A partir dos dados levantados nas etapas anteriores, o modelo geométrico para o arquétipo local foi desenvolvido. O arquétipo foi modelado no *Sketchup*, pelo *plugin OpenStudio*, para depois ser trabalhado no *EnergyPlus*. A Figura 17 mostra o arquétipo local, que tem como objetivo representar o *layout* das edificações públicas existentes de ensino infantil em Florianópolis.

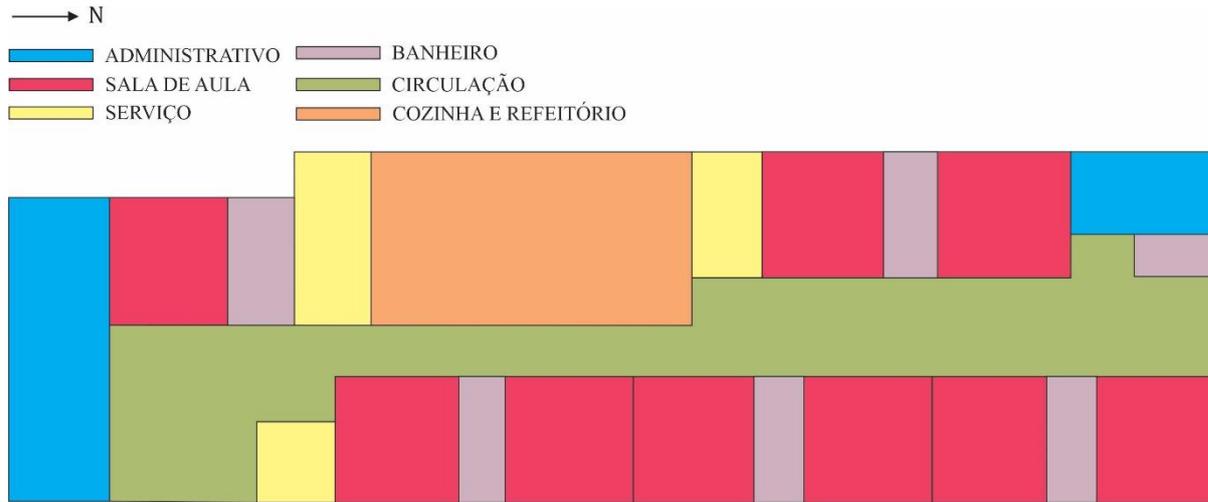
Figura 17 – Modelo 3D do arquétipo local (a)



Fonte: elaboração própria (2021).

Uma planta baixa esquemática do arquétipo local é apresentada na Figura 18, dividida pelo uso: (1) ambientes administrativos; (2) salas de aula e (3) ambientes transitórios, que incluem banheiros, corredores, cozinhas, refeitórios e salas de serviço. Apenas salas administrativas e salas de aula tiveram cenários com condicionamentos de ar, na etapa de simulação.

Figura 18 – Planta baixa esquemática para o arquétipo local



(a)

Fonte: elaboração própria (2021).

A quantidade de ambientes de acordo com o uso foi escolhida de acordo com os valores médios observados nas análises de projeto (Quadro 4). Valores como o PAF foram ajustados para aqueles geralmente mais adotados em projetos arquitetônicos.

Quadro 4 – Valores e parâmetros adotados no arquétipo local

Parâmetros de projeto	Valores adotados
Área construída (m ²)	979,00
Área total das salas de aula (m ²)	315,52
Área total de salas administrativas (m ²)	61,04
Pé-direito(m)	2,80
Largura do corredor (m)	2,50
Número de salas de aula	9
Número de salas administrativas	3
PAF das salas de aula (%)	30
PAF de salas administrativas (%)	25

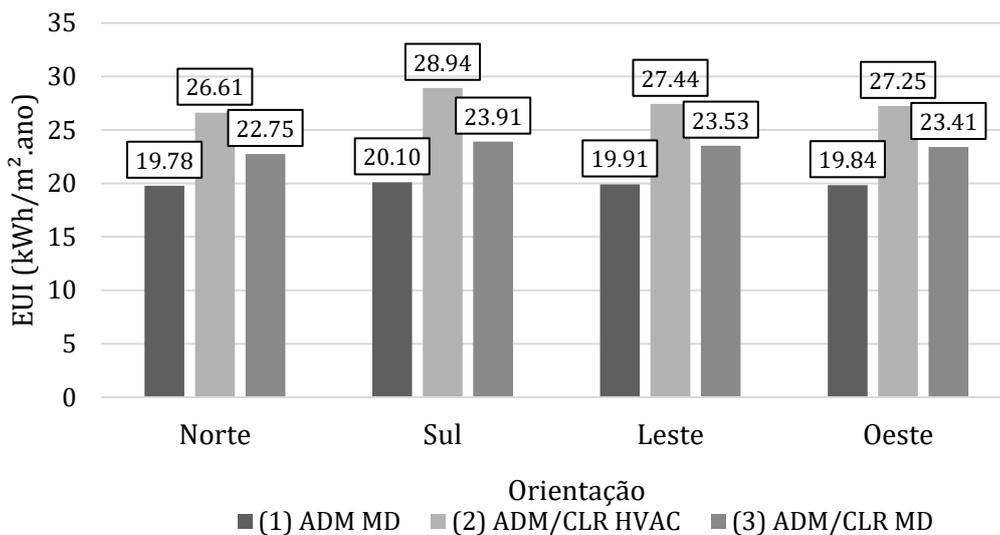
Fonte: elaboração própria (2021).

Na etapa de calibração do arquétipo, o resultado médio de consumo obtido pelas simulações nas quatro orientações foi de 19,91 kWh/m².ano, enquanto o resultado médio real da escola B04 para os anos de 2018 e 2019 foi de 18,78 kWh/m². A escola B04 foi adotada para a comparação por suas semelhanças arquitetônicas com o arquétipo, como área, organização de ambientes, número de salas de aula e salas administrativas e características construtivas. Com uma

diferença de 5,64%, o arquétipo passou a ser adotado para as demais simulações envolvendo as escolas de ensino infantil de Florianópolis.

Em seguida, foi realizado um teste de sensibilidade para avaliação do impacto da orientação da fachada principal no consumo energético do arquétipo, considerando os três cenários: o primeiro considerando o modo misto (ADM MD); o segundo, com salas de aula e salas administrativas somente condicionadas (ADM/CLR HVAC) e; o terceiro, considerando o modo misto (EMS) para salas de aula e salas administrativas (ADM/CLR MD). As características operacionais desse estudo consideraram as condições padrão relatadas na etapa do método. Conforme observado na Figura 19, a orientação não influenciou significativamente o consumo energético por área do arquétipo analisado. Por isso, não foi considerada na etapa de simulações paramétricas. A maior variação encontrada foi no segundo cenário, entre as orientações Norte e Sul, de 8,03%.

Figura 19 - Consumo energético nos três cenários descritos, nas quatro orientações



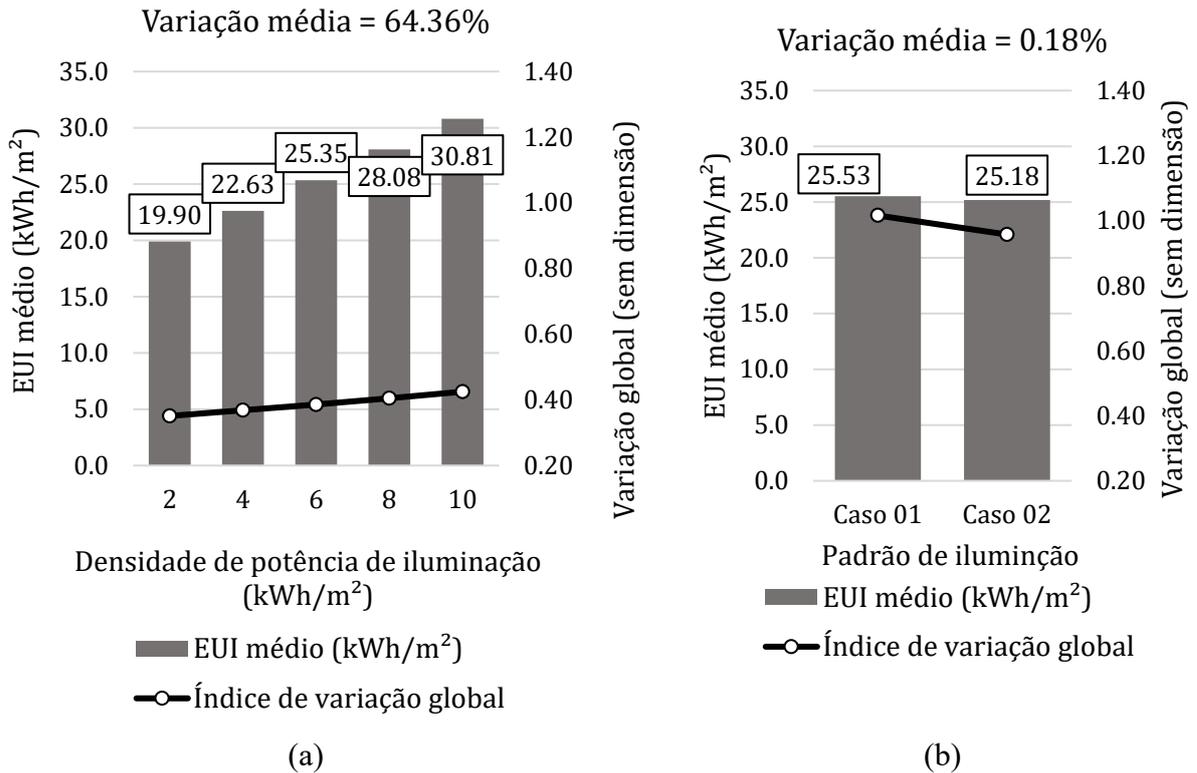
Fonte: elaboração própria (2021).

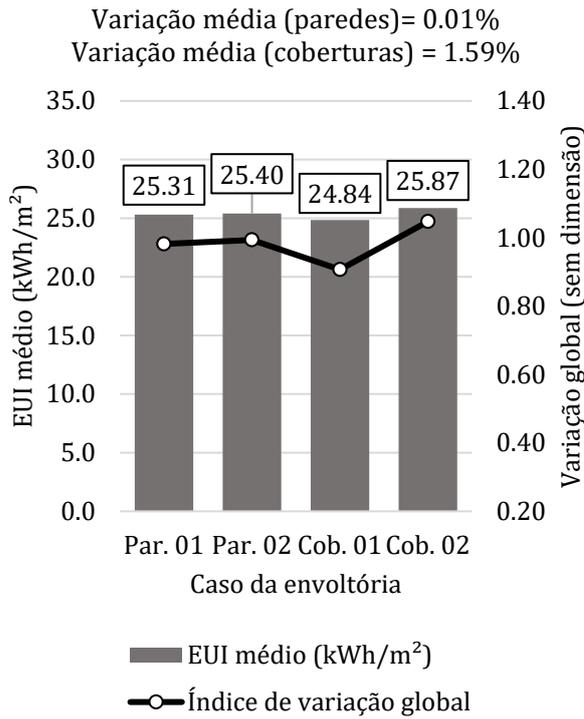
4.4 EQUAÇÃO DE *BENCHMARK* ENERGÉTICO LOCAL

Após a realização das simulações energéticas, a partir das variações explicadas na etapa do método, foram realizadas análises de sensibilidade com os resultados, para averiguar quais variáveis tinham mais influência no consumo energético das edificações públicas de ensino infantil de Florianópolis. Na Figura 20 estão representadas as análises de sensibilidade para todos os cenários descritos no Quadro 2 do capítulo método. A variação média, acima dos

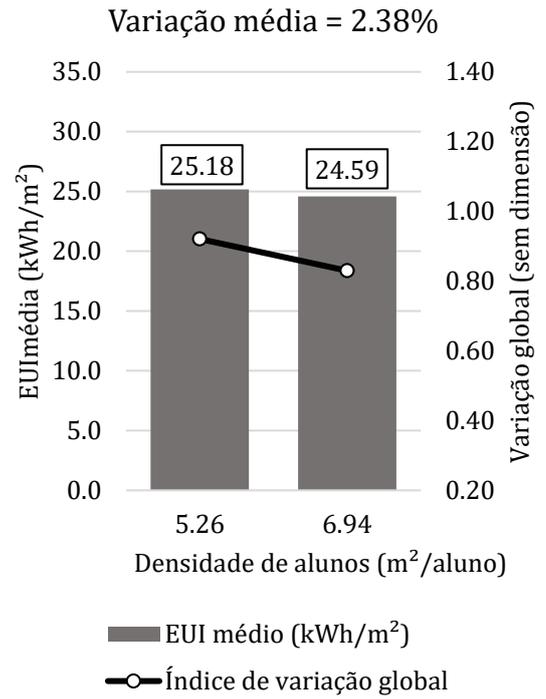
gráficos, representa a influência da variável em relação a variação total dos casos. A variação global, à direita dos gráficos, representa o impacto de cada caso para a variável.

Figura 20 – Resultados da análise de sensibilidade com as variáveis: (a) densidade de potência de iluminação; (b) padrão de iluminação; (c) envoltória; (d) densidade de pessoas; (e) carga do sistema de condicionamento de ar em salas de aula; (f) carga do sistema de condicionamento de ar em salas administrativas; (g) padrão de uso de condicionamento de ar em salas de aula

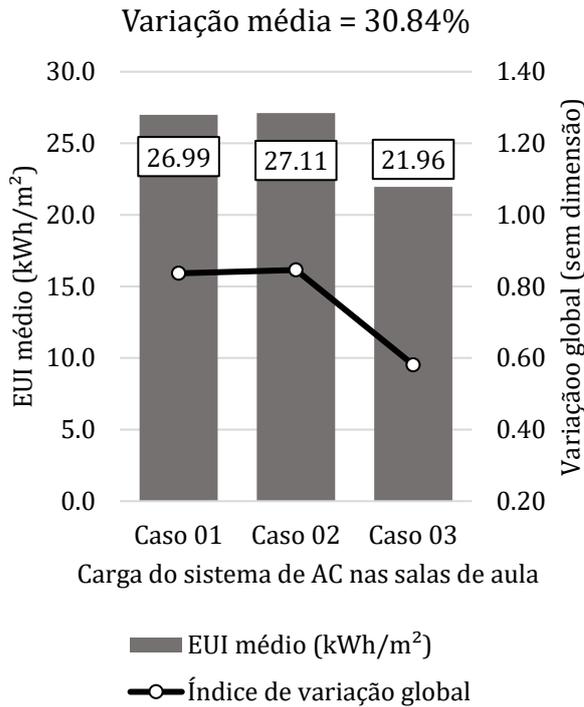




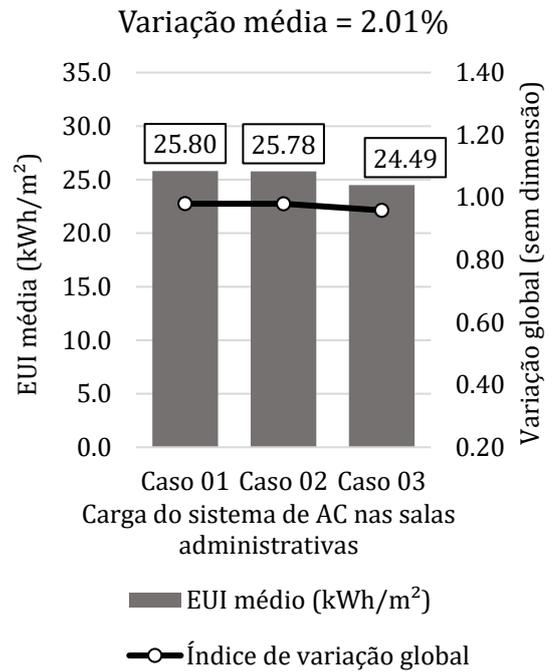
(c)



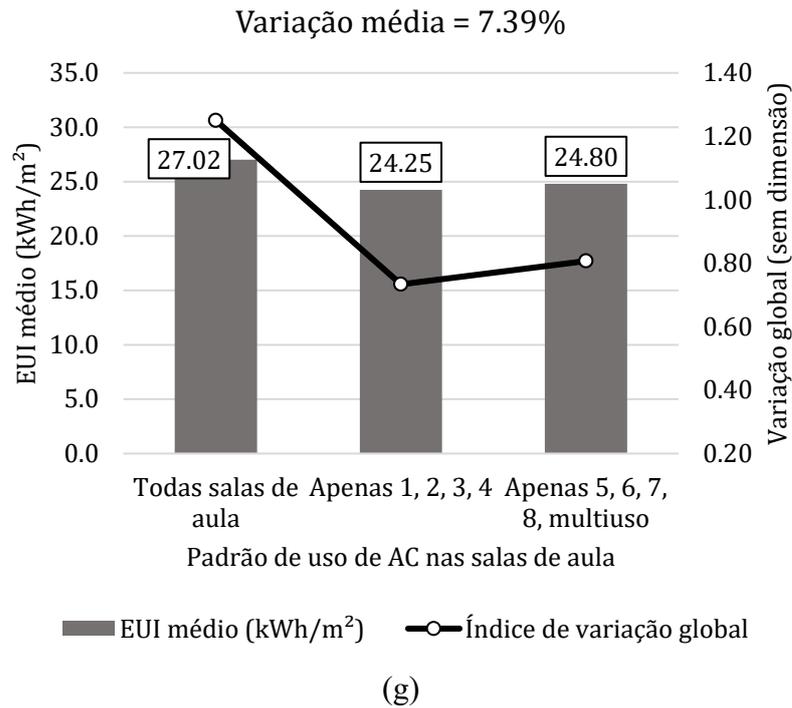
(d)



(e)



(f)



Fonte: elaboração própria (2021).

A partir dos resultados, pode-se averiguar que as variáveis que têm maior influência no EUI são a densidade de iluminação, porcentagem da carga do sistema de condicionamento de ar em salas de aula e o padrão de uso de ar condicionado em salas de aula, com valor de variação global de 65,36%; 30,84% e 7,39%, respectivamente. A densidade de potência de iluminação é uma importante fonte de consumo energético em escolas (ESCOBEDO *et al.*, 2014). O uso da iluminação natural nas escolas melhora o processo de aprendizagem e o bem-estar dos ocupantes, além de reduzir o consumo energético (MANCA *et al.*, 2020). O uso de sistemas de condicionamento em escolas brasileiras já foi abordado por Geraldi e Ghisi (2020) e por Geraldi *et al.* (2021c), este último com a participação da autora, mostrando que o assunto precisa ser mais explorado e discutido.

Pela análise de sensibilidade, a densidade de alunos nas salas de aula não foi considerada como uma variável impactante no EUI. Entretanto, foi considerada para compor a equação de *benchmark*, já que discussões recentes abordando a qualidade do ar em salas de aula (BALOCCO; LEONCINI, 2020), apontam a densidade de pessoas como uma característica importante nas escolas, influenciando na operação, no número de funcionários e, consequentemente, no consumo energético (ALSHIBANI, 2020).

Comparando com o modelo de *benchmarking* nacional, as variáveis consideradas como impactantes no consumo energético foram Graus-Hora de Resfriamento e de Aquecimento da

cidade estudada, densidade de iluminação e de pessoas e turno; e para edificações não condicionadas foram densidade de iluminação, de pessoas e turno. Os resultados foram relativamente diferentes aos analisados para o modelo local, com exceção da densidade de iluminação e de pessoas. Os Graus-Hora de Resfriamento e Aquecimento não foram analisados, por se tratar da mesma cidade; o turno também não foi levado em consideração, uma vez que todas as escolas possuem dois turnos no ensino infantil público de Florianópolis e; no caso da densidade de pessoas, mesmo sendo levada em consideração, não apresenta variação muito elevada entre as unidades de ensino para apresentar nas simulações um impacto representativo.

Depois da identificação das variáveis significantes, uma regressão múltipla usando os resultados da simulação foi realizada para estabelecer a equação do *benchmark* local. A Tabela 9 mostra os coeficientes linear e angular, os coeficientes de determinação (R^2) e o p-valor para o modelo desenvolvido. O resultado da equação de *benchmark* é o consumo energético anual por unidade de área, em kWh/m².

Tabela 9 –Variáveis para o *benchmark* local

Coeficiente angular	Coeficiente angular			Coeficiente de determinação (R^2)	p-valor
	Densidade de pessoas (m ² /pessoa)	Área condicionada (m ²)	Densidade de iluminação (W/m ²)		
14,95	-0,29	20,36	1,36	0,977	2,2 x 10 ⁻¹⁶

Fonte: elaboração própria (2021).

O coeficiente de determinação é maior que 95% e o p-valor menor que 5% (Tabela 9) indica um bom ajuste do modelo, considerando os resultados da simulação, usado para calcular a regressão. Estudos anteriores semelhantes no Brasil apresentam resultados menores para os coeficientes de determinação: 13% para agências bancárias (BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014), 61% para edifícios de escritórios (BORGSTEIN, 2014) e 73% para edificações públicas administrativas (LAMBERTS *et al.*, 2017). O modelo nacional do CBCS para escolas de ensino infantil alcançou R^2 de 94% (VELOSO *et al.*, 2021).

4.5 ANÁLISE DE DADOS

Para as 12 escolas de ensino infantil de Florianópolis, pertencentes à amostra de 57 escolas encontradas após o processo de limpeza da amostra., o valor de consumo energético típico foi obtido, de acordo com as equações de *benchmark* nacional, dada no estudo realizado pelo CBCS (VELOSO *et al.*, 2021), e local, construído pelos passos anteriores deste estudo. As edificações também receberam uma classificação, como eficientes (E), típicas (T) ou ineficientes (I), conforme item 3.5.

Dessas, oito possuíam sistema de condicionamento de ar em algum dos ambientes de permanência prolongada (salas de aula e administrativas): B01, B03, B04, B05, B08, B09, B10 e B12. As demais possuíam apenas ventiladores ou ventilação natural.

O Tabela 10 mostra o valor de consumo real das edificações analisadas, o valor de consumo típico e a classificação de desempenho energético, segundo as duas equações de *benchmark*. O valor do desvio padrão encontrado foi de 4,94 kWh/m².ano.

Tabela 10 – Classificação de desempenho para 12 escolas de ensino infantil de Florianópolis

ID da edificação	EUI real (kWh/m ²)	Condicion. artificial	Valor típico encontrado nas equações de <i>benchmark</i> local e nacional			
			nacional		nacional	
			EUI Local (kWh/m ²)	Classificação Local	EUI nacional (kWh/m ²)	Classificação nacional
B01	27,12	Sim	30,53	T	25,51	T
B02	18,38	Não	25,71	E	27,32	E
B03	27,56	Sim	31,60	T	23,90	T
B04	23,04	Sim	24,47	T	21,97	T
B05	48,83	Sim	32,62	I	25,41	I
B06	42,13	Não	20,70	I	22,64	I
B07	15,85	Não	16,95	T	19,61	T
B08	50,86	Sim	26,87	I	23,38	I
B09	30,81	Sim	35,47	T	26,53	T
B10	52,51	Sim	31,11	I	23,76	I
B11	34,18	Não	23,15	I	25,36	I
B12	41,60	Sim	30,08	I	22,44	I

Fonte: elaboração própria (2021).

Para os dois modelos de *benchmarking* analisados, nacional e local, a classificação de eficiência energética foi a mesma nas 12 edificações, sendo cinco delas classificadas como típicas (B01, B03, B04, B07 e B09), seis como ineficientes (B05, B06, B08, B10, B11 e B12) e uma como eficiente (B02). Observando os resultados, é possível notar que os valores de EUI típico do *benchmarking* nacional são mais estritos para edificações condicionadas, ou seja, com valores menores, o que também torna mais difícil alcançar a classificação “eficiente” (E). No caso das escolas não condicionadas, aconteceu o oposto: os valores de EUI típico obtidos pelo *benchmarking* nacional foram maiores.

Algumas escolas apresentaram consumo consideravelmente maior que os limites máximos para os dois modelos: B05, B06, B08, B10 e B12, indicando a necessidade de intervenções para a melhora do desempenho energético das edificações. Dessas, as escolas B08, B10 e B11

receberam auditorias energéticas e foram analisadas em mais detalhes, o que pode ajudar a entender se os modelos de *benchmarking* não fizeram algum tipo de consideração.

A escola B08 apresentou maiores consumos dos usos finais iluminação, ar condicionado e ventiladores. Nas visitas técnicas, a iluminação era mantida permanentemente acesa e os equipamentos de refrigeração, por exemplo, eram antigos e apresentaram consumo maior que a média. A escola B10 possui uma área reduzida, em relação às demais, mantendo, entretanto, um consumo energético basal para seu funcionamento, incluindo cargas de UPS, refrigeradores e ar condicionados. A edificação era imprópria para funcionamento de uma escola de educação infantil, já que possuía três andares e prejudicava a mobilidade das crianças. Já a escola B11, possui um gasto de iluminação muito elevado, provavelmente devido ao baixo aproveitamento de iluminação natural, com salas de baixo valor de PAF.

Mesmo que a classificação de desempenho energético tenha sido igual para os dois modelos em todos os casos, a diferença de EUI real e do EUI típico para os dois modelos variou significativamente. Cinco edificações apresentaram aumento no consumo energético por unidade de área em uma classificação e redução na outra (B01, B03, B04, B07 e B09). Todos esses casos tiveram como classificação o nível “típico”, com diferença de valores que chegam a 7,69 e 8,94 kWh/m².ano nas edificações B03 e B09, respectivamente. Portanto, mesmo com variação alta, a classificação pode se manter a mesma. O Tabela 11 detalha essas diferenças para cada edificação avaliada.

Tabela 11 – Diferenças entre o consumo energético real e os resultados pelos modelos de *benchmarking*

ID da edificação	Consumo energético real (kWh/m ² .ano)	Diferença entre o consumo energético real e o EUI típico para o modelo local (%)	Diferença entre o consumo energético real e o EUI típico para o modelo nacional (%)
B01	27,12	-12,59	5,93
B02	18,38	-39,86	-48,65
B03	27,56	-14,63	13,28
B04	23,04	-6,23	4,63
B05	48,83	33,20	47,96
B06	42,13	50,87	46,26
B07	18,13	6,48	-8,16
B08	50,86	47,16	54,02
B09	30,81	-15,13	13,88
B10	52,51	40,76	54,76
B11	34,18	32,25	25,80
B12	41,60	27,69	46,05

Fonte: elaboração própria (2021).

O teste ANOVA foi realizado para verificação se as diferentes equações de *benchmark* (nacional e local) impactavam significativamente no valor do EUI típico. Os resultados estão demonstrados no Tabela 12, com nível de significância de 5%.

Tabela 12 – Resumo do teste ANOVA

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Média de quadrados	F	p-valor	F max
Entre grupos	71,47	1	71,47	4,18	0,053	4,30
Dentro dos grupos	376,17	22	17,09	-	-	-
Total	447,64	23	-	-	-	-

Fonte: elaboração própria (2021).

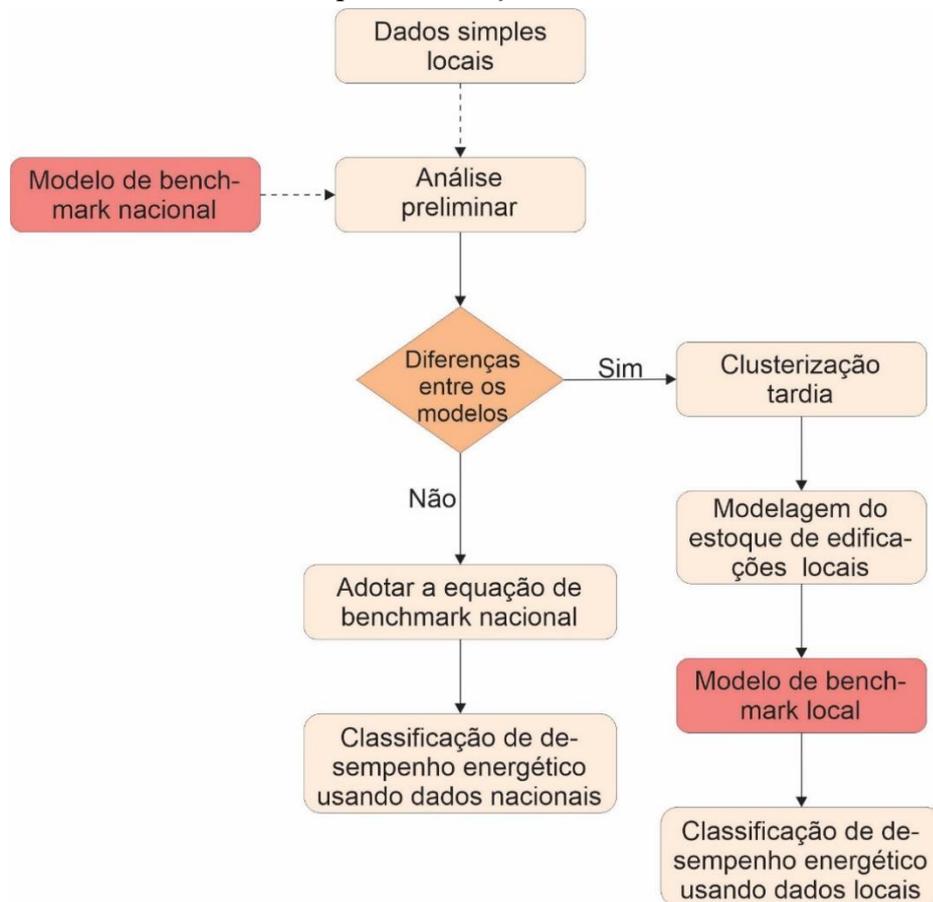
O teste ANOVA mostra um p-valor maior que 5%, o que ocasiona na consideração da hipótese H_0 . Considerando uma probabilidade de erro de 5%, não existe evidência estatística que os diferentes *benchmarks*, nacional e local, resultam em diferentes valores de EUI típico.

A partir dessas duas análises, percebe-se que as diferenças encontradas entre os modelos de *benchmarking* nacional e local não apresentam variações muito representativas nos resultados, para as edificações de ensino infantil de Florianópolis.

Quando diferenças forem encontradas, a divisão do estoque nacional em *clusters* de análise poderia ser justificada, a fim de especificar operação e ocupação nos grupos, além de características construtivas.

Entretanto, esse processo pode ser dificultado pela falta de informações, principalmente no caso de amostras muito grandes, como no caso dos *benchmarks* nacionais. Sugere-se, neste estudo, o conceito de “clusterização tardia”, feita após a análise do modelo nacional. É realizada a seleção de uma região particular, com consumo energético importante e características diferenciáveis do modelo nacional, para essa análise mais detalhada e a melhora do desempenho energético. A análise de *benchmark* nacional relata a situação geral das edificações no país e a local aprofunda essa análise, uma vez que esses problemas já foram detectados. O processo é apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Processo de decisão para construção e estudo de modelos de *benchmarking*



Fonte: elaboração própria (2021).

Para realização do processo, uma vez que o modelo de *benchmarking* nacional está disponível, o primeiro passo deve ser a comparação deste com dados simples do estoque de edificações local/regional. Algumas características que devem ser observadas no estoque de edificações local/regional para essa comparação são detalhes construtivos gerais, formato geral das edificações, consumo energético médio por unidade de área do estoque, número médio de alunos por sala de aula etc. Quando diferenças expressivas forem encontradas, o processo de clusterização tardia deve prosseguir, para a construção de um *benchmarking* específico para os dados locais/regionais. Por outro lado, quando diferenças mínimas forem encontradas o modelo de *benchmarking* nacional deve ser utilizado. Os critérios quantitativos dessas diferenças devem ser explorados em pesquisas futuras.

No caso das escolas públicas de ensino infantil de Florianópolis, mesmo que os arquétipos apresentaram diferenças representativas, a operação e as características construtivas usadas nas simulações energéticas, que deram origem às equações de *benchmark*, eram similares. Por essa razão, o modelo de *benchmarking* nacional pode ser usado para descrever os dados locais, nesse caso.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação, foi construído um *benchmarking* local das escolas públicas de ensino infantil de Florianópolis e posteriormente foi realizada sua comparação com um modelo de *benchmarking* nacional, mais abrangente e considerando dados de todo o território brasileiro para sua composição. Modelos de *benchmarking* nacionais foram propostos pelo CBCS (VELOSO *et al.*, 2021) para 15 diferentes tipologias, entre elas as escolas de ensino infantil, abordadas nesse trabalho.

A construção do modelo de *benchmarking* local para as escolas públicas de ensino infantil de Florianópolis foi realizada em cinco etapas: (1) coleta de dados por meio da avaliação das faturas de energia, análise de projetos arquitetônicos e complementares e auditorias energéticas; (2) construção do arquétipo local; (3) simulações energéticas e; (4) análises de sensibilidade e construção da equação de *benchmark* energético local. Os dois modelos, nacional e local, tiveram processo de construção e considerações gerais semelhantes, para que não houvesse impacto significativo do processo de trabalho nos resultados. Exemplos disso foram as etapas de construção, o modelo utilizado para obtenção da equação de *benchmark*, os valores de *setpoint* de condicionamento, entre outros.

Após esses procedimentos, os modelos foram comparados entre si de duas maneiras: classificação do desempenho energético por meio da escala descrita no trabalho e um teste ANOVA com os resultados fornecidos por cada equação de *benchmark* energético.

A partir das comparações realizadas entre os dois modelos de *benchmarking* e considerando a cidade de Florianópolis na análise do modelo local, concluiu-se que não existem diferenças consideráveis entre os modelos. As divergências presentes entre eles não impactaram na classificação de desempenho energético das edificações analisadas. Essa análise conecta-se diretamente com o objetivo geral da pesquisa, inicialmente proposto:

Desenvolver um modelo de benchmarking local para as edificações de ensino infantil públicas de Florianópolis.

Assim, é indicado nesse estudo a necessidade de se fornecer condições para uma análise preliminar do modelo local, comparando-o com o modelo nacional. Todas as informações relativas à construção e à análise do *benchmarking* nacional devem ser descritas em detalhe em um relatório disponível ao público, para identificação de divergências que justifiquem uma análise detalhada com um *benchmarking* local. Essa análise deve ser quali-quantitativa,

comparando características construtivas, de operação e de simulação utilizadas para obtenção do *benchmarking* nacional.

Nos casos em que o *benchmarking* local é justificado, o processo de clusterização tardia pode ser sugerido: após a realização do processo de *benchmark* nacionalmente e com a necessidade de estudo específico de uma região ou cidade, o estudo nacional pode ser replicado em menor escala para a localidade de interesse. Pode haver essa necessidade quando os métodos e características construtivas de uma região são muito particulares e destoam em relação às demais regiões do país. É importante observar que modelos de *benchmark* mais abrangentes são menos custosos e trabalhosos, sendo escolhidos como primeira opção, mas também menos detalhados. Neste caso, esse o modelo nacional não apresentou diferenças significativas em relação ao modelo local.

Quanto ao atingimento dos objetivos específicos, podemos analisar:

- *Definir um arquétipo das edificações públicas de educação infantil existentes em Florianópolis.*

A partir dos dados levantados nos projetos arquitetônicos e complementares e nas visitas realizadas nas escolas públicas de ensino infantil de Florianópolis, foi definido um arquétipo para representação dos dados médios da amostra analisada. Algumas características construtivas adotadas são específicas para escolas de ensino infantil, priorizando a segurança e a mobilidade das crianças: banheiros infantis integrados às salas de aula; edificações térreas ou com rampas de conexão entre andares; espaços de recreação internos; salas administrativas e de recepção próximas às portas de acesso/saída das escolas. Todas essas características foram levadas em conta para a determinação do arquétipo final, usado nas demais etapas.

- Investigar a sensibilidade das variáveis analisadas nas simulações energéticas, quanto à classificação do desempenho das edificações públicas de ensino infantil em Florianópolis.

Para conclusão do processo de *benchmark* local, foi realizada uma análise de sensibilidade das variáveis investigadas nas simulações energéticas. As variáveis escolhidas para compor posteriormente a equação de *benchmark* foram aquelas que apresentaram maior influência na variação do consumo energético por unidade área: densidade de iluminação, carga do sistema de condicionamento de ar em salas de aula e o padrão de uso de ar condicionado em salas de aula, com valor de variação global de 65,36%; 30,84% e 7,39%, respectivamente. A densidade de alunos também foi utilizada na composição da equação de *benchmark*, pela sua relevância na operação das escolas, apontada em pesquisas recentes.

- Elaborar uma equação de benchmark local para as edificações públicas de ensino infantil em Florianópolis;

Tendo selecionado as variáveis de maior impacto no consumo energético das escolas públicas de ensino infantil de Florianópolis, pode-se elaborar a equação de *benchmark* energético local. A equação foi elaborada por uma regressão multivariada, mesmo procedimento feito para o modelo nacional. A equação obteve um coeficiente de determinação (R^2) de 97,67% e p-valor $2,2 \times 10^{-16}$, mostrando bom ajuste ao modelo simulado.

- Classificar e comparar o desempenho energético de uma amostra das edificações públicas de ensino infantil existentes em Florianópolis segundo os modelos de benchmarking nacional e local estabelecidos.

Após a construção da equação de *benchmark*, 12 edificações públicas de ensino infantil de Florianópolis foram selecionadas para o estudo nos dois modelos. Foram obtidos os valores de consumo típico energético por unidade de área para cada uma delas, nas duas equações. Quando o valor real de consumo energético por unidade de área fosse maior que o típico mais o desvio padrão do EUI encontrado em simulação, a edificação era classificada como ineficiente; caso fosse menor que o EUI típico menos o desvio padrão, era classificada como eficiente; se ficasse nesse intervalo, era classificada como típica. Das 12 edificações analisadas, cinco foram classificadas como típicas, seis como ineficientes e uma como eficiente, pelos modelos nacional e local. O teste ANOVA não apontou evidências estatísticas que os modelos de *benchmark* resultavam em valores significativamente diferentes, a ponto de influenciar na classificação do desempenho energético das edificações.

Cada cidade ou região deve ser analisada individualmente, já que o estoque de edificações, dentro de um mesmo país, pode variar de maneira significativa. Modelos de *benchmarking* nacional devem ser adequadamente detalhados, para facilitar a identificação de divergências com o local analisado. É importante que sejam criadas condições para uma análise preliminar da amostra disponível, que possa identificar diferenças representativas com o modelo nacional. As considerações feitas nas simulações, as características do estoque considerados nas análises, os locais em que foram coletadas as informações e detalhes do arquétipo utilizado nas simulações devem ser descritos em relatórios e disponíveis para pesquisadores, investidores e gestores públicos.

A partir das análises relatadas, pode-se concluir que não existiram diferenças significativas na classificação do desempenho energético das edificações públicas de ensino infantil de

Florianópolis, quando classificadas pelo *benchmark* nacional ou local. Assim, a pergunta de pesquisa do trabalho foi respondida com êxito. Para ampliar a discussão, sugerem-se algumas pesquisas futuras, como:

- Utilização do arquétipo proposto para previsão dos impactos de equipamentos, como o ar-condicionado, e demais análises nas escolas públicas de ensino infantil de Florianópolis;
- Expansão da amostra analisada na etapa de comparação das escalas;
- Aplicação da metodologia em outras cidades brasileiras;
- Aplicação da metodologia para outras tipologias;
- Definição quantitativa das diferenças entre modelos de benchmarking nacional e dados simples do estoque de edificações local ou regional;
- Ampliação da análise de pesquisa para avaliação dos sistemas de geração energética na criação de modelos de *benchmarking* energéticos.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO 50001: Sistemas de gestão da energia - Requisitos com orientações para uso**. Rio de Janeiro, p. 34. 2018.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, p. 36. 2005.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos Gerais**. Rio de Janeiro, p. 52. 2021.
- ALI, U.; SHAMSI, M. H.; HOARE, C.; MANGINA, E.; O'DONNELL, J. A data-driven approach for multi-scale building archetypes development. **Energy and Buildings**, v. 202, 2019. Elsevier.
- ALSHIBANI, A. Prediction of the energy consumption of school buildings. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 17, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10175885>
- ASCIONE, F.; BIANCO, N.; MASI, R. F.; MAURO, G. M.; VANOLI, G. P. Energy retrofit of educational buildings: Transient energy simulations, model calibration and multi-objective optimization towards nearly zero-energy performance. **Energy and Buildings**, v. 144, p. 303–319, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.056>
- ASHRAE, ASHRAE Guideline 14: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 2014.
- ATTIA, S.; SHADMANFAR, N.; RICCI, F. Developing two benchmark models for nearly zero energy schools. **Applied Energy**, v. 263, n. November 2019, p. 114614, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114614>
- BAECHLER, M.; STRECKER, C.; SHAFE, J. **PNNL: A Guide to Energy Audits**. Energy, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.2172/1034990>.
- BALLARINI, I.; CORGNATI, S. P.; CORRADO, V. Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project. **Energy Policy**, v. 68, p. 273–284, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.027>
- BALOCCO, C.; LEONCINI, L. Energy cost for effective ventilation and air quality for healthy buildings: Plant proposals for a historic building school reopening in the COVID-19 era. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 20, p. 1–16, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12208737>

- BANNISTER, Paul; HINGE, Adam. Empirical Benchmarking of Building Performance. **ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings**, p. 15–26, 2006.
- BARATTO, Romullo. **Creche Hassis ArchDaily**, 2019. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/927009/creche-em-florianopolis-e-a-primeira-do-mundo-com-selo-maximo-de-arquitetura-sustentavel>. Acesso em: 26 Apr. 2020.
- BENEJAM, G. M.; MATA, E.; KALAGASIDIS, A. S.; JOHNSON, F. Bottom-up characterization of the Spanish building stock for energy assessment and model validation. **Methodology**, 2010.
- BORGSTEIN, E. H. **Relatório Final: Benchmarking de escritórios corporativos e recomendações para certificação DEO no Brasil - atividades 3 e 5**, 2014.
- BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L.M. Evaluating energy performance in non-domestic buildings: A review. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 734–755, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.018>
- BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L.M. Mapping failures in energy and environmental performance of buildings. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 476–485, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.038>
- BORGSTEIN, E.; LAMBERTS, R. **Comunicação Técnica: desenvolvimento de benchmarks nacionais de consumo energético de edificações em operação**, 2014. Disponível em: <http://www.cbcs.org.br/website/comunicacao-tecnica/show.asp?ppsCode=F7DB9C2C-E746-423C-8759-3922567EE4A5>.
- BORGSTEIN, Edward H.; LAMBERTS, Roberto. Developing energy consumption benchmarks for buildings: Bank branches in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 82–91, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.028>
- BOS, M. S.; SCHWARTZ, L.; LICHERI, M. **Escuelas del Siglo XXI en America y el Caribe**, 2018.
- British Petroleum Company. **Energy Outlook - 2040 Brazil Fact Sheet**, 2019. Disponível em: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/country-and-local-insights/brazil-insights.html>.
- BRASIL. **Apresentação da Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil perante o Acordo de Paris**. Disponível em: https://www.gov.br/mre/pt-br/canais_atendimento/imprensa/notas-a-imprensa/2020/apresentacao-da-contribuicao-nacionalmente-determinada-do-brasil-perante-o-acordo-de-paris. Acesso em: 19 jul. 2021a.

- BRASIL. Portaria n° 42, de 24 de fevereiro de 2021. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C)**, Brasil: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - Inmetro, 2021b.
- CALLEJA RODRÍGUEZ, G.; ANDRÉS, A. C.; MUÑOZ, F. D.; LÓPEZ, J. M. C.; ZHANG, Y. Uncertainties and sensitivity analysis in building energy simulation using macroparameters. **Energy and Buildings**, v. 67, p. 79–87, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.009>
- CBCS. **Desempenho Energético Operacional em Edificações**, 2014. Disponível em: <http://www.cbcs.org.br/website/benchmarking-energia/show.asp?ppgCode=0EB1EB03-DD95-D58C-7C89-2DCB107D5769>. Acesso em: 26 Apr. 2020.
- CBCS. **FLORIANÓPOLIS – Cidades Eficientes**, 2019. Disponível em: http://cidadeseeficientes.cbcs.org.br/?page_id=900. Acesso em: 26 Apr. 2020.
- CBCS. **Plataforma de Gestão de Energia e Água**. 2020. Disponível em: <https://cidadeseeficientes.shinyapps.io/florianopolis/>. Acesso em: 19 jul. 2021.
- CBCS. **Projeto Cidades Eficientes: Capacitação de Gestores Públicos - Florianópolis/SC**. Florianópolis: 2018. Disponível em: http://cidadeseeficientes.cbcs.org.br/wp-content/uploads/pdf/Analise-dados-edificios_FLP.pdf.
- CELESC. **Projetos de Eficiência Energética da Celesc beneficiam sete prefeituras e duas APAES em SC, 2019**. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/listagem-noticias/projetos-de-eficiencia-energetica-da-celesc-beneficia-sete-prefeituras-e-duas-apaes-em-sc>. Acesso em: 26 Apr. 2020.
- CEN. **Energy performance of buildings: Overall energy use, CO2 emissions and definition of energy ratings**. European Standard, 2008.
- CHONTANAWAT, J.; HUNT, L. C.; PIERSE, R. Does energy consumption cause economic growth? Evidence from a systematic study of over 100 countries. **Journal of Policy Modeling**, v. 30, n. 2, p. 209–220, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpolmod.2006.10.003>
- CHUNG, W. Review of building energy-use performance benchmarking methodologies. **Applied Energy**, v. 88, n. 5, p. 1470–1479, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.022>
- 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>

- CORGNATI, S. P.; FABRIZIO, E.; FILIPPI, M.; MONETTI, V. Reference buildings for cost optimal analysis: Method of definition and application. **Applied Energy**, v. 102, p. 983–993, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.001>
- D'AGOSTINO, D.; DARAIO, L. MARINO, C.; MINICHIELLO, F. Cost-optimal methodology and passive strategies for building energy efficiency: a case-study. **Architectural Science Review**, v. 61, n. 6, p. 400–409, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00038628.2018.1491826>
- DESHKO, V. I.; SHEVCHENKO, O. M. University campuses energy performance estimation in Ukraine based on measurable approach. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 582–590, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.070>
- DIAS PEREIRA, L.; RAIMONDO, D.; CORGNATI, S. P.; SILVA, M. G. Energy consumption in schools - A review paper. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Elsevier Ltd, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.010>
- DIXON, R. K.; MCGOWAN, E.; ONYSKO, G.; SCHEER, R. M. US energy conservation and efficiency policies: challenges and opportunities. **Energy Policy**, v. 38, n. 11, p. 6398-6408, nov. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.01.038>.
- DJURIC, N.; NOVAKOVIC, V. Review of possibilities and necessities for building lifetime commissioning. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 2, p. 486–492, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.11.007>
- DORNELLES, Kellen A. **Absortância solar de superfícies opacas: Métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. 2008. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, SP.
- DORNELLES, K. A. **Biblioteca de absortância de telhas: base de dados para análise de desempenho termoenergético de edifícios**. São Paulo: IAU SP, 2021. 61 p.
- EIA. **US Energy Information Administration International Energy Outlook**, 2020. Disponível em: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2020 Buildings.pdf>.
- ENERGY STAR. **Data Trends Benchmarking and Energy Savings**, 2012. Disponível em: www.energystar.gov/.
- EPE. **Balanço Energético Nacional 2020 - ano base 2019**. Brasília: 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em: 10 Jun. 2021.
- EPE. **Projeto de Assistência Técnica dos Setores de Energia e Mineral – Projeto META**, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/projeto-de-assistencia-tecnica-dos-setores-de-energia-e-mineral-projeto-meta>. Acesso em: 6 Jun. 2021.

EPE. **Projeto de Assistência Técnica dos Setores de Energia e Mineral - Projeto META**. 2017. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/projeto-de-assistencia-tecnica-dos-setores-de-energia-e-mineral-projeto-meta>. Acesso em: 19 jul. 2021.

ESCOBEDO, A.; VILORIA, S. B.; JUÁREZ, H.; CASTILLO, D. Energy consumption and GHG emission scenarios of a university campus in Mexico. **Energy for Sustainable Development**, v. 18, n. 1, p. 49–57, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.10.005>

EUROPEAN BUILDING AUTOMATION CONTROLS ASSOCIATION. EPBD 2021 Revision - Initial EU.BAC Suggestions, 2021.

EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. **DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010**. Official Journal of the European Union, 2010.

EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. **Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012**, 2012.

FENG, W.; ZHANG, Q.; JI, H.; WANG, R.; ZHOU, N.; YE, Q.; HAO, B.; LI, Y.; LUO, D.; LAU, S. S. Y. A review of net zero energy buildings in hot and humid climates: Experience learned from 34 case study buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 114, n. August, p. 109303, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109303>

FILOGAMO, L.; PERI, G.; RIZZO, G.; GIACCONE, A. On the classification of large residential buildings stocks by sample typologies for energy planning purposes. **Applied Energy**, v. 135, p. 825–835, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.002>

GAGLIA, A.; BALARAS, C. A.; MIRASGEDIS, S.; GEORGOPOULOU, E.; SARAFIDIS, Y.; LALAS, D. P. Empirical assessment of the Hellenic non-residential building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings. **Energy Conversion and Management**, v. 48, n. 4, p. 1160–1175, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.10.008>

GAITANI, N.; LEHMANN, C.; SANTAMURIS, M.; MIHALAKAKOU, G.; PATARGIAS, P. Using principal component and cluster analysis in the heating evaluation of the school building sector. **Applied Energy**, v. 87, n. 6, p. 2079–2086, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.12.007>

GBC. **Programa levará energia solar e eficiência energética para 180 escolas municipais no Estado do Paraná**, 2019. Disponível em: <https://www.gbcbrasil.org.br/programa-levara-energia-solar-e-eficiencia-energetica-para-180-escolas-municipais-no-estado-do-parana/>.

Acesso em: 6 Jul. 2020.

GERALDI, M. S.; GHISI, E. Mapping the energy usage in Brazilian public schools. **Energy and Buildings**, v. 224, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110209>

GERALDI, M. S.; BAVARESCO, M. V.; TRIANA, M. A.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Addressing the impact of COVID-19 lockdown on energy use in municipal buildings: A case study in Florianópolis, Brazil. **Sustainable Cities and Society**, v. 69, 2021a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102823>

GERALDI, M. S.; GNECCO, V. M.; BARZAN NETO, A.; MARTINS, B. A. M.; GHISI, E.; FOSSATI, M.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Evaluating the impact of the shape of school reference buildings on bottom-up energy benchmarking. **Journal of Building Engineering**, v. 43, p. 103142, nov. 2021b. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2021.103142>.

GERALDI, M. S.; BAVARESCO, M. V.; GNECCO, V. M.; GHISI, E.; FOSSATI, M. Impact of implementing air-conditioning systems on the school building stock in Brazil considering climate change effects: a bottom-up benchmarking. *In: Building Simulation, 2021, Bruges. Proceedings...* Bruges: IBPSA, 2021c.

GUAN, J.; NORD, N.; CHEN, S. Energy planning of university campus building complex: Energy usage and coincidental analysis of individual buildings with a case study. **Energy and Buildings**, v. 124, p. 99–111, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.051>

HERNANDEZ, P.; BURKE, K.; LEWIS, J. O. Development of energy performance benchmarks and building energy ratings for non-domestic buildings: An example for Irish primary schools. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 3, p. 249–254, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.020>

HONG, S. M.; PATERSON, G.; MUMOVIC, D.; STEADMAN, P. Improved benchmarking comparability for energy consumption in schools. **Building Research and Information**, v. 42, n. 1, p. 47–61, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09613218.2013.814746>

IEA. **Total Energy Use in Buildings Analysis and Evaluation Methods International Energy Agency Programme on Energy in Buildings and Communities**, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmj.e6533>.

INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. p. 96, 2010. Disponível em: <

http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/Port372-2010_RTQ_Def_Edificacoes-C_rev01.pdf>

INMETRO. **Proposta de método para a avaliação da eficiência energética com base em energia primária de edificações comerciais, de serviços e públicas**. p. 151, 2017. Disponível em: <http://www.cb3e.ufsc.br/etiquetagem/desenvolvimento/atividades-2012-2016/trabalho-1/pesquisas>

INMETRO Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, de Serviços e Públicas**, p. 159, 2021. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/INIC_Dez_2020.pdf>

IPMVP. **International Performance Measurement & Verification Protocol Concepts and Options for Determining Energy Savings in New Construction - Volume III**, 2003. Disponível em: www.ipmvp.org

ISO. **ISO 52003-1: Energy performance of buildings-Indicators, requirements, ratings and certificates** Switzerland: International Organization for Standardization, 2017.

KELSEY, J.; PEARSON, D. **Procedures for commercial building energy audits**. ASHRAE, 2011.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; DELIBERADOR, M. S. Understanding school design processes. **Journal of Design Research**, v. 12, n. 4, p. 280–307, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1504/JDR.2014.065844>

LACERDA, D. J. M.; CONCEIÇÃO, G. A.; YONAMINE, M. **Manutenção em escolas públicas**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Curso de Engenharia Civil, Universidade de Santa Cecília. Santos, p. 70, 2016.

LAMBERTS, R. *et al.* Relatório técnico de desenvolvimento de benchmarks: Edifícios Públicos Administrativos, 2017.

LAMBERTS, R.; CLETO, L. T. **The Future of Cooling: Seminário Programa Brasileiro de Etiquetagem em Eficiência Energética para Sistemas de Refrigeração e Ar-condicionado**, 2019. Disponível em: <http://abrava.com.br/wp-content/uploads/2018/08/Seminario-PBE-RAC-03-PBE-EDIFICA-Lamberts-e-Tomaz_compressed-1.pdf>

LARA, R. A.; PERNIGOTTO, G.; CAPPELLETTI, F.; ROMAGNONI, P.; GASPARELLA, A. Energy audit of schools by means of cluster analysis. **Energy and Buildings**, v. 95, p. 160–171, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.036>

- LI, Z.; HAN, Y.; XU, P. Methods for benchmarking building energy consumption against its past or intended performance: An overview. **Applied Energy**, v. 124, p. 325–334, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.020>
- LODI, C.; MALAGUTI, V.; CONTINI, F.; SALA, L.; MUSCIO, A.; TARTARINI, P. University energy planning for reducing energy consumption and GHG emissions: The case study of a university campus in Italy. **International Journal of Heat and Technology**, v. 35, n. Special Issue 1, p. S27–S32, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.18280/ijht.35Sp0104>
- LOGA, T.; STEIN, B.; DIEFENBACH, N. TABULA building typologies in 20 European countries—Making energy-related features of residential building stocks comparable. **Energy and Buildings**, v. 132, p. 4–12, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.094>
- MANCA, S.; CERINA, V.; TOBIA, V.; SACCHI, S.; FORNARA, F. The effect of school design on users’ responses: A systematic review (2008-2017). **MDPI AG**, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/SU12083453>
- MATA, É.; SASIC KALAGASIDIS, A.; JOHNSON, F. Building-stock aggregation through archetype buildings: France, Germany, Spain and the UK. **Building and Environment**, v. 81, p. 270–282, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.013>
- MEC. **Parâmetros Básicos de Infra-estrutura para Instituições de Educação Infantil**. Brasília: Secretaria de Educação Básica, 2006.
- MYLONAS, G.; AMAXILATIS, D.; TSAMPAS, S.; POCERO, L.; GUNNERIUSSON, J. A Methodology for Saving Energy in Educational Buildings Using an IoT Infrastructure. 10th International Conference on Information, Intelligence, **Systems and Applications**, IISA 2019, n. Iisa, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IISA.2019.8900707>
- P. A. BARBETTA. **Estatística aplicada às Ciências Sociais**. 9ed., 2019.
- PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; GONZÁLEZ, R.; MAESTRE, I. R. A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 3, p. 272–278, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.10.004>
- PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS. **Portaria No 345/2018 estabelece as diretrizes para matrícula, inscrição, matrícula, transferência e permuta das crianças na educação infantil da rede Municipal de ensino de Florianópolis**. Florianópolis, 2018.
- PROCEL INFO. **Light amplia prazo para participação na 1a Chamada para Projetos de Eficiência Energética em Escolas**, 2020. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?ViewID=%7BF5EAADD6-CCB0-4E29-A0C4->

482D3D66BB65%7D¶ms=itemID=%7BF22C4907-28B8-44EB-B727-745464985B6D%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D. Acesso em: 26 Apr. 2020.

PROCEL. **CBCS busca parceiros para desenvolvimento de benchmarks de edifícios em operação**, 2020. Disponível em: <http://www.procel.gov.br/main.asp?View=%7B8D1AC2E8-F790-4B7E-8DDD-CAF4CDD2BC34%7D&Team=¶ms=itemID=%7B75062A6F-ACDD-41BA-9E7A-77D45A8E1F1F%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>.

RACKES, A.; FONSECA, R. W.; BECK, E.; SCALCO, V. A. Avaliação Do Potencial De Conforto Térmico Em Escolas Naturalmente Ventiladas. **XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído**, n. 1, p. 1–10, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/283053916>

REDDY, T. A.; MAOR, I.; PANJAPORNPON, C. 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, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10789669.2007.10390952>

SALTELLI, A.; RATTO, M.; ANDRES, T.; CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; GATELLI, D.; SAISANA, M.; TARANTOLA, S. **Global Sensitivity Analysis: The Primer**, 2008. ISSN 03067734.v. 76 Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1751-5823.2008.00062_17.x

SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CAMPOLONGO, F.; RATTO, M. **Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models**, 2004. E-book.

SCHAEFER, A.; GHISI, E. Method for obtaining reference buildings. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 660–672, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.001>

SENEL SOLMAZ, A.; HALICIOGLU, F. H.; GUNHAN, S. An approach for making optimal decisions in building energy efficiency retrofit projects. **Indoor and Built Environment**, v. 27, n. 3, p. 348–368, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1420326X16674764>

SILVA, A. S.; GHISI, E. Uncertainty analysis of the computer model in building performance simulation. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 258–269, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.070>

SILVA, P. P. F.; HERNANDEZ NETO, A.; SAUER, I. L. Evaluation of Model Calibration Method for Simulation Performance of a Public Hospital in Brazil. **Energies**, v. 14, n. 13, p. 3791, 24 jun. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en14133791>.

- STANKOVIC, D. Improvement of Energy Efficiency of Schools and Kindergartens. **MATEC Web of Conferences**, v. 53, p. 1–6, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20165301018>
- STEIN, B.; DASCALAKI, E.; POPIOLEK, M.; KWIATKOWSKI, J.; AMTMANN, M.; GEORGIEV, Z. **Typology approaches for non-residential buildings in five European countries existing information, concepts and outlook**, 2021.
- THUMANN, A.; NIEHUS, T.; YOUNGER, W. J. **Handbook of Energy Audits**, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4324/9780203912584>
- TOMMERUP, H.; SVENDSEN, S. Energy savings in Danish residential building stock. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 6, p. 618–626, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.08.017>
- TORCELLINI, P.; DERU, M.; GRIFFITH, B.; BENNE, K.; HALVERSON, M.; WINIARSKI, D.; CRAWLWY, D. B. **DOE Commercial Building Benchmark Models Preprint**. Contract, n. Eia 2005, p. 12, 2008. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/43291.pdf>
- U.S. CONGRESS. **Energy independence and security act**. Public Law, 2007. Disponível em: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:ENERGY+INDEPENDENCE+AND+SECURITY+ACT+OF+2007+An+Act#0>.
- VAISI, S.; PILLA, F.; MCCORMACK, S. J. Recommending a thermal energy benchmark based on CIBSE TM46 for typical college buildings and creating monthly energy models. **Energy and Buildings**, v. 176, p. 296–309, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.041>
- VEIGA, R. K., OLINGER, M. S., MELO, A. P., LAMBERTS, R. **Modelagem da ventilação natural com a aplicação do objeto energy management system do programa EnergyPlus**, 2019, João Pessoa, Anais... ANTAC, 2019.
- VELOSO, A. C. O. **Avaliação do Consumo de Energia Elétrica de Edificações de Escritório e sua Correlação com as Decisões de Projeto**. 2017. Tese (Doutorado) Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2017.
- VELOSO, A. C.; DEGANI, C.; MELO, A. P.; AMARAL, D.; LETTI, A.; KANASHIRO, E.; CURSINO, A.; LAMBERTS, R.; SUIZU, C.; MOURA, K. **Relatório interno: Convênio de cooperação técnico-financeira entre a Eletrobrás e o CBCS, destinado ao desenvolvimento de benchmarks energéticos no âmbito do PROCEL: Relatório elaborado pelos colaboradores do CBCS**, 2021.
- VERSAGE, R. S. **Metamodelo para estimar a carga térmica de edificações condicionadas artificialmente**. 191 p. f. 2015, 2015.

ZANGHERI, .; CASTELLAZZI, L.; D'AGOSTINO, D.; ECONOMIDOU, M.; RUGGIERI, G.; TSEMEKIDI-TZEIRANAKI, S.; MADUTA, C.; BERTOLDI, P. **Progresso of the Member States in implementing the Energy Performance of Building Directive**. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021.

ZHOU, X.; YAN, J.; ZHHU, J.; CAI, P. Survey of energy consumption and energy conservation measures for colleges and universities in Guangdong province. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 112–118, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.055>