



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

Fernanda Selistre da Silva Scheidt

**Aplicação da análise dimensional para estimativa do consumo de energia em
edifícios de escritórios representativos de estoque edificado**

Florianópolis

2024

Fernanda Selistre da Silva Scheidt

Aplicação da análise dimensional para estimativa do consumo de energia em edifícios de escritórios representativos de estoque edificado

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.
Coorientador: Prof. Hazim Ali Al-Qureshi, Phd.

Florianópolis

2024

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

Scheidt, Fernanda Selistre da Silva

Aplicação da análise dimensional para estimativa do
consumo de energia em edifícios de escritórios
representativos de estoque edificado / Fernanda Selistre
da Silva Scheidt ; orientador, Fernando Simon Westphal,
coorientador, Hazim Ali Al-Qureshi, 2024.

165 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Consumo de energia de
edifícios . 3. Edifício referência. 4. Análise de cluster.
5. Análise dimensional. I. Westphal, Fernando Simon. II.
Al-Qureshi, Hazim Ali . III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e
Urbanismo. IV. Título.

Fernanda Selistre da Silva Scheidt

Aplicação da análise dimensional para estimativa do consumo de energia em edifícios de escritórios representativos de estoque edificado

O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado, em [dia] de novembro de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Alberto Hernandez Neto
Universidade de São Paulo – USP

Prof. Aldomar Pedrini, Dr.
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Prof. Martin Ordenes Mizgier, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

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



Documento assinado digitalmente
Maira Longhinotti Felipe
Data: 14/02/2024 14:54:52-0300
CPF: ***.406.999-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof^a. Máira Longhinotti Felipe
Coordenação do Programa de Pós-Graduação



Documento assinado digitalmente
Fernando Simon Westphal
Data: 14/02/2024 10:42:31-0300
CPF: ***.834.649-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2024.

*Dedico este trabalho à minha mãe,
exemplo de superação em todos os
sentidos.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Fernando Simon Westphal por aceitar o desafio da orientação, pela paciência e parceria, pelo conhecimento repassado, pela ajuda na manipulação do *Energyplus* e pelas múltiplas revisões de textos e artigos ao longo da jornada.

Ao meu coorientador, Prof. Hazim Ali Al-Qureshi, pelo apoio constante e por proporcionar a valiosa convivência com seus orientandos.

Aos membros da banca de qualificação pelas críticas e sugestões apontadas que refletiram no aperfeiçoamento do trabalho.

À empresa Buildings pela cessão do banco de dados de edifícios comerciais de Florianópolis para desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus pais, que me ensinaram a ser valente diante dos desafios e resiliente diante dos fracassos. Aos meus irmãos por estarem sempre ao meu lado. Ao meu marido pelo auxílio na busca de equilíbrio entre o acadêmico, profissional e pessoal. Aos meus filhos pela compreensão frente aos momentos de ausência e estresse, inevitáveis diante da pressão dos prazos e resultados.

Aos professores Edson Roberto de Pieri e Sérgio Peters pela amizade, pela empatia e por sempre estarem dispostos a ajudar. À equipe da Direção do Centro Tecnológico da UFSC, pelo incentivo e parceria. Aos membros da Coordenadoria de Infraestrutura, Manutenção e Espaço Físico (CIMEF), Marcelo Bittencourt e Robson de Carvalho, por acumularem minhas atribuições durante o período de afastamento.

Ao Vinícius Pinheiro, pela amizade e pela ajuda nos momentos difíceis. À colega Mônica Pinto pelas importantes trocas, avisos de prazos e parceria durante o desenvolvimento da pesquisa. Aos amigos Renan Belli Berman e Henrique Tajiri, pelas lições de análise dimensional e pelo auxílio na revisão de cálculos.

À Mariany Cristine Souza e Adriana Cardoso Vieira, pelo auxílio com a parte burocrática da vida acadêmica.

À UFSC, pela oportunidade de aperfeiçoamento pessoal e profissional.

RESUMO

A formulação de políticas e esquemas de incentivo para redução do consumo de energia nos edifícios demandam conhecimento das características dos estoques edificados para entender como o seu desempenho energético pode ser melhorado. Esta pesquisa teve como objetivo desenvolver um método simplificado para estimativa do consumo de energia em edifícios, que facilite a comparação de edifícios reais com edifícios representativos de uma categoria do estoque de construção existente. Uma amostra de 197 edifícios de escritórios da cidade de Florianópolis foi estudada, adotando a abordagem *K-means* como metodologia de classificação de 187 edifícios quanto à sua forma e dimensões e 179 edifícios quanto ao percentual de abertura das fachadas. Para o sistema de condicionamento de ar instalado, a análise baseou-se na frequência de ocorrência. Como resultado da análise é possível afirmar que os edifícios de escritório de Florianópolis podem ser representados por plantas de duas formas, em quatro tamanhos distintos: (a) quadrado pequeno, medindo 16 m x 15 m (considera tolerância para a diferença entre as duas medidas) e (b) quadrado grande, medindo 23 m x 23 m; (c) retângulo pequeno, medindo 15 m x 24 m e; (d) retângulo grande, medindo 15 m x 34 m. Os edifícios da categoria utilizam majoritariamente sistemas de condicionamento individual providos por aparelhos de janela ou split. O edifício de escritórios típico de Florianópolis possui 33% de área envidraçada na fachada norte, 30% na fachada sul, e 24% nas fachadas leste e oeste. Os edifícios representativos foram submetidos à simulação do consumo de energia por meio do software *Energyplus*. A análise dimensional foi aplicada para obtenção de uma equação para estimativa do consumo de energia do edifício, considerando parâmetros básicos comuns à rotina de trabalho de arquitetos e projetistas, como área, tempo de utilização do edifício, densidade de ocupação, gabarito e percentual de área de fachada, área envidraçada e área do pavimento tipo. Os resultados da simulação termoenergética possibilitaram a validação da equação proposta. A equação forneceu uma estimativa do consumo total de energia de um edifício com diferença menor de 10% em relação ao consumo de energia obtido por meio de simulação computacional, independente da forma, tamanho, gabarito e tempo de uso do edifício, quando mantidas as demais condições de referência. Testes mostraram que a equação é passível de generalização mediante estudo de modelos dotados com outras características de envoltória e submetidos a outros climas. Assim, a análise dimensional se mostra uma ferramenta poderosa para estimar o consumo de energia de edifícios, com o potencial de fornecer valores de referência.

Palavras-chave: Análise de *cluster*. *K-means*. Edifício referência. Análise dimensional. Consumo de energia. Edifícios de escritórios.

ABSTRACT

The formulation of policies and incentive schemes to reduce energy consumption in buildings requires an understanding of the characteristics of existing building stocks to determine how their energy performance can be improved. This research aimed to develop a simplified method for estimating energy consumption in buildings, facilitating the comparison of real buildings with representative buildings of a category of existing construction stock. A sample of 197 office buildings in the city of Florianópolis was studied, adopting the K-means approach as the classification methodology for 187 buildings based on their shape and dimensions and 179 buildings based on the percentage of façade openings. For the installed air conditioning system, the analysis was based on the frequency of occurrence. As a result of the analysis, it is possible to state that the office buildings in Florianópolis can be represented by two shapes (square and rectangular), in four distinct sizes: (a) small square, measuring 16 m x 15 m (with a small tolerance for the difference between the two measurements) and (b) large square, measuring 23 m x 23 m; (c) small rectangle, measuring 15 m x 24 m and; (d) large rectangle, measuring 15 m x 34 m. Buildings in this category mostly use individual conditioning system through packaged terminal heat pumps. The typical office building in Florianópolis has 33% of the glazed area on the north facade, 30% on the south facade, and 24% on the east and west facades. Representative buildings were submitted to energy consumption simulation using the Energyplus software. Dimensional analysis was applied to obtain an equation for estimating the building's energy consumption, considering basic parameters common to the work routine of architects and designers, such as area, building usage time, occupancy density, building height, and percentage of facade area, glazed area, and typical floor area. The results of the thermo-energy simulation allowed the validation of the proposed equation. The equation provided an estimate of the total energy consumption of a building with a difference of less than 10% compared to the energy consumption obtained through computer simulation, regardless of the shape, size, height, and usage time of the building, when other reference conditions were maintained. Tests showed that the equation can be generalized through the study of models with other envelope characteristics and subjected to different climates. Thus, dimensional analysis proves to be a powerful tool for estimating the energy consumption of buildings, with the potential to provide reference values.

Keywords: Cluster analysis. K-means. Reference buildings. Dimensional analysis. Energy consumption. Office buildings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Hierarquia das abordagens de modelamento energético do estoque edificado	29
Figura 2 - Modelagem do edifício referência	34
Figura 3 - Distância euclidiana (d) entre dois objetos medidos sobre duas variáveis, X e Y	44
Figura 4 - Agrupamento de dados por meio do algoritmo <i>k-means</i>	45
Figura 5 - Relação entre IA e TO.	55
Figura 6 - Etapas de desenvolvimento do método de pesquisa.....	66
Figura 7 - Fotos de alguns edifícios no levantamento de dados in loco.....	68
Figura 8 - Quadrantes para definição da orientação solar das fachadas.....	69
Figura 9 - Extração do <i>WWR</i> nas fachadas.....	69
Figura 10 - Distribuição de frequência em relação à idade dos edifícios.	70
Figura 11 - Distribuição de frequência de edifícios em relação ao número de pavimentos.	71
Figura 12 - Simulação comparativa entre algumas das legislações de Florianópolis	72
Figura 13 - Classificação dos edifícios quanto à forma.	73
Figura 14 - Distribuição de frequência de edifícios em relação à área locável.....	73
Figura 15 - Classificação dos edifícios quanto ao sistema de condicionamento de ar instalado.	74
Figura 16 - Percentual de Abertura da Fachada nos edifícios da amostra.....	74
Figura 17 - Gráfico do consumo de energia dos modelos conforme altura do edifício.	80
Figura 18 - Configuração de algumas quadras onde estão inseridos prédios da amostra.....	92
Figura 19 - Exemplo de ausência da definição do traçado das quadras.	92
Figura 20 - Configuração da quadra de referência para estudo do sombreamento.	93
Figura 21 - Implantação dos modelos nos lotes estipulados para estudo e suas respectivas TO.....	94

Figura 22 - Cenários para análise do sombreamento	94
Figura 23 - Dendrograma de 3 <i>clusters</i> para os edifícios de forma quadrada.....	97
Figura 24 - Dendrograma de 8 <i>clusters</i> para os edifícios de forma retangular.....	97
Figura 25 - Dimensões dos edifícios representativos de cada <i>cluster</i> , formas retangular e quadrada.	99
Figura 26 - Dendrograma de 14 <i>clusters</i> para análise do <i>WWR</i> em 179 edifícios da amostra.....	101
Figura 27 - Consumo de energia obtido por meio de simulação computacional (sim) em comparação com os valores calculados (calc) usando Eq.62 à esquerda, enquanto a comparação usando Eq.63 à direita.	104
Figura 28 - Consumo de energia calculado e obtido por simulação para variação de <i>Weq</i>	106
Figura 29 - Consumo de energia calculado e obtido por simulação para variação de <i>Wil</i>	107
Figura 30 - Consumo de energia calculado e obtido por simulação para variação do <i>COP</i>	108
Figura 31 - Consumo de energia calculado e obtido por simulação para variação de <i>p</i>	109
Figura 32 - Consumo de energia calculado e obtido por simulação para variação de <i>h_p</i>	110
Figura 33 - Consumo de energia calculado e obtido por simulação para variação do <i>WWR</i>	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos de edifícios comerciais de escritório utilizados nos estudos elencados.	37
Tabela 2 - Revisão de literatura sobre métodos de agrupamento aplicados em estudos de energia para identificação de edifícios representativos de uma categoria de edifícios.	46
Tabela 3 - Grandezas fundamentais de acordo com o Sistema Internacional de Unidades.	57
Tabela 4 - Dimensões e unidades de grandezas conforme Sistema Internacional de Unidades.	58
Tabela 5 - Sistema linear de $\pi 1$ organizado por dimensão.	62
Tabela 6 - Densidade típica de carga de equipamentos para diversos tipos de escritórios.	77
Tabela 7 - Composição dos elementos construtivos.	78
Tabela 8 - Propriedades térmicas dos materiais utilizados: densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c).	78
Tabela 9 - Propriedades ópticas e térmicas do vidro utilizado.	79
Tabela 10 - Características do Sistema de condicionamento de ar	79
Tabela 11 - Parâmetros de entrada para a modelagem do consumo de energia em edifícios por meio da análise dimensional.	82
Tabela 12 - Sistema linear de $\pi 1$ organizado por dimensão	84
Tabela 13 - Sistema linear de $\pi 1$ organizado por dimensão.	86
Tabela 14 - Matriz de coeficientes.	87
Tabela 15 - Sistema linear de $\pi 1$ organizado por dimensão	88
Tabela 16 - Sistema linear de $\pi 2$ organizado por dimensão	88
Tabela 17 - Sistema linear de $\pi 3$ e $\pi 4$ organizado por dimensão	89
Tabela 18 - Limite de Ocupação do plano diretor de Florianópolis para a AMC 16.593	
Tabela 19 - Quantidade de edifícios em cada <i>cluster</i> para ambas as formas.	98
Tabela 20 - Distribuição dos casos excluídos/analísados por forma	98

Tabela 21 - Edifícios representativos de cada <i>cluster</i> para as formas quadrada e retangular.....	98
Tabela 22 - Comparação dos <i>clusters</i> para a forma quadrada.	100
Tabela 23 - Comparação dos <i>clusters</i> para a forma retangular.	100
Tabela 24 - Número de edifícios contidos em cada <i>cluster</i> , representatividade dos <i>clusters</i> na amostra, edifícios representativos de cada <i>cluster</i> e seus respectivos <i>WWRs</i>	101
Tabela 25 - Parâmetros de entrada para o equacionamento do consumo de energia do edifício.	102
Tabela 26 - Valores reais de consumo obtidos por meio da Plataforma DEO/CBCS comparados aos valores de consumo obtidos por simulação termoenergética e calculados por meio da Eq.63.....	104
Tabela 27 - Dimensões dos casos avaliados para teste da equação e diferença percentual entre o consumo final calculado e o consumo obtido por simulação para edifícios quadrados e retangulares com áreas, número de pavimentos e tempo de uso variados.	105
Tabela 28 - Diferença percentual entre o consumo final calculado e o consumo simulado para diferentes densidades de potência instaladas para tomadas e equipamentos do edifício.....	106
Tabela 29 - Diferença percentual entre o consumo final calculado e o consumo simulado para diferentes densidades de potência instaladas para o sistema de iluminação do edifício.....	107
Tabela 30 - Diferença percentual entre o consumo final calculado e o consumo simulado para diferentes coeficientes de performance do sistema de condicionamento de ar.	108
Tabela 31 - Diferença percentual entre o consumo final calculado e o consumo simulado para diferentes densidades ocupacionais.	109
Tabela 32 - Diferença percentual entre o consumo final calculado e o consumo simulado para diferentes alturas do pavimento tipo do modelo submetido à simulação.....	110

Tabela 33 - Diferença percentual entre o consumo final calculado e o consumo simulado para diferentes <i>WWRs</i> do modelo submetido à simulação. ...	111
Tabela 34 - Valores de consumo calculado por simulação para os modelos com entorno e sem entorno.....	113
Tabela 35 - Valores de consumo calculados por simulação do sistema de climatização desmebrados em uso com resfriamento, aquecimento e ventilação. ...	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACM	<i>Aluminium Composite Material</i>
ADENE	Agência para Energia de Portugal
AMC	Área mista central
ANOVA	Análise de Variância
ASIEPI	<i>Assessment and Improvement of the EPBD Impact</i>
BPD	<i>Building Performance Database</i>
BPIE	<i>Buildings Performance Institute Europe</i>
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CBECS	<i>Commercial Building Energy Consumption Survey</i>
CB3E	Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CEUS	<i>California Commercial End-Use Survey</i>
CIBSE	<i>Chartered Institution of Building Services Engineers</i>
CL	<i>Cluster</i>
COP	<i>Coefficient of performance</i>
CV	Coeficiente de Variação
DOE	<i>The United States Department of Energy</i>
EIA	<i>U.S. Energy Information Administration</i>
EPBD	<i>European Performance Building Directive</i>
EUA	Estados Unidos da América
EUI	<i>Energy Use Intensity</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
IA	Índice de aproveitamento
IC	Intervalo de Confiança
ICAEN	Instituto Catalão de Energia
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INE	Instituto Nacional de Estatística de Portugal
IPTU	Imposto Predial e Territorial Urbano

LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
NBI	<i>New Buildings Institute</i>
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PMF	Prefeitura Municipal de Florianópolis
PTHP	<i>Packaged Terminal Heat Pump</i>
RECS	<i>Residential Energy Consumption Survey</i>
RNAs	Redes Neurais Artificiais
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
SCE	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios de Portugal
SI	Sistema Internacional de Unidades
SVF	<i>Sky view factor</i>
TABULA	<i>Typology Approach for Building Stock Energy Assessment</i>
TDC	Transferência do Direito de Construir
TEK	<i>Teilenergiekennwerte von Nichtwohngebäuden</i>
TO	Taxa de ocupação
UE	União Européia
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VAV	<i>Variable air volume</i>
VRF	<i>Variable Refrigerant Volume</i>
WWR	<i>Window Wall Ratio</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampere
A_u	Área do pavimento tipo
°C	Graus Celsius
c	Calor específico
C_{ac}	Consumo para climatização do edifício
Cap_{ac}	Densidade de capacidade do sistema de condicionamento de ar
Cd	Candela
C_{il}	Consumo com o sistema de iluminação
C_{eq}	Consumo com equipamentos e tomadas
CO ₂	Dióxido de carbono
e	Espessura
h_p	Altura do pavimento tipo (pé-direito)
H	altura do edifício
h	Hora
K	Kelvin
kg	Quilograma
kW	Quilowatt
GW	Giga watt
MW	Mega watt
L	<i>Length</i> , comprimento
L_r	Largura da rua
M	<i>Mass</i> , Massa
m	Metro
m ²	Metro quadrado
mol	Quantidade de matéria
N	Newton
N	número de elementos da amostra
n	número de pavimentos do edifício

N_p	Número de produtos adimensionais completos e independentes
N_v	número de variáveis e constantes dimensionais
N_d	número de dimensões
p	densidade de ocupação
Qg	Quadrado grande
Qp	Quadrado pequeno
Rg	Retângulo grande
Rp	Retângulo pequeno
s	Segundo
W_{ac}	Densidade de potência instalada para climatização
W_{il}	Densidade de potência instalada para iluminação
W_{eq}	Densidade de potência instalada para tomadas e equipamentos
W	Watt
ρ	Densidade de massa aparente
λ	Condutividade térmica
T	<i>Time</i> , Tempo
t	Tempo de utilização do sistema
θ	Temperatura
μ	Viscosidade
π	Produto adimensional

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	21
1.1. JUSTIFICATIVA, RELEVÂNCIA E ABORDAGEM DO TEMA	22
1.2. PROBLEMA DE PESQUISA	23
1.3. OBJETIVOS	23
1.3.1. Objetivo geral.....	23
1.3.2. Objetivos específicos.....	23
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	24
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
2.1. BANCOS DE DADOS DO ESTOQUE DE CONSTRUÇÃO NO MUNDO	25
2.2. MODELAGEM DO CONSUMO DE ENERGIA DO ESTOQUE PREDIAL	28
2.2.1. Definição de referências para modelagem do consumo de energia.....	30
2.2.2. Modelos de referência utilizados em estudos brasileiros com edifícios de escritórios	36
2.3. O USO DO AGRUPAMENTO DE DADOS PARA A IDENTIFICAÇÃO DE EDIFÍCIOS REPRESENTATIVOS.....	42
2.4. FERRAMENTAS PARA CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA DE EDIFÍCIOS.....	49
2.5. IMPLICAÇÕES DO ENTORNO urbano no CONSUMO DE ENERGIA DO EDIFÍCIO	51
2.6. A ANÁLISE DIMENSIONAL COMO MÉTODO DE CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA DE EDIFÍCIOS.....	56
2.6.1. Procedimentos de cálculo na teoria adimensional.....	59
CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	65
3.1. FORMATAÇÃO DA BASE DE DADOS	66
3.1.1. Definição da amostra	66
3.1.2. Levantamento de campo e coleta de dados adicionais	68
3.2. DESCRIÇÃO DO ESTOQUE EDIFICADO.....	70

3.2.1.	Análise preliminar dos dados.....	70
3.2.2.	Agrupamento dos dados	75
3.2.3.	Definição dos edifícios representativos	76
3.3.	CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA DE EDIFÍCIOS.....	77
3.3.1.	Caracterização dos modelos	77
3.3.2.	Simulação termoenergética dos modelos.....	80
3.4.	MODELAMENTO MATEMÁTICO DO CONSUMO DE ENERGIA DE EDIFÍCIOS POR MEIO DA ANÁLISE DIMENSIONAL	81
3.4.1.	Consumo de energia do sistema de iluminação de um edifício.....	82
3.4.2.	Consumo de energia de equipamentos em um edifício.....	85
3.4.3.	Consumo de energia para climatização de um edifício	86
3.4.4.	Cálculo do consumo total de energia do edifício	90
3.5.	INCLUSÃO DOS PARÂMETROS URBANOS NO CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA	91
	CAPÍTULO 4 – RESULTADOS	96
4.1.	IDENTIFICAÇÃO DE EDIFÍCIOS REPRESENTATIVOS	96
4.1.1.	Forma dos edifícios.....	96
4.1.2.	Percentual de abertura das fachadas	100
4.2.	APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO PARA CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA EM EDIFÍCIOS	102
4.2.1.	A inclusão do parâmetro “sombreamento” do entorno na equação ...	112
	CAPÍTULO 5 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	115
	CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES.....	118
6.1.	RECOMENDAÇÃO DE FUTUROS TRABALHOS.....	119
	REFERÊNCIAS.....	121
	APÊNDICES	133
	APÊNDICE A - Dendrograma de 2 e 3 <i>clusters</i> para classificação dos edifícios de forma quadrada quanto às dimensões.	134

APÊNDICE B - Dendrogramas de 2 a 8 <i>clusters</i> para classificação dos edifícios de forma retangular quanto às dimensões.	135
APÊNDICE C – forma quadrada: Distância euclidiana de cada elemento da amostra ao centroide do cluster	139
APÊNDICE D – forma retangular: Distância euclidiana de cada elemento da AMOSTRA AO centroide do cluster	140
APÊNDICE E - Dendrogramas de 3 a 18 <i>clusters</i> para classificação dos edifícios com relação ao <i>WWR</i>	144
APÊNDICE F - Comparação dos 14 clusters para análise do <i>WWR</i>	152
APÊNDICE G - P-valores do post hoc de tukey nos 14 clusters utilizados para análise do <i>WWR</i>	154
APÊNDICE H – Consumo de energia simulado para os quatro modelos.	156
APÊNDICE I – Consumo de energia calculado versus consumo de energia simulado para os quatro modelos.....	160
APÊNDICE J – Valores de consumo de energia OBTIDOS POR SIMULAÇÃO de cada modelo, para diferentes azimutes, nos cenários com e sem sombra.....	164

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O consumo mundial de energia está em constante crescimento e a manutenção dos estoques consumidores representa um grande desafio para os governos, principalmente nos países em desenvolvimento, que exigem grandes investimentos em redes nacionais e capacidade de geração para atender ao aumento da demanda. Além disso, a *International Energy Agency* (IEA) aponta que o progresso global no uso de fontes mais eficientes de energia deve desacelerar como resultado dos impactos econômicos da pandemia do coronavírus (COVID-19) (IEA, 2020). É notório que uma das estratégias mais importantes, diante da escassez de recursos, é a conservação de energia (DI TURI; STEFANIZZI, 2015; KNEIFEL, 2010; LEE; YIK, 2004). Neste contexto, as edificações podem dar uma importante contribuição em relação ao uso racional de energia, já que edifícios são responsáveis por 36% do consumo final da energia global (IEA, 2019).

Entre os setores de uso final, os edifícios dominam o investimento em eficiência energética, respondendo por 60% do total mundial (IEA, 2020). Mas, financiar grandes investimentos em projetos de eficiência energética é um desafio para todos setores da economia, pois a utilização do potencial de economia está condicionada à experiência técnica na identificação de oportunidades combinadas com conhecimento financeiro adequado e acesso ao capital (CEBDS, 2014; FERREIRA; ALMEIDA; RODRIGUES, 2016; IEA, 2017).

A construção de códigos de energia (normas, regulamentos) é uma ferramenta importante para realizar o potencial de economia de energia no setor da construção e uma das medidas políticas mais eficazes em termos de custos para fornecer economia de energia em larga escala e a longo prazo (IPEEC, 2015). Um dos principais objetivos das políticas energéticas é tornar todos os níveis da sociedade, desde governos até cidadãos, interessados em aumentar a eficiência energética dos edifícios (POPESCU *et al.*, 2012).

No entanto, a formulação de políticas energéticas para o estoque de edifícios no contexto urbano, frequentemente requer a avaliação do uso de energia de um grande número de edifícios e, quando a modelagem energética é utilizada como parte

desse processo, a identificação de grupos de edifícios e edifícios representativos associados pode desempenhar um papel crítico (TARDIOLI *et al.*, 2018).

Ainda mais complexa é a definição das condições do entorno dos edifícios para estudos de energia. O grau do efeito do sombreamento está relacionado ao contexto urbano, que é a base para a simulação dinâmica da demanda energética do edifício e é influenciado por diversos fatores (LIU *et al.*, 2021).

Atualmente, no Brasil, a falta de conhecimento do parque edificado, com a consequente ausência de padrões de consumo, dificulta a comparação entre edifícios de uma categoria na avaliação de eficiência energética.

1.1. JUSTIFICATIVA, RELEVÂNCIA E ABORDAGEM DO TEMA

É projetado um aumento no consumo de energia no Brasil de 60% nos próximos 22 anos (BP, 2018) e a energia elétrica utilizada por edifícios corresponde a 52% do consumo nacional (EPE, 2020). Assim, a adoção de medidas de eficiência energética nesse setor torna-se um objetivo de valor incontestável.

As edificações comerciais são responsáveis por 17% do consumo de energia no âmbito nacional (EPE, 2020). O crescimento do número de edifícios de escritórios reflete o crescimento econômico do país e suas características arquitetônicas seguem o *estilo internacional*, com fachadas totalmente envidraçadas, planta livre, leiautes flexíveis, com sistemas artificiais de iluminação e condicionamento de ar (BRUGNERA *et al.*, 2019). Nesse sentido, escritórios corporativos têm altas densidades de consumo energético pelo uso intenso de computadores e, diante das exigências de conforto dos usuários, possuem perto de 100% de sua área útil condicionada (CBCS, 2014).

Políticas eficazes e esquemas de incentivo para reduzir os impactos ambientais referentes aos edifícios requerem uma sólida compreensão sobre o parque imobiliário edificado (BPIE, 2011), sendo o conhecimento sobre as características dos edifícios, fundamental para entender como o desempenho energético a nível urbano pode ser melhorado (MATA; KALAGASIDIS; JOHNSON, 2014).

A relevância científica deste trabalho está na metodologia para a obtenção de edifícios referência no contexto urbano e no desenvolvimento de um cálculo

simplificado para estimativa de consumo de energia sem ter que estudar edifícios específicos em profundidade ou enfrentar a ausência de dados sintetizados do setor da construção civil.

A busca pela construção mais sustentável tem sido amplamente debatida. O programa de certificação vigente para avaliação do consumo de energia de edifícios no Brasil tem um método complexo, requer a aplicação de recursos e consultoria especializada. A baixa adesão ao programa aponta para a necessidade de uma ferramenta acessível, que permita estimar o consumo de energia de modo rápido para embasar a tomada de decisão na fase de projeto ou *retrofit* do edifício.

1.2. PROBLEMA DE PESQUISA

Como conhecer o desempenho energético e o potencial de economia de energia de um estoque de edifícios existentes?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo geral

Desenvolver um método simplificado para estimativa do consumo de energia em edifícios com base no consumo obtido por meio da simulação termo energética de edifícios representativos de uma categoria do estoque de construção existente.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Descrever o estoque de edifícios comerciais de escritórios a partir de uma base de dados;
- b) Definir os edifícios típicos que representem uma base de dados;
- c) Avaliar a representatividade dos modelos utilizados na literatura com relação à amostra real estudada;
- d) Definir características do entorno dos edifícios considerando parâmetros urbanísticos;

- e) Aplicar a análise dimensional para estimativa do consumo de energia em edifícios com base no consumo obtido por meio da simulação termo energética de edifícios representativos de uma categoria de construção.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento de tese está dividido em seis capítulos. No **primeiro capítulo** são apresentados o tema de pesquisa, justificativa, hipótese e objetivos.

O **segundo capítulo** aborda a revisão de literatura sobre o uso de bancos de dados e técnicas de agrupamento para identificação de edifícios de referência para modelagem do consumo de energia em estoques de edifícios. Estudos brasileiros que utilizaram modelos de edifícios comerciais de escritórios são elencados para contextualizar o problema de pesquisa. O referencial teórico aborda ainda as implicações do entorno no consumo de energia de edifícios e os parâmetros que influenciam o sombreamento. A análise dimensional é apresentada como metodologia a ser testada no cálculo do consumo de energia em edifícios.

No **terceiro capítulo**, são apresentados os procedimentos metodológicos propostos. Os resultados obtidos são relatados no **quarto capítulo**. A discussão dos resultados é realizada no **quinto capítulo**. As conclusões da pesquisa são descritas no **sexto capítulo**, que também contempla recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste referencial teórico apresenta-se o uso de bancos de dados de edifícios no Brasil e no exterior para avaliação do consumo de energia, como se dá a modelagem de um estoque predial edificado e como se define um edifício de referência para estudos de energia. Modelos utilizados em estudos brasileiros para edifícios de escritórios foram elencados e, dada as diversas formas de uso, explorou-se o potencial da técnica de *clustering* para obtenção de modelos a partir do agrupamento de dados de edifícios existentes. São descritos os parâmetros envolvidos no sombreamento dos edifícios na escala urbana a fim de incluí-los no cálculo de consumo de energia. A análise dimensional é apresentada como técnica passível de uso para estimar o consumo de energia de edifícios.

2.1. BANCOS DE DADOS DO ESTOQUE DE CONSTRUÇÃO NO MUNDO

O interesse na análise do desempenho energético de grandes estoques de construção existentes é crescente no âmbito mundial. A taxa de rotatividade, definida como a substituição de um edifício por outro em um mesmo terreno é muito baixa. Portanto, melhorar o desempenho dos edifícios existentes é a maneira mais eficaz de obter uma redução significativa do consumo de energia no setor de construção. No entanto, isso requer uma sólida compreensão do parque imobiliário edificado (MATA; KALAGASIDIS; JOHNSON, 2014).

Vários governos estão promovendo a criação de bancos de dados de referência, a fim de apoiar estudos de desempenho termoenergético em larga escala (CORGNATI *et al.*, 2013).

Dentre as metodologias utilizadas para obtenção de dados, as mais conhecidas e consolidadas são as bases de dados de edificações do governo dos Estados Unidos (EUA). A *Commercial Building Energy Consumption Survey* (CBECS) e a *Residential Energy Consumption Survey* (RECS) contêm dados detalhados de uso de energia para amostras representativas dos estoques comerciais e residenciais nacionais (EIA, 2003; EIA, 2015) e, apesar de ter como objetivo o planejamento e previsão de demanda energética, o conjunto de dados coletados fornece estatísticas resumidas do estoque de edifícios nacionais (DOE, 2012). Devido ao alto custo

envolvido na coleta de dados, a CBECS e a RECS utilizam amostras relativamente pequenas e a atualização dos dados é realizada com baixa frequência (EDDY; MARTON, 2012). Ainda assim, elas são amplamente utilizadas para definição de edificações representativas, aferição do desempenho térmico ou eficiência energética de edificações, equipamentos e sistemas (CARLO, 2008).

A CBECS e a RECS servem de base para o *Annual Energy Outlook* (EIA, 2019) na avaliação das tendências de uso de energia no setor de edificações. A CBECS foi ponto de partida para uma das maiores bases de dados de modelos de referência: a do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), onde foram definidos 15 modelos de edifícios comerciais e um residencial para 16 locais (representativos das zonas climáticas dos EUA), classificados em três períodos de construção (anterior e posterior a 1980 e novos edifícios). Esses edifícios de referência caracterizam aproximadamente dois terços do estoque de edifícios comerciais do país. O conjunto de 15 tipos de edifícios comerciais representa 3.279 edifícios (de 5.215) do conjunto de dados CBECS completo e corresponde a 4,1 bilhões de m² ou 62% da área total ponderada da pesquisa (64% se os edifícios vazios são removidos do total) e 65% do consumo total de energia. Os demais tipos de edifícios do CBECS incluem aqueles que variam significativamente em tamanho, cargas internas e operação (NREL, 2011).

Em resposta à demanda do setor por dados atualizados, o DOE, junto ao *Lawrence Berkley National Laboratory*, mantém o *Building Performance Database* (BPD)¹, o maior conjunto de dados de acesso aberto sobre características energéticas de edifícios comerciais e residenciais americanos (MATHEW *et al.*, 2015). A base permite que os usuários explorem dados por região imobiliária e comparem características físicas e operacionais para melhor entendimento das condições de mercado e tendências no desempenho energético dos edifícios (DOE, 2020).

Um banco de dados também foi compilado pela *California Energy Commission* para apoiar as atividades de previsão de demanda de energia do estado da Califórnia (EUA). A *California Commercial End-Use Survey* (CEUS) é um estudo abrangente do

¹ <https://www.energy.gov/eere/buildings/building-performance-database-bpd>

uso de energia no setor comercial que contou com a coleta de dados detalhados de sistemas prediais, geometria das construções, uso de eletricidade e gás, características de reservatórios térmicos, inventários de equipamentos, rotinas de operação, entre outras características de edifícios comerciais. A estratificação da amostra aleatória de 2.800 instalações comerciais possibilitou a criação de perfis de carga por uso final e estimativas de consumo para 12 categorias de prédios comerciais (CEC, 2006).

Existem outras bases de dados americanas limitadas a edifícios de uso específico ou subconjuntos de edifícios. O *Labs 21* coleta dados de *benchmarking* para laboratórios em todo o país, concentrando-se em indicadores de energia específicos de laboratórios. O *Portfolio Manager* coleta dados de *benchmarking* de energia e atribui pontuações *Energy Star* para vários tipos de construção. O *Labs 21* e o *Portfolio Manager* têm baixos custos de coleta de dados, uma vez que o processo é realizado on-line (MATHEW *et al.*, 2015). O *New Buildings Institute* (NBI) coleta dados de uso de energia para edifícios com certificação LEED (NBI, 2008). Estes dados são usados para comparar o desempenho de edifícios certificados com o estoque nacional de edifícios e para avaliar o desempenho de edifícios nas simulações em fase de projeto conduzidas como parte do processo de certificação.

Na Europa, o projeto ASIEPI (*Assessment and Improvement of the EPBD Impact - for new buildings and building renovation*) juntou esforços de 12 países para composição de um conjunto de unidades residenciais unifamiliares de referência (IEE, 2009).

O *Buildings Performance Institute Europe* (BPIE) realizou uma extensa análise das características e políticas relacionadas ao parque edificado europeu. A investigação fornece um panorama do desempenho energético do parque imobiliário e de como as políticas existentes influenciam a situação. Os dados também foram utilizados para desenvolver cenários que revelam meios para tornar o parque imobiliário mais eficiente em termos energéticos, em consonância com o roteiro da UE para 2050 (BPIE, 2011).

Em Portugal, existem duas bases de dados nacionais: a do Instituto Nacional de Estatística (INE) e a da Agência para Energia (ADENE), que incluem informações relevantes sobre o parque imobiliário nacional (ADENE,2006; INE,2021).

O projeto *Typology Approach for Building Stock Energy Assessment* (TABULA), envolveu 13 países para analisar o parque habitacional europeu com objetivo de criar uma estrutura harmonizada para os tipos de edifícios, possibilitando estimar a demanda de energia a nível nacional e o efeito das medidas de eficiência energética nos edifícios existentes (TABULA,2015).

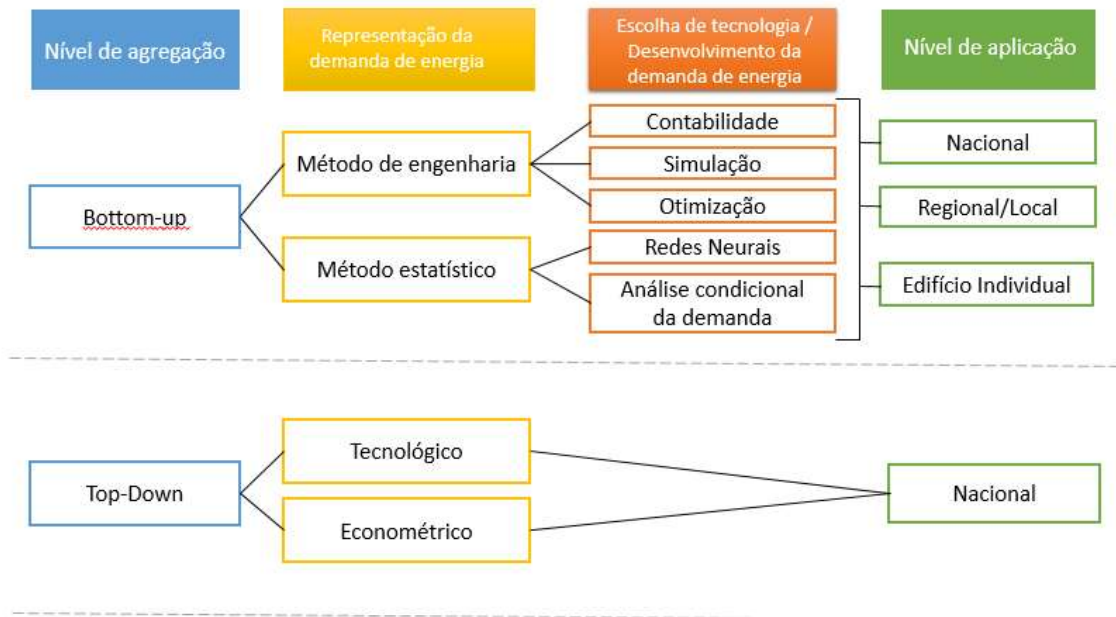
Na Alemanha, o projeto de investigação *Teilenergiekennwerte von Nichtwohngebäuden* (TEK) forneceu uma base de dados com 92 registos de edifícios não residenciais existentes. A base de dados TEK contém informações detalhadas sobre as propriedades da envoltória do edifício, eficiência energética dos sistemas instalados, comportamento do usuário, consumo de energia medido e demandas de energia calculadas (HÖRNER; LICHTMESS, 2019) .

No Brasil, nenhum banco de dados que auxilie a composição de modelos de referência para estudos de desempenho termoenergético de edifícios está disponível e poucos estudos nacionais têm sido realizados nessa área nos últimos anos (ALVES, 2017; ROSA, 2014).

2.2. MODELAGEM DO CONSUMO DE ENERGIA DO ESTOQUE PREDIAL

A literatura faz uma distinção entre duas abordagens de modelagem energética do estoque de construção: *top-down* e *bottom-up* (LI, W. *et al.*, 2017; SWAN; UGURSAL, 2009). A terminologia se refere à posição hierárquica dos dados de entrada em relação ao setor edificado como um todo. A Figura 1 apresenta a hierarquia das abordagens de modelamento energético do estoque edificado:

Figura 1 - Hierarquia das abordagens de modelamento energético do estoque edificado



Fonte: Adaptado de (STEINBACH *et al.*, 2013)

A abordagem *top-down* representa o consumo de energia estabelecendo uma relação de longo prazo entre o uso de energia do setor e os principais fatores associados, como por exemplo, alterações no produto interno bruto (PIB), no preço da energia, na população, no tamanho das famílias, nas tecnologias e práticas, nas condições meteorológicas, entre outros (LI, W. *et al.*, 2017). A abordagem *bottom-up* calcula o consumo de energia de indivíduos ou grupos de edifícios e, em seguida, extrapola esses resultados para representar uma região (KAVGIC *et al.*, 2010; SWAN; UGURSAL, 2009). À abordagem *bottom-up* estão vinculados dois modelos distintos: estatísticos e de engenharia, sendo comum também encontrar modelos híbridos (ALVES, 2017).

Os modelos estatísticos utilizam dados agregados para produzir modelos capazes de prever o comportamento do setor de construção (conjunto de parâmetros de entrada influentes para as saídas medidas por meio de um algoritmo).

Os modelos de engenharia aplicam regras físicas (por exemplo, transferência de calor e massa) para prever o comportamento de um dado sistema com propriedades e condições específicas. Assim, os edifícios usados como entrada na

abordagem *bottom-up* são definidos por propriedades da construção, tais como localização (dados climáticos), geometria, características da envoltória, sistemas instalados, equipamentos e ocupação. Considerando o nível de detalhamento dos dados requeridos, a disponibilidade de dados e restrição de tempo computacional, o estoque de construção é geralmente representado por edifícios de amostra ou edifícios representativos. Então, assume-se que edifícios similares com relação ao ano de construção, uso, tipo de sistema de aquecimento/resfriamento e a geometria pode ser representada por um edifício típico (ÖSTERBRING *et al.*, 2016).

Em suma, a abordagem *bottom-up* representa modelos baseados na física dos edifícios (de subconjuntos ou edifícios individuais de um estoque) e a abordagem *top-down* representa modelos baseados na teoria econômica, em dados agregados e estatísticas (NABER; VOLK; SCHULTMANN, 2017). Assim, modelos *top-down* são uma ferramenta útil para estimar os requisitos de suprimento de energia em escala regional e nacional, mas não podem ser usados para avaliar os efeitos de medidas de eficiência energética de forma individual, já que a identificação de áreas-chave para economia de energia pode ser comprometida (ÖSTERBRING *et al.*, 2016; SWAN; UGURSAL, 2009). Dentre as técnicas para a modelagem de energia de edifícios, a abordagem *bottom-up* é bastante explorada na literatura (BRØGGER; WITTCHEN, 2018; BUFFAT *et al.*, 2017; FOLIENTE; SEO, 2012; KAZAS; FABRIZIO; PERINO, 2017; KRARTI; DUBEY, 2018; LEDESMA; PONS-VALLADARES; NIKOLIC, 2021; LI, X. *et al.*, 2018; MASTRUCCI *et al.*, 2014; MATTINEN *et al.*, 2014; NÄGELI *et al.*, 2018).

2.2.1. Definição de referências para modelagem do consumo de energia

Uma premissa para a modelagem de um estoque predial é a suposição de que certos parâmetros de um edifício têm impacto significativo em seu desempenho energético. Assim, a identificação destes parâmetros significativos permite tirar conclusões sobre a demanda de energia de edifícios individuais (AKSOEZEN *et al.*, 2015). Mas, para avaliar se um edifício é mais eficiente do que edifícios similares no

que diz respeito ao uso de energia, é necessário desenvolver um sistema de *benchmarking*.

Conceitualmente, a palavra *benchmarking* é utilizada como sinônimo de comparação ou de aferimento. É a comparação entre elementos de uma mesma categoria para analisar se o desempenho é superior ou inferior à média do mercado. Assim, o *benchmarking* energético em edifícios consiste na comparação do consumo de energia entre diversos prédios de uma mesma categoria (BORGSTEIN; LAMBERTS; HENSEN, 2016).

Em termos gerais, os métodos de *benchmarking* energético dividem-se em quatro categorias: sistemas de classificação baseados em pontos, métricas hierárquicas e de uso final, abordagens estatísticas (ou baseadas em regressão) e abordagens baseadas em modelos de simulação (SARTOR *et al.*, 2000).

Os sistemas de classificação baseados em pontos não permitem comparações com outros edifícios; em vez disso, fornecem padrões e diretrizes para medir a eficiência e desempenho ambiental das construções. O LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) é um exemplo desse sistema. A pontuação LEED é composta de créditos atribuídos para atender a diferentes critérios, incluindo eficiência energética e outros fatores ambientais.

As métricas hierárquicas e de uso final referem-se à geração de benchmarks que vinculam o uso de energia aos requisitos climáticos e funcionais. O intuito é iniciar a análise no âmbito do edifício e, gradualmente, estendê-la até ao âmbito do sistema e dos componentes subjacentes para encontrar os dados de desempenho. Assim, os dados de nível mais alto a serem considerados são a área bruta e faturas de energia. O segundo nível mais alto considera a porcentagem de tipos de uso e sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado, e o nível mais baixo considera o uso de energia da zona térmica.

Nas abordagens estatísticas, dados estatísticos de uma população de edifícios semelhantes são usados para gerar referências utilizadas para comparação da intensidade de uso de energia dos edifícios.

Abordagens baseadas em modelos de simulação calculam *benchmarks* de energia com base em um modelo idealizado de desempenho do edifício. Para tanto,

ferramentas de modelagem de energia, como o *EnergyPlus*, são normalmente utilizadas. Os modelos possuem múltiplos usos em *benchmarks*, pois têm a vantagem de serem ajustados para levar em conta uma ampla gama de fatores que contribuem para a variação no uso de energia, e podem, ainda, ser utilizados para gerar metas e comparar alternativas de projeto. A desvantagem do uso de modelos de simulação é que eles podem não ter sido bem calibrados para refletir os dados reais do estoque edificado (SARTOR *et al.*, 2000).

No cenário internacional, *benchmarks* são publicados e mantidos por organizações governamentais ou sem fins lucrativos. No Reino Unido, o *Chartered Institution of Building Services Engineers* (CIBSE) publica *benchmarks* para o consumo energético das principais categorias de edificações que são adotados na legislação do país para aplicação de programas de eficiência energética operacional de edifícios públicos. Nos EUA, o governo mantém a plataforma *Web Energy Star Portfolio Manager*, ferramenta amplamente utilizada, que permite a rápida comparação de desempenho energético com uso de *benchmarks*.

No Brasil, o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) deu início ao desenvolvimento de metodologias para *benchmarks* para agências bancárias e edifícios de escritórios corporativos, com intuito de estruturar a certificação energética operacional de edifícios no âmbito nacional (BORGSTEIN; LAMBERTS; HENSEN, 2016; CBCS, 2014).

Considerando a extensão do estoque edificado mundial, a criação de um banco de dados de modelos de referência tem se tornado indispensável para os estudos de desempenho termoenergéticos em grande escala (CORGNATI *et al.*, 2013). Assim, para modelar sua demanda de energia, um estoque de construção pode ser descrito por meio de edifícios representativos.

No entanto, existe uma grande variação no tamanho, forma e métodos de construção dos edifícios. O estoque foi edificado durante um longo período de tempo com a utilização de muitos materiais e técnicas de construção diferentes. Osterbring *et al.* (2006) pontuam que a suposição de que anos de construção semelhantes têm características de desempenho de energia semelhantes pode não ser condizente com a realidade, principalmente para parcelas mais antigas do estoque nas quais o *retrofit*

energético pode ter sido aplicado em graus variados, podendo gerar diferenças significativas no desempenho energético para o mesmo tipo de construção (ÖSTERBRING *et al.*, 2016). Internamente, os sistemas de aquecimento e resfriamento podem variar muito em termos de tipo, fontes de energia e eficiência. Além disso, cada um desses edifícios está sujeito às condições climáticas, incluindo a temperatura do ar ambiente e a irradiação solar, que podem variar espacialmente, além de conter flutuações de curto prazo e tendências de longo prazo. Em particular, o microclima local pode variar em todo o parque edificado, desde locais rurais altamente expostos à insolação e ventos, até centros urbanos afetados pelo efeito de ilha de calor. O comportamento dos ocupantes é uma complexidade adicional que depende de múltiplos fatores: número de pessoas, idades, padrões de ocupação, entre outros (CARLUCCI *et al.*, 2021; CASSOLA *et al.*, 2022; FIRTH; LOMAS; WRIGHT, 2010; MANN; BECERIK-GERBER, 2012; PAONE, 2018; RAFSANJANI; AHN; ALAHMAD, 2015; SOOMRO, 2019; ZIMMERMANN, 2007).

Assim, a escolha dos edifícios referência tem, de certa forma, uma natureza arbitrária, o que pode ser fonte de desvios e inconsistências nos resultados alcançados e na construção de comparações (BRANDÃO DE VASCONCELOS *et al.*, 2015). A incerteza nas previsões de modelos do estoque edificado pode ser grande e a falha em reconhecer isso pode levar a um falso grau de confiabilidade (FIRTH; LOMAS; WRIGHT, 2010). A abordagem metodológica a ser seguida na definição de edifícios de referência ainda está em discussão e é um campo importante nos estudos relacionados ao desempenho energético dos edifícios (BAGLIVO *et al.*, 2015; BRANDÃO DE VASCONCELOS *et al.*, 2015; CORGNATI *et al.*, 2013).

Para identificação de edifícios representativos, também conhecidos como arquétipos, três abordagens principais são apresentadas na literatura (BAGLIVO *et al.*, 2015; BALLARINI; CORGNATI; CORRADO, 2014) : a abordagem do edifício exemplo, do edifício real e do edifício teórico.

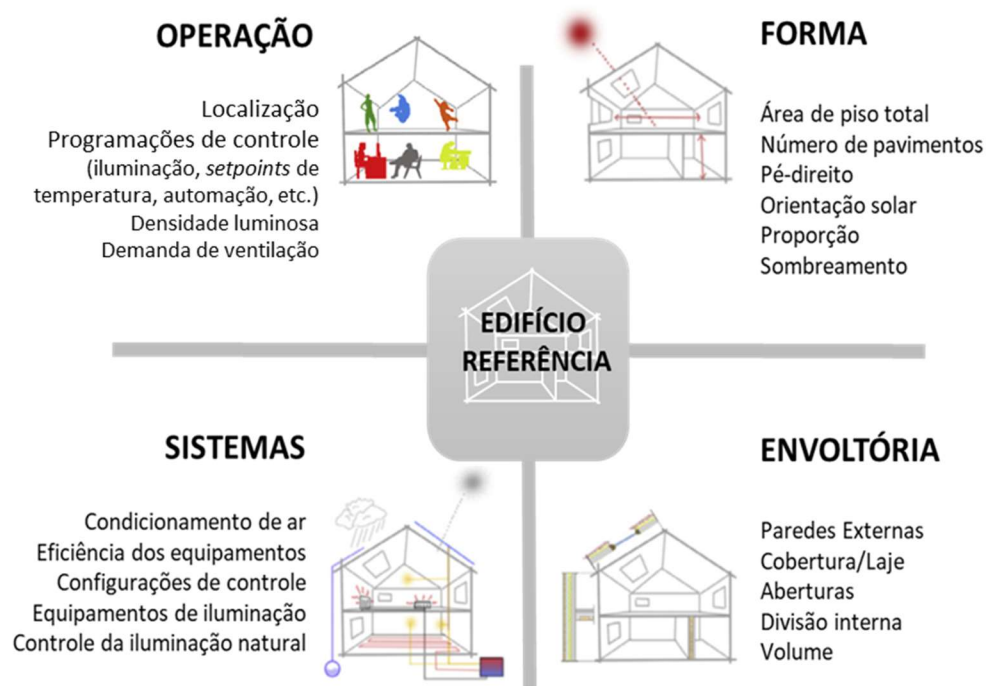
O edifício exemplo pode ser utilizado quando não há dados estatísticos disponíveis e especialistas classificam edifícios representativos com base em suas experiências e conhecimentos sobre o estoque edificado. Ou seja, é um edifício que supostamente possui as características mais prováveis de ocorrência dentro do grupo

em estudo. O edifício real é baseado na análise de dados estatísticos para identificar um prédio com valores médios próximos aos da amostra. Ou seja, o edifício real é um edifício existente determinado a partir do tipo mais frequente encontrado no estoque. A abordagem de edifício teórico identifica o elemento representativo por meio de análises estatísticas criando o “arquétipo”, um edifício virtual caracterizado por um conjunto de propriedades detectadas dentro de uma categoria agrupada.

A definição do modelo de referência não precisa obrigatoriamente seguir uma abordagem única. Pode ter, por exemplo, seus parâmetros geométricos baseados em um edifício real, mas adotar dados de operação e materiais constantes em fontes bibliográficas, normas e códigos (edifício exemplo) e utilizar um edifício teórico para definição de componentes da envoltória.

Adicionalmente, Corgnati *et al.* (2013), tendo como base a metodologia para estabelecer os edifícios referência utilizada pelo DOE, apontam que os dados coletados para a criação de edifícios referência, podem ser reunidos em quatro áreas principais de investigação: forma, envoltória, sistemas e operação (Figura 2).

Figura 2 - Modelagem do edifício referência



Fonte: Adaptado de (CORGNATI *et al.*, 2013)

A forma diz respeito ao tipo de construção (por exemplo, escritório, escola, etc.), tamanho e geometria geral do edifício. A envoltória refere-se às tecnologias de construção e materiais utilizados, fornecendo uma descrição das propriedades termofísicas da envoltória do edifício. A área de sistemas refere-se aos sistemas de aquecimento e resfriamento, ventilação mecânica e de geração de energia acoplados ao edifício. Na área da operação são definidos os parâmetros operacionais que afetam o uso do edifício, que podem ser expressos por meio de um conjunto de programações, isto é, rotinas de acionamento da iluminação, utilização de equipamentos, *set points* de temperatura de aquecimento/resfriamento, entre outros.

A definição dos parâmetros para cada conjunto depende dos requisitos do modelo energético escolhido e, diferentes finalidades de modelagem podem usar conjuntos de seleção e parâmetros adicionais sem comprometer o processo de tipificação do estoque de construção.

Diversos autores escreveram revisões abrangentes sobre a construção de edifícios referência de um estoque edificado para modelagem energética. Bourdic e Salat (2016) destacam em seu trabalho os pontos fortes e fracos de várias tentativas de quantificar e avaliar a eficiência energética urbana para o setor de edificações. Firth, Lomas e Wrigth (2010) abordam a falta de conhecimento sobre a precisão dos modelos de estoque edificado do Reino Unido e a incerteza em suas previsões, e detalham um novo modelo para prever o consumo de energia e as emissões de CO₂ nas habitações nacionais. Naber, Volk e Schultmann (2017) fornecem uma visão sobre como uma multiplicidade de modelos do estoque de construção lidam com a incerteza nas avaliações relacionadas à energia.

Keirstead, Jennings e Sivakumar (2012) fizeram uma revisão com base em 56 estudos analisando as técnicas utilizadas para modelagem energética de edifícios. Kialashaki e Reisel (2013) descrevem o desenvolvimento de modelos de previsão de demanda de energia no setor residencial dos Estados Unidos, utilizando as técnicas de redes neurais artificiais e regressão linear múltipla.

Kohler e Hassler (2002) apontaram a necessidade de aprimorar o conhecimento sobre a composição do parque imobiliário existente e a dinâmica de

sua transformação, e relacionar esse conhecimento aos *stakeholders* na construção civil.

Coletivamente, esses estudos mostram que a ausência de dados estatísticos confiáveis é uma importante limitação na maioria das pesquisas, e confirmam a escala global dessa lacuna de conhecimento. Mas, apesar da aparente escassez de dados consistentes, houve um aumento no desenvolvimento e uso de modelos de consumo de energia que representam estoques nacionais de construção (SUMMERFIELD; LOWE, 2012).

2.2.2. Modelos de referência utilizados em estudos brasileiros com edifícios de escritórios

Nos últimos anos, uma variedade de modelos de estoques de construção foi desenvolvida para fins de estudo do consumo de energia. Esses modelos variam consideravelmente em termos de abordagem geral, requisitos de informação, nível de desagregação, suposições subjacentes sobre edifícios e sua operação, resultados e cenários que eles podem avaliar (KAVGIC *et al.*, 2010). Em muitos estudos, a classificação por tipo de uso, ano de construção e geometria (por exemplo, relação superfície-volume) serve como forma de segmentação para agrupar prédios na definição de modelos. Esses parâmetros simples de segmentação estão, muitas vezes, disponíveis em bancos de dados públicos, como sistemas de informações geográficas (SIG) e registros de impostos e propriedades (KRISTENSEN; HEDEGAARD; PETERSEN, 2018). Mas, além de diferentes tipos de uso e métodos de construção, uma descrição do estoque de construção deve refletir a zona climática onde ele está localizado (MATA; SASIC KALAGASIDIS; JOHNSON, 2014).

No cenário nacional, existem pesquisas acerca do desempenho energético de edificações comerciais, onde é possível observar o uso de modelos de referência distintos. A Tabela 1 resume as características geométricas dos modelos utilizados em estudos brasileiros nos últimos 17 anos, com ênfase nas dimensões e no *Window-to-Wall Ratio (WWR)*, o percentual de abertura das fachadas. De acordo com o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de

Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C), o *WWR* é calculado pela razão entre a área de abertura envidraçada e a área total da fachada da edificação (INMETRO, 2013).

Tabela 1 - Modelos de edifícios comerciais de escritório utilizados nos estudos elencados.

Autor	Referência utilizada	Forma	Dimensões do modelo (m)	nº pav. Tipo	WWR(%)
PIRRÓ, 2005	Edifícios construídos em São Paulo entre 1980 e 2000	Quadrada	35x35	1	50 a 90
SANTANA, 2006	35 edifícios de Florianópolis	Retangular	25x8	11	40 e 20
FIGUEIREDO, 2007	Dilonardo (2001) e Pirró (2005)	Quadrada	26,5x26,5	20	25 e 59
WESTPHAL, 2007	Levantamento LabEEE (2005)	Retangular	27x7,5	5	10 e 90
CARLO, 2008	357 edifícios em cinco cidades	Retangular	27x7,8 11x38 10x16	5 2 15	15,25 e 35
BENEDETTO; ROMÉRO, 2008	Dilonardo (2001) Pirró (2005)	Quadrada	35x35	1	50 e 100
MARCONDES, 2010	Benedetto (2007); Figueiredo (2007); BCO Guide (2000) e Westphal (2008)	Retangular Quadrada	60x15 30x30	6	50
BESSA, 2010	Edifício hipotético	Quadrada	32,91 x 32,91	1	15
CARVALHO, 2011	Edifício real no Rio de Janeiro	Retangular	78x46	5	100
RUPP, 2011	Reinhart e Wienold (2011) e Ghisi (2002)	Retangular Quadrada	2:1, 1:1 e 1:2	1	10 a 100
MELO <i>et al.</i> , 2014	3200 casos simulados	Retangular Quadrada	Variadas	2 a 15	5 a 90
ANDREIS, 2014	Besen e Westphal (2012)	Retangular	60x40	20	30 a 60
CBCS, 2014	Edifícios em São Paulo (5) e Rio de Janeiro (3)	Quadrada	-	21	40 a 90
DUARTE, 2014	Apêndice G ASHRAE Standard 90.1	Quadrada	30x30	15	50
PINTO, 2017	Lam e Hui (1995)	Quadrada	35x35	1	30 a 60
VELOSO, 2017	101 edificações em Belo Horizonte	Variada	-	-	10 a 50
ALVES, 2017	298 edifícios em Belo Horizonte	Retangular	-	15	0, 25 e 50
SANTESSO; CHVATAL, 2018	55 edifícios da Base de dados Buildings	Retangular Quadrada	1:1, 2:1, 3:1, 1:2 e 1:3	1	10, 40, 70 e 100

Em 2005, o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) produziu protótipos de edificações de quatro atividades residenciais e de sete atividades comerciais e institucionais para simulação computacional de desempenho energético. Os protótipos comerciais e institucionais foram definidos com base em levantamentos fotográficos e visitas *in loco*. O levantamento fotográfico teve 613 edificações registradas em quatro capitais

estaduais (Florianópolis, São Paulo, Recife e Salvador). Por meio dele foi possível verificar características arquitetônicas como número de pavimentos, *WWR*, existência de proteções solares nas fachadas e cor dos vidros. No levantamento *in loco*, as características das edificações foram coletadas por meio de um questionário para definição dos padrões de uso. Os protótipos gerados foram posteriormente utilizados nas pesquisas de Carlo (2008) e Westphal (2007).

Pirró (2005) analisou o desempenho térmico, energético e econômico de envoltórios verticais de edifícios de escritórios de São Paulo a partir de um modelo baseado nos edifícios construídos na cidade entre os anos de 1980 e 2000.

Santana (2006) avalia a influência de parâmetros construtivos no consumo de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis – SC. No estudo, foram analisadas características de 35 edifícios para elaboração de um modelo representativo da categoria. Entre as características levantadas estão o número de pavimentos, forma da edificação, *WWR*, tipos de vidros, cores externas, orientação das fachadas e existência de elementos de proteção solar. O padrão de ocupação foi estabelecido com base na análise de 41 escritórios e a densidade de carga interna foi definida por meio do monitoramento de equipamentos instalados em dois escritórios.

A fim de avaliar o potencial de utilização da ventilação natural em edifícios de escritórios na cidade de São Paulo do ponto de vista do conforto térmico, Figueiredo (2007) simulou um módulo de um modelo de pavimento tipo elaborado com base na literatura.

Westphal (2007) desenvolveu uma metodologia de apoio à calibração de modelos de simulação do desempenho térmico e energético de edificações. O modelo virtual utilizado no estudo para representar um edifício típico de escritórios teve suas características baseadas na pesquisa de campo anteriormente desenvolvida pelo LabEEE (LABEEE, 2005).

De Benedetto e Romero (2008) analisaram o desempenho térmico e energético de edifícios operando primeiramente com o sistema de condicionamento ativo e depois com o modo misto, no clima de São Paulo, comparando o potencial de redução de carga térmica entre sistemas. Para o estudo utilizaram três modelos, dois

deles de mesma geometria, mas com área envidraçadas distintas sendo um deles com proteção solar e o terceiro com geometria diferenciada.

Marcondes (2010) identificou soluções projetuais de fachada para edifícios de escritórios com ventilação natural em São Paulo visando o aprimoramento do desempenho térmico do edifício para o conforto térmico dos ocupantes. A autora utilizou para o estudo dois modelos de edifício escolhidos a partir da bibliografia, com base nas tendências do mercado imobiliário em São Paulo e em exemplos de edifícios de escritórios sustentáveis nas esferas nacional e internacional.

Bessa (2010) propôs uma metodologia de avaliação das emissões de CO₂ geradas durante o ciclo de vida das fachadas de edifícios de escritório. Para aplicar a metodologia proposta em três casos simulados para dois tipos de fachada (*structural glazing* e alvenaria revestida com ACM), o autor definiu um pavimento-tipo de um edifício hipotético na cidade de São Paulo.

Carvalho (2011) utilizou um edifício existente na cidade do Rio de Janeiro como estudo de caso. O edifício foi submetido a alterações hipotéticas de materiais de construção e isolamento por meio de simulação termoenergética utilizando o programa *VisualDOE 2.61*. A autora justificou a escolha do edifício pela facilidade de acesso aos dados técnicos, pela localização, pelas características de mercado para imóveis destinados a empresas de cunho administrativo, por ser ocupado por uma única empresa, por ser provido de alta tecnologia, pelo estilo arquitetônico com fachadas envidraçadas, janelas que não abrem e o fato dele ser totalmente climatizado.

Rupp (2011) utilizou três modelos geométricos para desenvolver um método para pré-dimensionamento de área de janela baseado no consumo de energia elétrica em edificações comerciais com a ventilação híbrida e a iluminação natural integrada ao sistema de iluminação artificial.

Melo, Cóstola, Lamberts e Hensen (2014) investigaram a aplicabilidade de redes neurais artificiais (RNAs) como uma técnica de modelagem substituta para melhorar a precisão de modelos para propostas de rotulagem energética. Assim, aplicaram uma RNA para modelar o estoque de construção de Florianópolis. Entre as categorias contempladas no estudo, estão pequenos escritórios, grandes escritórios

e escritórios verticais. No entanto, os autores reconhecem que o estudo é baseado em várias suposições e que, apesar de adotar um número maior de parâmetros de entrada em relação ao modelo utilizado na regulamentação brasileira, fornece uma descrição limitada do estoque de edifícios da cidade. Enfatizam então, a necessidade de mais trabalhos que objetivem descrever melhor o estoque de edifícios e as tendências em novas construções (MELO *et al.*, 2014).

Andreis (2014) utilizou um modelo de edifício de escritórios como referência para avaliar, por meio de simulação computacional, o desempenho térmico decorrente de diferentes configurações de fachadas envidraçadas em diversas condições bioclimáticas brasileiras. Duarte (2014) fez a comparação do desempenho energético entre dois sistemas de climatização do tipo VAV (*Variable Air Volume*) e dois do tipo VRF (*Variable Refrigerant Volume*) no resfriamento por meio do programa de simulação computacional *EnergyPlus* em uma edificação comercial hipotética na cidade de Florianópolis.

Para definição do edifício referência, o estudo do CBCS (2014) para o desenvolvimento de metodologias para *benchmarks* de edifícios de escritórios corporativos contou com a realização de auditorias energéticas em oito edifícios de alto padrão nas cidades do Rio de Janeiro e São Paulo. Apesar da relevância dos resultados obtidos, a entidade reconhece a insuficiência da amostra para conclusões coerentes acerca do consumo energético da categoria, sendo fundamental o uso da simulação computacional para criação de indicadores (CBCS, 2014).

Um estudo desenvolvido por Pinto (2017) analisou o efeito do uso de vidros insulados no desempenho energético de edificações de escritórios condicionadas artificialmente em nove cidades brasileiras. O modelo de pavimento tipo utilizado para a simulação computacional no *EnergyPlus* foi definido com base na literatura.

As edificações utilizadas por Pirró (2005), Figueiredo (2007), De Benedetto e Romero (2008), Bessa (2010), CBCS (2014) e Duarte (2014) e Pinto (2017), remetem ao modelo utilizado anteriormente por Lam e Hui (1996) em uma análise de sensibilidade do desempenho energético de edifícios de escritório em Hong Kong. Neste estudo, o edifício referência foi construído com base em uma pesquisa piloto aliada ao estudo de construções locais e práticas de engenharia. Também foram feitas

referências a estudos de simulação de energia realizados em outros países com clima semelhante ao de Hong Kong (LAM; HUI, 1996).

Veloso (2017) estudou a influência das decisões de projeto no consumo de energia em torres de edifícios de escritório por meio de uma análise de sensibilidade das variáveis de projeto. Por meio de um banco de dados fornecido pela Prefeitura Municipal de Belo Horizonte foram coletadas informações do IPTU (Imposto Predial e Territorial Urbano) de todas as edificações existentes na cidade, com aprovação de projeto finalizada até o ano de 2011. Com base na disponibilidade de dados de consumo de energia junto à Companhia de Energia de Minas Gerais (CEMIG), a amostra ficou restrita a 101 edificações com, no mínimo, três pavimentos e área bruta superior a 1.000 m². Para a criação de um *benchmarking*, as características do projeto arquitetônico – modo de condicionamento de ar, absorvância solar das paredes, presença de proteção solar, fator solar dos vidros, *WWR*, volume, área de projeção da cobertura, área da envoltória, fator de forma e fator de altura – foram levantados por meio da internet e visitas *in loco*.

Alves (2017) analisou o potencial de economia de energia de edifícios de escritórios na cidade de Belo Horizonte por meio da simulação termoenergética de quatro arquétipos. Conclui que incentivar o uso de sistemas de climatização de modo misto pode ser decisivo para redução do uso de energia no contexto da cidade e encontrou evidências de que a alta eficiência energética dos sistemas individuais de condicionamento de ar não está necessariamente associada ao baixo consumo de energia dos edifícios. O estudo utilizou a abordagem *bottom-up*, sugerindo que ela é capaz de identificar a intensidade de uso de energia de edifícios de referência. A autora enfatizou que é essencial incentivar o desenvolvimento de grandes conjuntos de dados locais para apoiar estudos de *retrofit* do estoque de edifícios existentes.

Brugnera (2018) fez uma avaliação integrada do consumo de energia, impactos ambientais e custos ao longo do ciclo de vida de variados cenários de fachadas para um modelo de edifício de escritórios no Brasil. O edifício virtual foi criado com base nas características geométricas médias coletadas em três fontes distintas: a literatura, um banco de dados comercial e pesquisas com especialistas.

Santesso e Chvatal (2018) avaliaram o impacto de parâmetros arquitetônicos (formato da sala, tamanho e orientação das aberturas) e de uso (densidade de carga de equipamentos e temperatura de acionamento do ar- condicionado) no desempenho energético de salas de escritório climatizadas de modo misto. Os autores definiram cinco modelos de salas de escritório a partir de dados de 55 edifícios constantes na base de dados da empresa Buildings no ano de 2016, na cidade de São Paulo (BUILDINGS, 2020).

O método proposto pelo CB3E (2017) para a avaliação da eficiência energética com base em energia primária de edificações comerciais, de serviços e públicas, utiliza edifícios de referência das principais categorias do setor. No método é estabelecido que a condição de referência possui a mesma forma, orientação solar e pé-direito da edificação a ser avaliada, porém, as demais características construtivas são prefixadas em função do uso (CB3E, 2017).

Coletivamente, esses estudos evidenciam o caráter arbitrário de escolha dos modelos, o que dificulta a generalização dos resultados.

2.3. O USO DO AGRUPAMENTO DE DADOS PARA A IDENTIFICAÇÃO DE EDIFÍCIOS REPRESENTATIVOS

A ideia de agrupar objetos semelhantes para produzir uma classificação é claramente primitiva, e, além de ser uma atividade conceitual humana básica, a classificação também é fundamental para a maioria dos ramos da ciência (EVERITT *et al.*, 2011). Um esquema de classificação pode ser um método conveniente para organizar um grande conjunto de dados, facilitando a compreensão e tornando o processo de recuperação das informações mais eficiente. Se os dados podem ser resumidos de forma válida por um pequeno número de grupos de objetos, os rótulos desses grupos podem fornecer uma descrição muito concisa dos padrões de semelhanças e diferenças nos dados.

A necessidade de resumir os conjuntos de dados dessa forma é cada vez mais importante devido ao número crescente de grandes bancos de dados agora disponíveis em muitas áreas da ciência. A exploração desses bancos por meio de

técnicas de análise multivariada agora é frequentemente chamada de “mineração de dados” (EVERITT *et al.*, 2011).

A maioria dos estudos com foco na identificação de edifícios representativos utiliza abordagens estatísticas. Mas, uma alternativa aos métodos estatísticos é o *clustering* ou clusterização, uma técnica de mineração de dados que permite avaliação simultânea de múltiplas variáveis, agrupando elementos que possuem semelhanças. *Clusters* são conjuntos de dados cujos elementos pertencentes a um mesmo conjunto apresentam maior semelhança entre si do que os elementos pertencentes a qualquer outro conjunto, de acordo com algum critério pré-determinado. Normalmente o critério se baseia em uma função de dissimilaridade, que recebe dois objetos e retorna a distância entre eles (LINDEN, 2009). Então, a clusterização é feita com objetivo de maximizar a homogeneidade dentro de cada *cluster* e maximizar a heterogeneidade entre *clusters*.

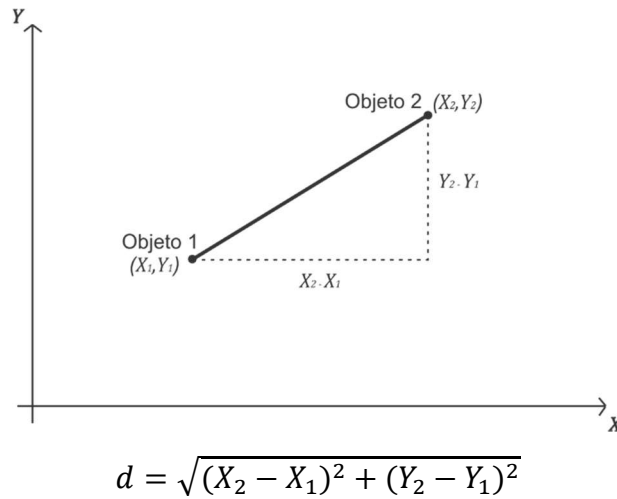
Por se tratar de uma técnica não supervisionada, as informações de associação não são conhecidas ou utilizadas como entrada, então é o algoritmo que reconhece semelhanças e define os *clusters*. Com os agrupamentos definidos, é possível determinar o objeto mais representativo de um determinado grupo. Jain e Dubes (1988) apontam que a utilização da técnica de *clustering* deve seguir os seguintes passos:

1. Definição da forma de representação dos dados de entrada a serem agrupados;
2. Definição de uma medida adequada de proximidade entre os dados;
3. Definição da técnica de *clustering* a ser aplicada para a construção dos *clusters*;
4. Definição de uma abstração dos dados, se necessária;
5. Avaliação do resultado.

A abstração dos dados refere-se a uma forma de representação simples e compacta do conjunto de dados, tanto do ponto de vista humano quanto da máquina. Assim, a representação deve ser intuitiva e de fácil compreensão, mas ao mesmo tempo, permitir um processamento eficiente. Esse seria um passo opcional, não necessariamente planejado e executado.

A medida de proximidade adotada nesta pesquisa é a distância euclidiana. A distância euclidiana é uma medida de dissimilaridade, ou seja, quanto maior a distância euclidiana do centroide do *cluster*, menos parecidos (mais dissimilares) são os edifícios. Ela mede a distância entre dois pontos baseado em suas coordenadas no plano cartesiano, assim a distância geométrica entre os indivíduos pode ser calculada como a hipotenusa de um triângulo retângulo (HAIR *et al.*, 2009), conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3 - Distância euclidiana (d) entre dois objetos medidos sobre duas variáveis, X e Y.



Fonte: Adaptado de HAIR *et al.*, 2009.

A avaliação do resultados também considerada uma etapa opcional, uma vez que a avaliação do desempenho da técnica de *clustering* geralmente se baseia em algum critério específico definido subjetivamente (JAIN; DUBES, 1988).

Esse conceito é generalizado para mais de duas variáveis, sendo a distância euclidiana entre duas observações (i e j) definida como a raiz quadrada do somatório dos quadrados das diferenças entre i e j para todas as p variáveis ($k=1, 2, \dots, p$), conforme equação 1:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (1)$$

Onde d_{ij} é a distância euclidiana, x_{ik} é o valor da variável k referente à observação i e x_{jk} representa a variável k para a observação j .

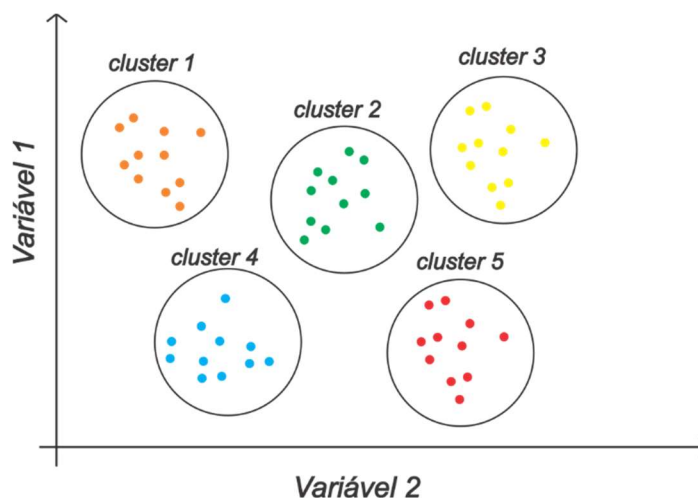
Hair (2009, p.442) define a distância euclidiana quadrada (ou absoluta) como “a soma dos quadrados das diferenças sem calcular a raiz quadrada” apontando que sua utilização acelera sensivelmente o tempo de computação, sendo a distância recomendada para métodos de agrupamento centróide e de Ward. Assim, a distância euclidiana quadrada entre duas observações (i e j) corresponde à soma dos quadrados das diferenças entre i e j para todas as p variáveis:

$$d_{ij}^2 = \sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2 \quad (2)$$

O *clustering* foi aplicado para diferentes finalidades nos estudos de energia em edifícios. É possível resumir o trabalho de pesquisa neste campo em cinco principais áreas de interesse: *benchmarking* de edifícios, perfil de energia, identificação de edifícios representativos, modelagem preditiva e outras áreas relacionadas principalmente ao comportamento dos ocupantes (TARDIOLI *et al.*, 2018).

Para identificação de edifícios referência, o algoritmo de clusterização mais utilizado na literatura é o *k-means* ou k-média. Ele se chama assim porque encontra k *clusters* distintos no conjunto de dados, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Agrupamento de dados por meio do algoritmo *k-means*.



O centro de cada *cluster* se chama centroide e representa a média dos valores contidos neste *cluster*. O número *k* de *clusters* é definido pelo usuário e as posições iniciais para os *k* centroides podem ser selecionados aleatoriamente dentro do conjunto de dados. Então, cada *cluster* é definido pelo centroide e cada objeto será associado ao *cluster* mais próximo, considerando a distância euclidiana entre eles. Depois disso, os centroides dos *clusters* são recalculados a partir da média entre todos os objetos atribuídos a ele. Uma nova rodada de cálculo das distâncias recomeça considerando a alteração do centroide do *cluster*, e o cálculo das distâncias segue até que os *clusters* se tornem estáticos. Isso acontece quando nenhum dos pontos de dados muda de *cluster*.

Para avaliação do resultado, a forma mais simples de verificar a “qualidade” dos *clusters* é medindo distâncias *inter-clusters* (entre os clusters) e *intra-cluster* (entre os objetos do *cluster*). Ou seja, quanto maior a distância euclidiana entre os centroides dos *clusters*, mais precisa foi a classificação e quanto mais próximos os objetos estiverem do centroide do *cluster*, maior é a similaridade entre eles.

A Tabela 2 mostra uma síntese de estudos para identificação de edifícios representativos utilizando técnicas de *clustering*.

Tabela 2 - Revisão de literatura sobre métodos de agrupamento aplicados em estudos de energia para identificação de edifícios representativos de uma categoria de edifícios.

Referência	Categoria	Algoritmo utilizado	nº de edifícios	Escala
(ARAMBULA LARA; CAPPELLETTI; GASPARELLA, 2014)	Escolas	K-means	60	Regional
(DEB; LEE, 2018)	Escritórios	K-means	56	Urbana
(FAMUYIBO; DUFFY; STRACHAN, 2012)	Residencial	-	150	Nacional
(GAITANI <i>et al.</i> , 2010)	Escolas	K-means	1110	Nacional
(GANGOLELLS <i>et al.</i> , 2020)	Escritórios	K-means	6083	Regional
(GHIASSI; MAHDAVI, 2017)	Várias	Vários	750	Urbana
(PIERI; TZOUVADAKIS; SANTAMOURIS, 2015)	Hotéis	K-means	35	Regional
(SCHAEFER; GHISI, 2016)	Residencial	Hierárquico K-means	103	Urbana
(TARDIOLI <i>et al.</i> , 2018)	Uso misto	Hierárquico K-means	9500	Urbana
(LV <i>et al.</i> , 2019)	Comercial	K-means	200	Regional
(LEDESMA; PONS-VALLADARES; NIKOLIC, 2021)	Escolas	K-means	427	Urbana

Gaitani *et al.* (2010) criaram uma ferramenta de classificação do uso de energia por meio de técnicas de agrupamento, usando os dados coletados sobre o consumo para aquecimento de 1100 edifícios escolares gregos. Cinco classes de consumo foram definidas por meio do algoritmo *k-means*. Para avaliar o potencial de conservação de energia, as características típicas dos edifícios escolares pertencentes a cada classe energética foram identificadas por meio de uma técnica de análise multivariada, a análise de componentes principais (PCA).

Famuyibo, Duffy e Strachan (2012) apresentaram uma metodologia para o desenvolvimento de edifícios representativos com base em informações da literatura e uma amostra de dados detalhados de energia para o setor de habitação irlandês. A análise de agrupamento foi usada para identificar 13 edifícios representativos da categoria.

Arambula Lara *et al.* (2014) utilizaram a análise de *cluster* pelo algoritmo *k-means* para encontrar edifícios escolares representativos a partir de uma amostra de 59 escolas na província de Treviso, Nordeste da Itália. O estudo foi realizado com base nos dados de consumo de energia e dados de temperatura para um período de cinco anos. As características geométricas e da envoltória de cada escola e dos sistemas instalados também eram conhecidas. A análise resultou na identificação de 3 *clusters*.

Pieri *et al.* (2015) apresentaram os resultados de uma auditoria energética realizada em uma amostra de 35 hotéis na região de Attica, na Grécia. Os hotéis foram classificados em 3 *clusters*, com base nos dados coletados sobre o aquecimento, resfriamento e consumo de eletricidade da amostra. Foi possível concluir que os hotéis de grande porte têm um consumo de energia primária por m² e por noite muito menor do que os hotéis de médio e pequeno porte, e que os hotéis de pequeno porte têm um consumo de energia primária/m² e noite maior do que os hotéis de médio porte.

Schaefer e Ghisi (2016) determinaram modelos de referência de habitações populares unifamiliares na região de Florianópolis para estudos de desempenho termoenergético. A partir da análise de uma amostra de 103 habitações foram identificados dois modelos relacionados à forma. Quanto aos materiais e sistemas

construtivos, foram identificados três modelos distintos a partir da amostra de 106 habitações. Os autores utilizaram técnicas hierárquicas (algoritmo *Ward*) para determinação da quantidade de agrupamentos a serem formados e não hierárquicas (*k-means*) para formação final dos agrupamentos. O edifício típico, definido como o edifício mais próximo do centro de cada *cluster*, foi selecionado como o representante do *cluster*.

Ghiassi e Mahdavi (2017) desenvolveram um *plug-in* de código aberto para uma plataforma GIS (*Geographic Information System*), que utilizou os dados disponíveis em grande escala para gerar uma representação em termos de consumo de energia do estoque edificado da cidade austríaca de Viena. A análise de agrupamento multivariada foi utilizada para a identificação de edifícios representativos e três algoritmos foram investigados quanto à sua eficiência para o propósito da pesquisa: agrupamento hierárquico aglomerativo, *k-means* e agrupamento baseado em modelo. Os dois primeiros métodos estão entre os algoritmos mais usados na análise de *cluster* multivariada e o terceiro é adotado devido à sua abordagem única para a determinação do número ótimo de *clusters*.

Deb e Lee (2018) identificaram 14 variáveis de construção a partir da análise de relatórios de auditoria energética relativos a dados pré e pós-retrofit de 56 edifícios de escritórios em Cingapura. A análise de agrupamento foi utilizada para testar todas as combinações das 14 variáveis em relação à mudança na intensidade do uso de energia (EUI, medido em kWh /m². ano). Os resultados do estudo indicaram que as principais variáveis que influenciam o consumo de energia em edifícios de escritórios com ar-condicionado em Cingapura são: a) a área bruta de piso, b) a eficiência média da central de água gelada e c) a capacidade instalada dos resfriadores.

Tardioli *et al.* (2018) identificaram 67 edifícios representativos no conjunto de 9500 edifícios de uso misto na cidade de Genebra por meio de técnicas de agrupamento. A análise considerou 9 características do edifício, 3 categorias de edifício diferentes e 10 períodos de construção. Os resultados do agrupamento foram vinculados ao GIS, o que fornece uma ferramenta de modelagem para localizar dados espaciais importantes como, por exemplo, levantamentos no local e dados meteorológicos.

Lv *et al.* (2019) definiram três modelos de construções comerciais típicas na região do Delta do Rio das Pérolas, sul da China. Foram coletadas informações de 200 edificações comerciais, incluindo o tamanho, forma, orientação, parâmetros térmicos do envelope, bem como a distribuição espacial interna desses edifícios. Uma análise de agrupamento por *k-means* foi aplicada em diferentes fatores de projeto de construção para determinar valores representativos. Dentro da categoria comercial, os autores ainda identificaram as composições mais comuns entre os três modelos (shopping, hotel e edifício de escritórios): escritório-hotel, escritório-shopping e hotel-shopping.

Gangolells *et al* (2020) aplicaram o método de agrupamento *k-means* ao banco de dados de certificados de desempenho energético gerido pelo Instituto Catalão de Energia (ICAEN) com objetivo de identificar edifícios representativos para análise de *retrofit*.

Ledesma *et al.* (2021) propuseram um modelo *bottom-up* para estimar a demanda final de energia para estoques de edifícios educacionais. Concluíram que, em Barcelona, dois edifícios de referência representam 62% do estoque de escolas edificado, com uma demanda final de energia de 15,96 GWh/ano. Para Quito, foram definidas também duas escolas, que descrevem todo o estoque educacional da cidade com uma demanda final de energia de 29,83 GWh/ano.

É consenso na literatura que a metodologia de agrupamento parece ser promissora na classificação energética de grandes parques imobiliários. Desse modo, os resultados da avaliação e as informações coletadas podem ser usados para identificar as melhores práticas e definir metas de desempenho energético do parque edificado (ARAMBULA LARA; CAPPELLETTI; GASPARELLA, 2014; GHIASSI; MAHDAVI, 2017).

2.4. FERRAMENTAS PARA CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA DE EDIFÍCIOS

No Brasil, não estão disponíveis normas técnicas específicas para eficiência energética em edificações e a avaliação da eficiência energética de edificações é feita

por meio do Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBE Edifica), atualmente de aplicação compulsória para edificações públicas federais novas ou que recebam *retrofit* (BRASIL, 2014).

No âmbito das construções por iniciativa privada a certificação ainda é voluntária e faz-se necessário buscar as razões da baixa adesão a ela. Enquanto os Estados Unidos e países da União Europeia possuem avançados programas de avaliação energética de edifícios com sucesso refletido no número expressivo de certificados expedidos, no Brasil, o PBE Edifica soma menos de 6 mil certificados emitidos desde sua implantação em 2009. Dentre as edificações comerciais, de serviços e públicas, até o final do mês de maio de 2022 foram avaliadas 226 edificações e emitidas 291 etiquetas: 176 de projeto e 115 de edificação construída. Dentre as edificações residenciais, para o mesmo período, foram emitidas 5.128 etiquetas. Na fase de projeto, foram 17 etiquetas nas áreas de uso comum, 44 etiquetas multifamiliar e 2.676 etiquetas de unidades habitacionais. Para as edificações construídas, foram 6 etiquetas de uso comum, 19 etiquetas multifamiliar e 2.366 etiquetas de unidades habitacionais. (PROCEL, 2022) . Portugal, já possui mais de 1,7 milhão de certificados de eficiência energética expedidos por meio do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), com uma média de 195.866 certificados expedidos por ano, considerado o período de 2014 a 2022 (SCE, 2022).

Uma alternativa para analisar o desempenho energético dos edifícios é a utilização de programas de simulação. De acordo com Nguyen et al. (2014), o *EnergyPlus* é provavelmente o programa de simulação mais utilizado para a pesquisa em matéria de otimização do uso de energia em edifícios. Diversos estudos comprovam sua confiabilidade na previsão do desempenho energético de edifícios e instalações (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014).

No entanto, apesar de serem ferramentas de grande valia, tanto os softwares de simulação como os programas de certificação não fazem parte da rotina de trabalho dos profissionais de arquitetura e engenharia no Brasil devido à complexidade de manipulação e de aplicação. As simulações são realizadas por meio de entradas de texto e a visualização dos resultados não facilita a sua análise e interpretação,

demandando muitas horas de trabalho. O mercado demanda um método de estimar o consumo de energia de edifícios de forma rápida e de baixo custo.

2.5. IMPLICAÇÕES DO ENTORNO URBANO NO CONSUMO DE ENERGIA DO EDIFÍCIO

Como consequência da rápida urbanização nos países em desenvolvimento, o interesse pelo microclima em torno de edifícios em áreas urbanas aumentou porque afeta, entre outras coisas, o conforto térmico externo e interno, o uso de energia para aquecimento e resfriamento e a dispersão da poluição do ar (JOHANSSON, 2006).

A interação entre contextos urbanos e edifícios em estudos de energia ainda está em discussão e é um campo importante nos estudos relacionados ao desempenho energético dos edifícios. Surgem novas oportunidades de pesquisa a partir do direcionamento da problemática para condições que anteriormente eram passíveis de simplificação, dentre as quais o detalhamento do entorno dos edifícios se manifesta com grande significância (SREBRIC; HEIDARINEJAD; LIU, 2015).

Orioli *et al.* (2012) expõem que em processos de *retrofit* de edificações as análises de eficiência energética geralmente levam em conta o edifício isolado, desconsiderando a influência que o entorno possui na insolação das fachadas. Concluem que isso se deve às dificuldades de descrever os objetos do entorno com precisão (ORIOLI; GANGI, 2012). Estudos recentes têm explorado a influência da geometria de cânions urbanos, do sombreamento e das ilhas de calor no consumo de energia a nível urbano.

Pisello *et al.* (2014) propuseram um método para avaliar o efeito de sombreamento mútuo e a magnitude deste efeito na predição do desempenho energético do edifício. Dois edifícios na cidade de Nova York foram avaliados com contextos urbanos variados, a fim de avaliar o que os autores nomeiam de “efeito entre edifícios”. A análise apontou que negligenciar o contexto urbano na modelagem de edifícios gera uma imprecisão de 9,6% a 71,9% na análise do desempenho energético (PISELLO, 2014). Em um estudo anterior, Pisello *et al.* (2012) compararam por meio de simulações uma edificação com e sem edificações vizinhas, verificando maior

imprecisão na previsão anual de energia para um contexto climático mais quente. O estudo mostrou que os dois principais parâmetros que influenciam o consumo de energia, quando considerado o fator ambiente urbano, são o sombreamento e a reflexão solar (PISELLO *et al.*, 2012).

Srebric *et al.* (2015) fizeram uma revisão crítica sobre a influência do entorno dos edifícios no consumo de energia e fluxos de ar em bairros urbanos. Constataram que os padrões de consumo de energia dos edifícios localizados em centros urbanos densos são altamente dependentes da vizinhança circundante, enquanto nas regiões suburbanas/rurais de baixa densidade, os padrões de consumo são semelhantes ao de um edifício isolado.

Ichinose *et al.* (2017) estudaram cinco grandes municípios na zona de verão quente e inverno frio da China (Xangai, Wuhan, Changsha, Chengdu e Chongqing). Na região de estudo, a construção residencial geralmente toma a forma de grupos de prédios de apartamentos, construídos com seis andares e dispostos em filas paralelas geralmente orientados ao sul. Ao avaliar os efeitos do sombreamento do entorno no consumo de eletricidade para resfriamento e aquecimento de ambientes, concluíram que o sombreamento causa reduções de 10 a 20% na demanda de resfriamento ambiente no verão, e aumenta em até 20% a demanda de aquecimento ambiente no inverno. Em Xangai e Wuhan, esses dois efeitos se contrapuseram, mas em Changsha, Chengdu e Chongqing, o efeito do aumento da demanda de aquecimento no inverno era quase imperceptível. Os resultados evidenciam a necessidade da regionalização dos estudos, enfatizando que a distância entre edifícios é fator primordial de análise (ICHINOSE; LEI; LIN, 2017).

Machado (2019) avaliou o impacto da radiação de onda longa e do clima urbano sobre o desempenho energético de edifícios de escritórios condicionados artificialmente, considerando o clima da cidade de Santa Maria, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Uma amostra de 1000 edifícios de escritórios foi submetida à simulação computacional para comparação de quatro métodos de modelagem distintos. O estudo apontou que o efeito da ilha de calor promove um aumento na carga térmica de resfriamento na ordem de 5% a 59%, com erro médio de 24%. A absorvância do pavimento foi o parâmetro com maior índice de sensibilidade, seguido

das características volumétricas do entorno urbano e do fator solar das janelas do escritório. O autor concluiu que, quando o ganho por radiação solar é menor, as variações percentuais na carga térmica são maiores (MACHADO, R. M. e S., 2019).

Lima *et al.* (2019) avaliaram a influência da geometria do ambiente urbano na carga térmica de edifícios de escritórios em uma cidade com clima quente e úmido. Simulações dinâmicas do uso de energia foram realizadas pela modelagem da geometria do entorno e considerando o efeito das ilhas de calor (UHI). O efeito de ilhas de calor (*Urban Heat Island*) é um fenômeno típico de grandes cidades. Caracteriza-se pela elevação das temperaturas médias nos ambientes urbanos e concentração do calor produzido nas superfícies, causada pela dificuldade de dissipação para as camadas mais elevadas da atmosfera. Quando o ambiente urbano foi considerado nas simulações energéticas, foram observadas reduções médias na carga térmica de 16 a 18%, destacando a importância dessa abordagem (LIMA; SCALCO; LAMBERTS, 2019). O sombreamento foi o principal fator relacionado a essa redução.

Liu *et al* (2021) estudaram o impacto do sombreamento no consumo de energia de edifícios próximos usando um método paramétrico que envolveu 93114 simulações, considerando sete cidades em quatro zonas climáticas da China. Os parâmetros de características climáticas e informações de localização geográfica das cidades foram usados como entrada para a simulação para obter um modelo de regressão que pudesse ser aplicado na maioria das áreas da China para prever o efeito de sombreamento. Os resultados demonstram que a influência do sombreamento varia significativamente em diferentes cenários, e as cargas de resfriamento podem ser superestimadas em até 45% e a carga de aquecimento subestimada em até 21% em algumas cidades (LIU *et al.*, 2021).

Machado *et al.* (2022) analisaram a influência da forma urbana sobre o microclima nos bairros de Copacabana, Ipanema e Ramos, na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. O artigo confirmou que a morfologia urbana interfere diretamente no microclima urbano, contribuindo para escolhas de desenho urbano para projetos de novos bairros considerando o clima local (MACHADO, P. E. *et al.*, 2022)..

Frequentemente os modeladores consideram a edificação desprovida de um contexto adjacente para estudos de energia, sendo questionável a precisão do resultado obtido na modelagem, uma vez que o contexto urbano tem impacto significativo sobre o consumo energético dos edifícios (ALLEGRIINI; DORER; CARMELIET, 2012).

No entanto, há de se considerar que a morfologia urbana inclui uma combinação de fenômenos complexos e diversos, interagindo em escalas do corpo humano ao tamanho da cidade. Portanto, é crucial simplificar a característica física e a escala do assunto investigado. Assim, a identificação de um modelo adequado se dá de acordo com o objetivo definido de forma a minimizar as complexidades e custos computacionais do estudo (MIRZAEI, 2015). Srebric *et al.* (2015) sugerem que uma simulação de modelagem integrada do ambiente construído deve começar a partir da escala do bairro em vez da escala da cidade.

A orientação do edifício é um parâmetro importante que tem uma estreita relação com a radiação solar, com a área de sombreamento e com a incidência de vento em uma comunidade. Além disso, outros parâmetros desempenham um papel significativo, não podendo, na maioria dos estudos, serem desprezados.

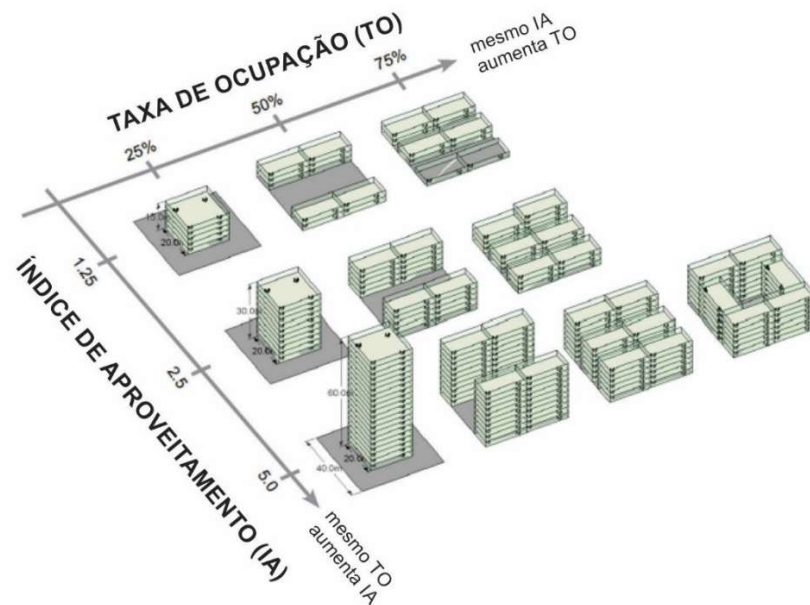
A razão entre a altura do edifício (H) e a largura da rua (L_r) determina o sombreamento próximo aos edifícios. O *sky view fator* (SVF), descrito como “fator de visão do céu”, é decidido pelas entidades vizinhas, incluindo edifícios e vegetação próximos, como um indicador de diferentes formas de comunidade, para ilustrar o efeito de sombreamento na temperatura média de radiação. Ambos os parâmetros representam a relação entre a localização do edifício e o entorno com relação à radiação solar. Quanto maior o H/L_r , menor o SVF, o que significa que o efeito de sombreamento é mais forte, resultando em uma diminuição da radiação solar que atinge o solo e afeta o ambiente térmico dos cânions urbanos (LIU *et al.*, 2021).

Existem outros parâmetros de índices que descrevem a relação entre a morfologia do edifício (altura, largura e comprimento do edifício) e o entorno (largura e comprimento da rua) em vários níveis. O índice de aproveitamento (IA) é um desses parâmetros, sendo a razão entre a área construída e a área do lote. O maior valor de

IA indica maior volume do edifício. A taxa de ocupação (TO) é a relação entre a área de projeção do edifício e a área do lote.

Cenários onde o IA é o mesmo, mas o TO é diferente, produzirão vários modelos de edifícios, baixos ou arranha-céus, que podem ser dispostos em layouts distintos na malha urbana. Esses layouts têm influência significativa no efeito de sombreamento, conforme pode ser constatado na Figura 5.

Figura 5 - Relação entre IA e TO.



Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2021)

Alguns estudos avaliaram uma variedade de layouts de quadras para avaliação do impacto na demanda de energia dos edifícios por meio de métodos de simulação dinâmica. Vartholomaios (2017) considerou a altura e comprimento do edifício, a distância entre edifícios e a orientação solar em 360 layouts diferentes e concluiu que H/L é um índice crucial para avaliação do consumo de energia dos edifícios na zona climática do Mediterrâneo (VARTHOLOMAIOS, 2017). Na mesma linha, Mangan *et al.* (2021) analisaram três formas urbanas (pavilhão retangular, laje retangular e pavilhão quadrado) em 120 cenários para o clima de Istambul. Os resultados do estudo indicaram que a altura do edifício e a relação H/L desempenham

um papel mais significativo do que a orientação solar no desempenho energético e econômico dos edifícios (MANGAN *et al.*, 2021).

Embora vários esforços de pesquisa recentes tenham se concentrado no edifício e seu ambiente circundante, não foi estudado um método sistêmico de análise do impacto do entorno nas previsões de desempenho energético dos edifícios (LIU *et al.*, 2021).

2.6. A ANÁLISE DIMENSIONAL COMO MÉTODO DE CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA DE EDIFÍCIOS

O potencial do uso de modelos estatísticos na avaliação do consumo total de energia em edifícios é claro, tanto em nível individual quanto para o parque imobiliário como um todo. No entanto, uma pré-condição para a operacionalidade dessas metodologias é a definição clara do alvo de análise e a disponibilidade de uma base de dados adequada, na qual seja possível detectar os fatores de influência necessários para a avaliação (YOSHINO; HONG; NORD, 2017).

Entre os modelos estatísticos utilizados na avaliação do consumo de energia de edifícios, os modelos de regressão têm destaque nas pesquisas, variando de regressão linear simples a redes neurais complexas. No entanto, muitas vezes, aumentar a complexidade do modelo não aumenta a precisão da previsão e, mesmo ao usar ferramentas estatísticas, o significado físico dos parâmetros não deve ser esquecido (YOSHINO; HONG; NORD, 2017).

Neste contexto surge a possibilidade de utilização da análise dimensional como método para avaliação do consumo de energia de edifícios. A análise dimensional torna-se bastante adequada para tratar o problema por sua universalidade de aplicação (GIBBINGS, 2011).

A análise dimensional parte do conceito de dimensão de uma grandeza. Chama-se de grandeza tudo aquilo que pode ser medido (por exemplo: massa, tempo, velocidade, potência, temperatura etc.). Ela possibilita a identificação de grandezas e suas respectivas unidades de medida, a verificação da homogeneidade de equações e previsão de expressões matemáticas a partir de conclusões experimentais.

Na física não se deve somar, subtrair, igualar ou comparar quantidades com dimensões diferentes ou quantidades com a mesma dimensão e unidades de medida diferentes. Então, a adição de quantidades físicas só é verdadeira quando as dimensões e as unidades são idênticas. Segue-se que uma igualdade está sob as mesmas restrições. Este é o princípio da homogeneidade dimensional, que embora simples, é a base do desenvolvimento da análise dimensional (GIBBINGS, 2011).

É importante enfatizar a diferença entre os termos “unidade” e “dimensão”: as dimensões são propriedades intrínsecas das grandezas físicas, enquanto as unidades de medida são convenções utilizadas para descrever as dimensões de uma grandeza. Por exemplo, o metro é uma unidade para medir um comprimento L, não o comprimento em si (TRANCANELLI, 2016).

As grandezas podem ser classificadas em fundamentais ou derivadas. O Sistema Internacional de Unidades (SI) lista sete grandezas fundamentais, apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Grandezas fundamentais de acordo com o Sistema Internacional de Unidades.

Grandeza	Unidade	Símbolo	Dimensional
Comprimento	Metro	m	L
Massa	Quilograma	Kg	M
Tempo	Segundo	s	T
Intensidade de corrente elétrica	Ampere	A	I
Temperatura	Kelvin	K	θ
Intensidade luminosa	Candela	Cd	I_0
Quantidade de matéria	mol	Mol	N

Fonte: ALVES; ROCHA, 2019

Todas as outras grandezas são descritas como derivadas, ou seja, podem ser expressas em termos de operações entre as grandezas fundamentais e medidas utilizando unidades derivadas, definidas como produtos de potências de unidades de base. Por exemplo, a unidade de medida Watt (W), pode ter suas dimensões fundamentais extraídas da seguinte forma:

$$Watt (W) = \frac{Joule (J)}{segundo (s)} \quad (3)$$

Considerando que:

$$J = \frac{kg \cdot m^2}{s^2} \quad (4)$$

Tem-se que,

$$W = \frac{kg \cdot m^2}{s^2} \cdot \frac{1}{s} \quad (5)$$

De onde se extraem as dimensões fundamentais de massa (kg), comprimento (m) e tempo (s).

$$W = \frac{kg \cdot m^2}{s^3} = ML^2T^{-3} \quad (6)$$

Assim, as dimensões fundamentais de uma grandeza podem ser deduzidas de suas unidades de medida. Podem também ser encontradas na literatura, conforme ilustra a Tabela 4.

Tabela 4 - Dimensões e unidades de grandezas conforme Sistema Internacional de Unidades.

Quantidade física	Unidade de medida	Dimensões
Comprimento	<i>M</i>	<i>L</i>
Massa	<i>Kg</i>	<i>M</i>
Tempo	<i>S</i>	<i>T</i>
Velocidade	<i>m/s</i>	<i>LT⁻¹</i>
Aceleração	<i>m/s²</i>	<i>LT⁻²</i>
Força	<i>kg m/s²=N</i>	<i>MLT⁻²</i>
Potência	<i>kg m/s³=J/s = W</i>	<i>ML²T⁻³</i>
Pressão	<i>kg m/s²= N/m²</i>	<i>ML⁻¹T⁻²</i>
Viscosidade (μ)	<i>kg m/s²=N s/ m²</i>	<i>ML⁻¹T⁻¹</i>

Fonte: Adaptado de GIBBINGS (2011)

Com base nas dimensões fundamentais a análise dimensional é utilizada para expressar matematicamente uma relação entre as variáveis envolvidas em uma situação física (ALMEIDA *et al.*, 2018).

Nessa pesquisa será utilizado o sistema M, L, T (massa, comprimento, tempo), pois, ao analisar as unidades de medida de cada variável, é possível afirmar que as grandezas físicas envolvidas no consumo de energia em edifícios podem ser expressas utilizando essas três dimensões.

2.6.1. Procedimentos de cálculo na teoria adimensional

A análise dimensional consiste no estudo das variáveis e constantes de um problema em relação às suas dimensões fundamentais para obtenção de um conjunto completo de produtos adimensionais independentes que possibilitem a produção de uma equação dimensionalmente homogênea (BRIDGMAN, 1922).

Normalmente, o teorema π de Buckingham fornece uma boa estratégia generalizada para alcançar a solução de problemas (BUCKINGHAM, 1914). Segundo este teorema, qualquer relação física entre variáveis dimensionais, pode ser equacionada como uma relação entre variáveis adimensionais colocadas na forma de uma equação genérica do tipo:

$$\varphi(\pi_1, \pi_2, \pi_3 \dots, \pi_{m-n}) = 0 \quad (7)$$

Onde os π 's são produtos adimensionais.

O teorema π de Buckingham diz quantas variáveis adimensionais são requeridas para um dado conjunto de variáveis dimensionais do problema: o número de produtos adimensionais completos e independentes (N_p) é igual ao número de variáveis e constantes dimensionais (N_v) menos o número de dimensões (N_d) necessárias para expressar suas fórmulas dimensionais (BUCKINGHAM, 1914).

$$N_p = N_v - N_d \quad (8)$$

No caso comum de múltiplos produtos adimensionais independentes, para resolver os valores dos produtos é necessário estabelecer variáveis repetitivas ou fundamentais. O número de variáveis repetidas deve ser igual ao número de

dimensões do problema, e as dimensões de qualquer variável repetida selecionada não devem ser um múltiplo de outra variável repetida ou a soma de quaisquer outras variáveis repetidas (BUCKINGHAM, 1914). Uma maneira de verificar se as variáveis repetidas selecionadas são viáveis é por meio de uma matriz onde as linhas são as dimensões e as colunas são as variáveis, se o determinante da matriz não for zero as variáveis selecionadas podem ser usadas como variáveis repetidas (LEMONS, 2017).

Em termos da álgebra linear, diz-se que uma matriz com determinante nulo é equivalente a dizer que pelo menos uma das linhas da matriz pode ser obtida a partir de operações algébricas com as demais linhas, e, portanto, essa linha não traz informações adicionais ao problema.

Com as variáveis de repetição selecionadas, os produtos adimensionais restantes podem ser encontrados formando sistemas lineares individuais com cada um dos produtos adimensionais restantes e as variáveis de repetição (LEMONS, 2017).

Deve-se ressaltar que a análise dimensional permite uma série de manipulações, desde que os grupos π permaneçam adimensionais (ALMEIDA *et al.*, 2018). Em geral, a equação definidora pode ser expressa, por exemplo, como:

$$\varphi(\pi_1, \pi_2, (\pi_3)^i \dots, \exp(\pi_{m-n})) = 0 \quad (9)$$

Ou seja, ao invés de utilizar as variáveis diretamente, pode-se usar funções das variáveis envolvidas. No exemplo, usou-se a potência i da variável π_3 , e a função exponencial da variável π_{m-n} .

Considerando um problema exemplo com as variáveis v_1, v_2, v_3, v_4 , tem-se que a solução deste problema é uma função das variáveis envolvidas, então:

$$solução = f(v_1, v_2, v_3, v_4) \quad (10)$$

Essa é uma equação física do problema, supondo que cada uma das variáveis v_1, v_2, v_3, v_4 contém as dimensões fundamentais (M, L e T) conforme segue:

$$v_1 = M^1.L^2.T^1 \quad (11)$$

$$v_2 = M^1.L^2.T^0 \quad (12)$$

$$v_3 = M^0.L^2.T^0 \quad (13)$$

$$v_4 = M^0.L^0.T^1 \quad (14)$$

A partir disso é possível extrair as seguintes informações:

a) O número de dimensões fundamentais do problema (N_d) é 3, pois as variáveis v_1, v_2, v_3, v_4 contêm as dimensões massa (M), comprimento (L) e tempo (T);

b) O número de variáveis do problema (N_v) é 4 (v_1, v_2, v_3, v_4).

c) O número total de grupos adimensionais ($\pi's$), dado por ($N_v - N_d$), é 1.

Os produtos adimensionais $\pi's$ são construídos a partir dos produtos dos expoentes das variáveis v . O primeiro grupo π necessita ($N_d + 1$) variáveis, sendo que restarão $N_v - (N_d + 1)$ variáveis para formação dos demais grupos $\pi's$.

No exemplo temos apenas um grupo adimensional, tem-se que $f(\pi_1) = 0$, consequentemente, $\pi_1 = M^0 L^0 T^0$, ou $\pi_1 = 1$. No entanto, se houverem mais grupos π , utiliza-se uma função dos produtos de todos os $\pi's$.

Tomando v_1 como variável repetida, a partir dos expoentes das variáveis v se realiza operação algébrica simplificada, igualando os expoentes em ambos os lados da equação da seguinte forma:

$$M^0 L^0 T^0 = [v_1]^1 \cdot [v_2]^x \cdot [v_3]^y \cdot [v_4]^z = 1 \quad (15)$$

Ou, substituindo as variáveis por suas respectivas dimensões fundamentais, conforme equações 11 a 14, tem-se:

$$M^0 L^0 T^0 = [ML^2T]^1 \cdot [ML^2]^x \cdot [L^2]^y \cdot [T]^z \quad (16)$$

Igualando os expoentes separadamente, por grandeza fundamental (M , L e T), formam-se três equações lineares que, quando solucionadas, resultam nos valores dos expoentes x , y e z . O procedimento pode ser sumarizado conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Sistema linear de π_1 organizado por dimensão.

Dimensão	Equação	Solução
M	$1+x+0y+0z=0$	$x=-1$
L	$2+2x+2y+0z=0$	$y=0$
T	$1+0x+0y+1z=0$	$z=-1$

Encontrados os expoentes x , y e z das dimensões M , L e T de cada variável v , tem-se:

$$M^0 L^0 T^0 = [v_1]^1 \cdot [v_2]^{-1} \cdot [v_3]^0 \cdot [v_4]^{-1} \quad (17)$$

Consequentemente:

$$1 = \frac{v_1}{v_2 \cdot v_4} = \pi_1 \quad (18)$$

Ou seja,

$$v_1 = v_2 \cdot v_4 \quad (19)$$

Pode-se resumir o procedimento nos seguintes passos:

- 1) Listar e contar o número de variáveis (N_v) envolvidas no problema;
- 2) Listar as dimensões de cada variável de acordo com as grandezas fundamentais;
- 3) Calcular o número de produtos adimensionais conforme a equação 8;
- 4) Selecionar uma variável para iteração no primeiro grupo π . Selecionar as variáveis que serão repetidas para os demais grupos π 's. Os demais grupos serão uma função das variáveis repetidas com as outras variáveis até que se chegue em $N_v - N_d$ grupos π 's.

- 5) Agora é possível encontrar algebricamente os expoentes x, y e z das grandezas fundamentais (M, L e T) de cada variável que tornam o produto adimensional.
- 6) Finalmente, a solução do problema pode ser equacionada considerando os expoentes encontrados.

A expressão resultante pode então ser usada para obter efetivamente qualquer fator desconhecido de resultados experimentais.

A análise dimensional é uma ferramenta poderosa que tem sido amplamente utilizada em diversas áreas do conhecimento. É frequentemente utilizada para estudar processos termodinâmicos, permitindo que sejam feitas previsões sobre a relação entre diferentes propriedades. No estudo de Lee (2013), por exemplo, foi utilizada para otimizar o projeto de dispositivos termoelétricos.

Kazemi e Barati (2022) usaram a análise dimensional para prever o desempenho de máquinas usadas para perfuração de túneis a partir de um banco de dados de um projeto de escavação mecanizada de túneis de transporte de água de Queens. O método proposto apresentou resultados 21,7% melhores do que o melhor modelo existente (KAZEMI; BARATI, 2022).

Sun (2022) utilizou a análise dimensional para estudar comportamentos térmico-mecânicos de materiais semelhantes ao concreto em temperaturas elevadas, comprovando que o método pode ser utilizado com alta eficiência computacional.

Ciulla, D'Amico e Brano (2017) utilizaram a análise dimensional como alternativa para simplificar o cálculo da demanda de energia para aquecimento de edifícios. Foram simulados 13 modelos de edifícios com diferentes fatores de forma, localizados em três cidades diferentes de sete países europeus, o que resultou em 273 casos de estudo agrupados em 3 grupos. Dentre as correlações descobertas, assumindo que uma boa aproximação da demanda de energia para aquecimento está na faixa de $\pm 7 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ ano})$ em relação ao valor calculado pelo programa de simulação TRNSYS, os autores identificaram três regiões diferentes que superestimam, subestimam ou estimam de forma ótima a demanda de energia para aquecimento dos edifícios.

Os exemplos mostram como a análise dimensional é uma ferramenta útil e versátil, passível de aplicação em diversas áreas do conhecimento para entender e modelar fenômenos complexos e resolver problemas práticos. Nesta pesquisa a análise dimensional será utilizada para analisar a correlação entre as variáveis associadas ao consumo de energia de um edifício, com o intuito de formular uma equação que possa prever o consumo de energia independentemente da forma ou tamanho do edifício.

CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo descreve o método geral desenvolvido para identificar e analisar o consumo de energia de uma categoria de estoque de edifícios existentes. O método é apresentado no fluxograma (Figura 6), onde é possível identificar cinco etapas principais: (1) formatação da base de dados, (2) descrição do estoque de edifícios comerciais de escritórios de Florianópolis e utilização da análise de agrupamento para método para obtenção de edifícios de referência, (3) simulação termoenergética dos arquétipos para estimativa do consumo de energia, (4) apresentação de um novo método para predição do consumo de energia de edifícios, e (5) inclusão dos parâmetros urbanos na equação para cálculo do consumo de energia.

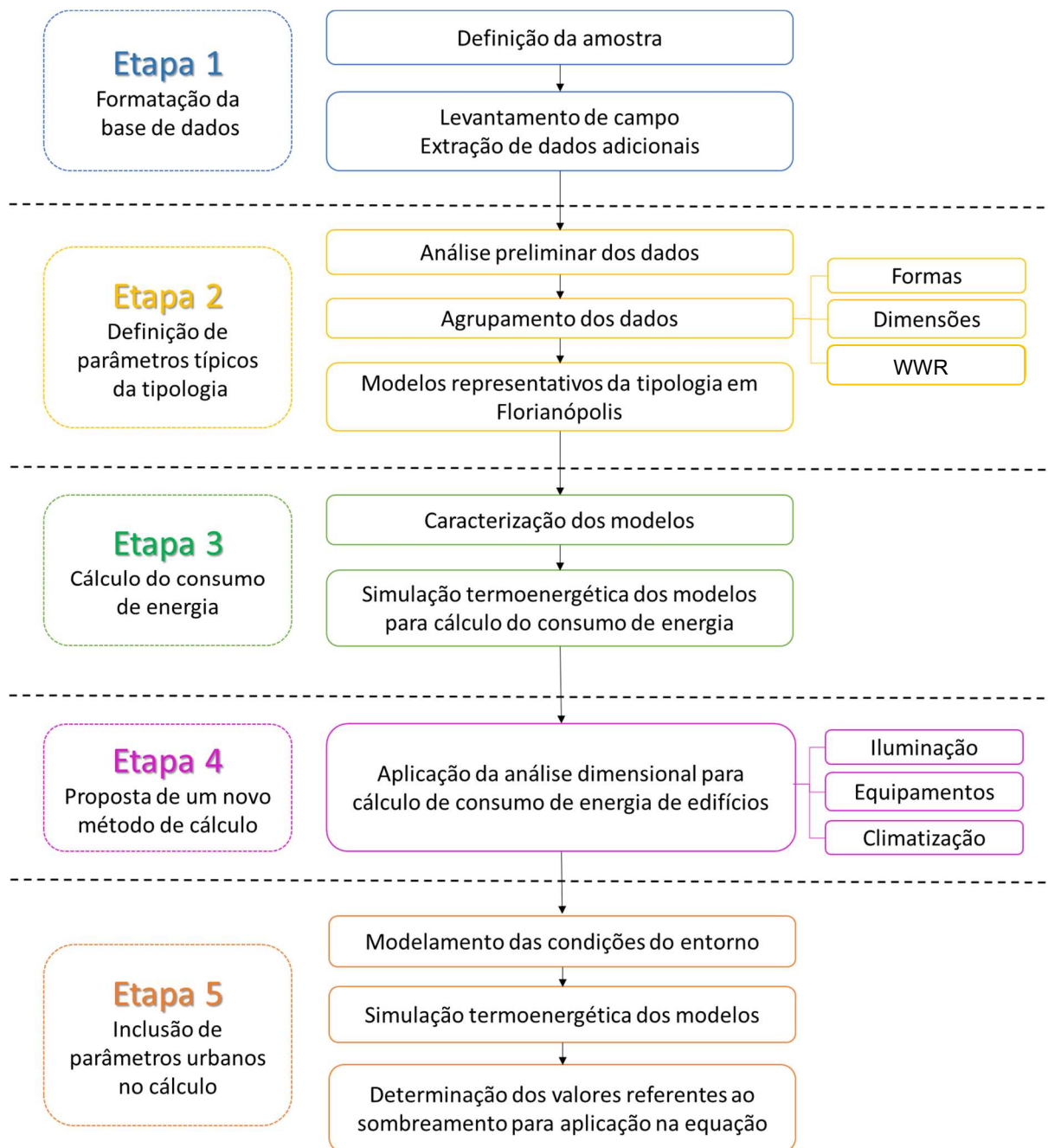
O processo de formatação da base de dados explicita o recorte espacial e temporal da pesquisa e a caracterização do clima do local do estudo. A pesquisa de campo identifica as características adicionais da categoria de edifícios objeto do estudo. A partir da combinação dessas entradas é definida a amostra de estudo.

A descrição do estoque de edifícios comerciais de escritórios de Florianópolis se dá a partir da análise preliminar dos dados por meio de histogramas de frequência e outros gráficos. A análise de agrupamento é então aplicada para obtenção de modelos de referência que possam ser utilizados como linha de base na avaliação do consumo de energia de edifícios de escritórios.

Os arquétipos são submetidos à simulação termoenergética para estimativa do consumo de energia. Um novo método de cálculo de consumo de energia em edifícios é proposto com base na análise dimensional.

Diante da impossibilidade de utilizar a análise de agrupamento para definir condições típicas de entorno para os edifícios, optou-se nessa pesquisa pela utilização dos índices urbanísticos na configuração de uma quadra padrão para análise dos efeitos do sombreamento causado pelo entorno no consumo de energia de edifícios. Assim, a variável de sombreamento foi incluída na equação para cálculo do consumo de energia por meio dos resultados da simulação termoenergética dos modelos submetidos às condições de entorno modeladas de acordo com os índices urbanísticos da zona mista central da cidade.

Figura 6 - Etapas de desenvolvimento do método de pesquisa.



3.1. FORMATAÇÃO DA BASE DE DADOS

3.1.1. Definição da amostra

Entre os usos não residenciais é possível identificar uma enorme gama de atividades. De forma geral, instalações comerciais incluem escritórios, lojas, bancos, hotéis, hospitais, farmácias, mercados, postos de gasolina, restaurantes, escolas, shopping centers, entre outros, o que torna evidente a dificuldade de estabelecer indicadores abrangentes para todo o setor.

Considerando que escritórios têm altas densidades de consumo energético pelo uso intenso de computadores e, na maioria das vezes, perto de 100% de sua área útil climatizada, as edificações comerciais de escritórios foram adotadas como objeto da pesquisa. Para o recorte espacial, a cidade de Florianópolis foi definida como campo de estudo. Segundo o zoneamento bioclimático brasileiro, Florianópolis está inserida na zona 3, com clima subtropical úmido (do tipo Cfa de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger). As estações do ano são bem caracterizadas. A temperatura média anual é de 21 °C, a média das temperaturas mínimas diárias nos meses mais frios é de 12,9 °C e a média das temperaturas máximas diárias nos meses mais quentes é de 29,4°C (INMET, 2020). A quantidade de edificações de escritórios presentes na cidade de Florianópolis foi identificada a partir de um banco de dados fornecido pela empresa Buildings (BUILDINGS, 2020).

Buildings é uma empresa de *BigData* do mercado de Real State que mantém um banco de dados do mercado de edifícios de escritórios e condomínios industriais e logísticos de 17 cidades brasileiras e da cidade de Santiago, no Chile. A empresa é parceira do NRE (Núcleo de Real State) da PoliUSP para pesquisas que promovem a aproximação entre a universidade e o setor produtivo (BUILDINGS, 2020). Entre as informações constantes na base foram selecionadas para caracterizar o estoque de edifícios de escritórios: idade, localização, número de pavimentos, área do pavimento tipo e tipo de sistema de condicionamento de ar instalado.

A Prefeitura Municipal de Florianópolis (PMF) foi contatada para cruzamento e validação dos dados e, na ocasião, um arquivo em formato GIS foi fornecido. Nele, estavam referenciadas todas as construções da cidade sem distinção de uso, o que inviabilizou sua utilização. Em um segundo contato, foi informado que não existe base de dados sistematizada que possa ser utilizada para pesquisa, mesmo que para fins acadêmicos.

A base de dados da Buildings apontou um universo de 208 edifícios comerciais de escritórios na cidade de Florianópolis. Deste universo foram excluídos os edifícios que ainda estavam em construção ou em fase de projeto no ano de 2020, resultando em uma amostra de 197 edifícios.

3.1.2. Levantamento de campo e coleta de dados adicionais

A localização dos edifícios foi utilizada para mapear cada unidade na malha urbana e verificar outros parâmetros que complementaram a base: a orientação solar, a forma da planta do pavimento tipo, dimensões do edifício e *WWR*. Esses dados foram extraídos por meio do programa *Autocad* e dos softwares de uso livre *Google Maps*, *Google Earth Pro* e *Google Street View*.

Foi necessário levantamento fotográfico *in loco* de 21 edifícios, alguns pela ausência de uma boa resolução das imagens para extração do *WWR*, outros, pelo fato do *Google Earth* estar operando com imagens do ano de 2015. Assim, alguns dos prédios constantes na base de dados como concluídos e ocupados, constavam como canteiro de obras no *Google Earth*. Foi realizada também pesquisa em sites de imobiliárias, consultas telefônicas e visitas *in loco*, para a verificação do tipo de sistema de condicionamento de ar utilizado em 10 edifícios da amostra.

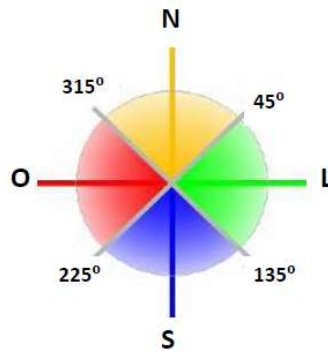
Figura 7 - Fotos de alguns edifícios no levantamento de dados *in loco*.



Utilizando como referência o norte geográfico, foram definidas quatro orientações solares para as fachadas, conforme a simplificação utilizada no Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C) (INMETRO, 2013): (a)

orientação norte, quando o azimuth da fachada é de 0 a $45,0^\circ$ e de $315,1^\circ$ a $360,0^\circ$; (b) orientação leste, quando o azimuth da fachada é de $45,10^\circ$ a $135,0^\circ$; (c) orientação sul, quando o azimuth é de $135,10^\circ$ a $225,0^\circ$; e (d) orientação oeste, quando o azimuth da fachada é de $225,10^\circ$ a $315,0^\circ$.

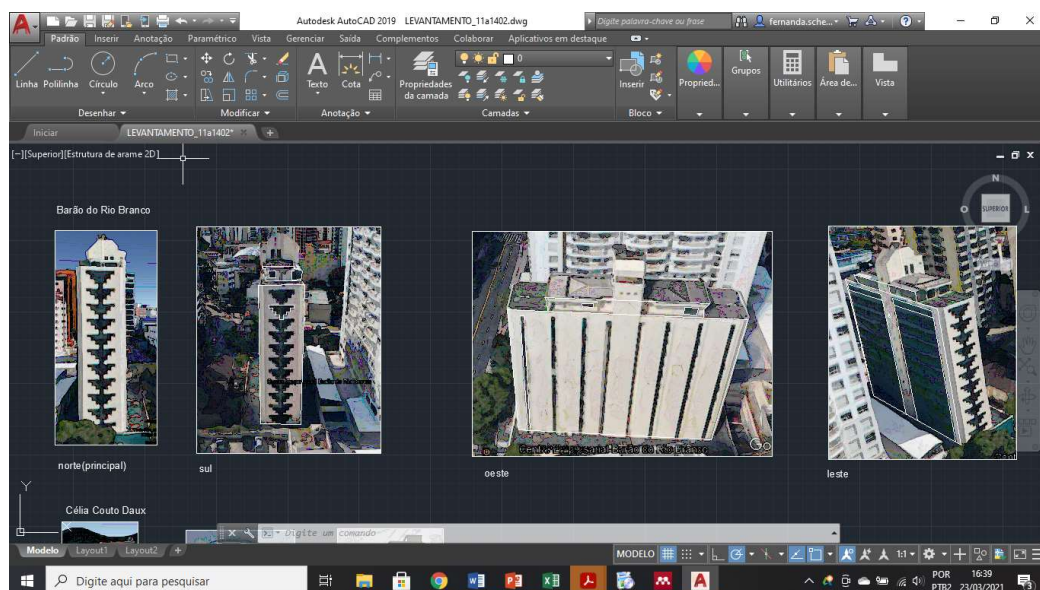
Figura 8 - Quadrantes para definição da orientação solar das fachadas.



Fonte: INMETRO, 2016

Para o cálculo do *WWR*, foram desenhados no programa *Autocad*, sobre as imagens dos edifícios, os perímetros das fachadas e das áreas envidraçadas para cada uma das orientações solares de cada edifício da amostra (Figura 9). O *WWR* foi então calculado pela razão entre a área de abertura envidraçada e a área total da fachada da edificação.

Figura 9 - Extração do *WWR* nas fachadas.



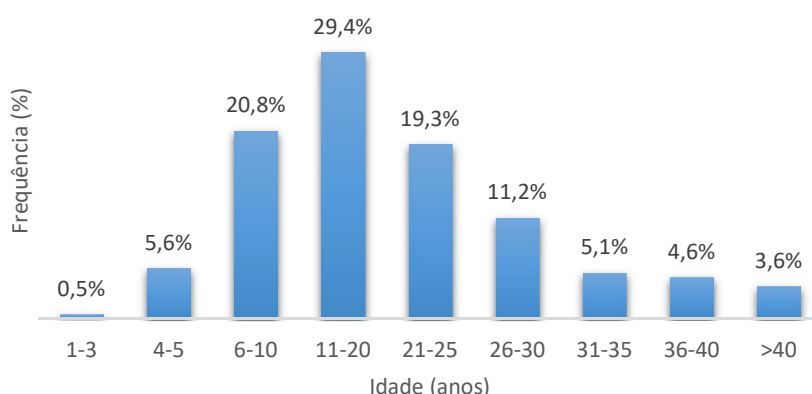
Apenas 7 edifícios apresentaram proteções solares, o que representa 3,55% da amostra. Esses edifícios foram mantidos na amostra, mas as proteções solares foram ignoradas para cálculo do *WWR*. Para 18 edifícios da amostra não foi possível extrair o *WWR*, por falta de visibilidade da fachada, mesmo usando a foto aérea no *Google Earth®*. Esses edifícios foram excluídos da amostra para análise do *WWR* e mantidos na amostra para análise da forma, dimensões e sistema de condicionamento de ar instalado.

3.2. DESCRIÇÃO DO ESTOQUE EDIFICADO

3.2.1. Análise preliminar dos dados

A instalação de infraestrutura em Florianópolis aconteceu a partir das primeiras décadas do século XX. A ligação da ilha com a parte continental aconteceu em 1926, com a inauguração da ponte Hercílio Luz, dando início ao aperfeiçoamento do sistema viário urbano. A inauguração da BR-101, entre a década de 60 e 70, facilitou a conexão de Santa Catarina com os demais estados do país, contribuindo para o fim do isolamento local. A ilha também recebeu uma série de obras rodoviárias nos anos 70 que modificaram a relação entre Florianópolis, cidades vizinhas e o restante do estado. (PMF, 2017).

Figura 10 - Distribuição de frequência em relação à idade dos edifícios.

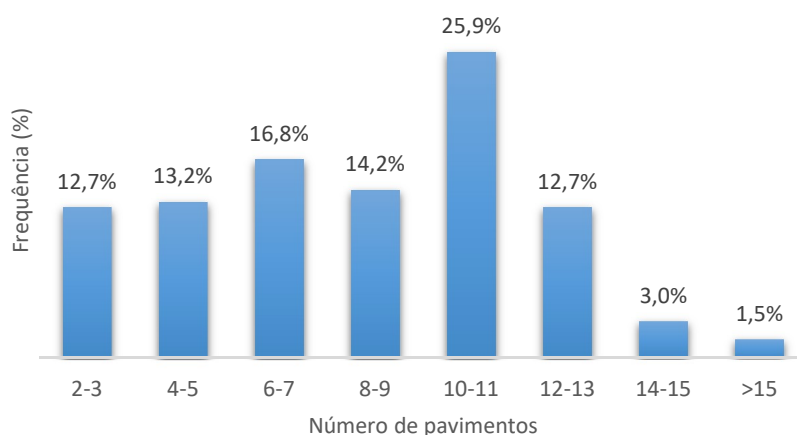


Fonte: BUILDINGS (2020)

A Figura 10 mostra a distribuição da frequência das edificações em relação à idade. Considerando a idade, em linhas gerais, os edifícios de escritórios de Florianópolis são distribuídos da seguinte forma: 44% deles têm mais de 20 anos, 29% têm entre 11 e 20 anos e 27% têm menos de 11 anos. O RTQ-C estava em vigor desde 2009 e programas de certificação ambiental que abordam o uso de energia, como o LEED já eram amplamente difundidos no âmbito nacional.

A Figura 11 apresenta a distribuição de frequência de edifícios em relação ao número de pavimentos. Dentre os edifícios de uso comercial de escritórios, 95,5% possuem até 13 pavimentos. Sendo que, 42,7% dos edifícios da amostra possuem de 2 a 7 pavimentos e 52,8% possuem de 8 a 13 pavimentos. É possível notar que as faixas de 6 a 7 e de 10 a 11 pavimentos acumulam a maior quantidade de edifícios, totalizando 42,7% da amostra.

Figura 11 - Distribuição de frequência de edifícios em relação ao número de pavimentos.

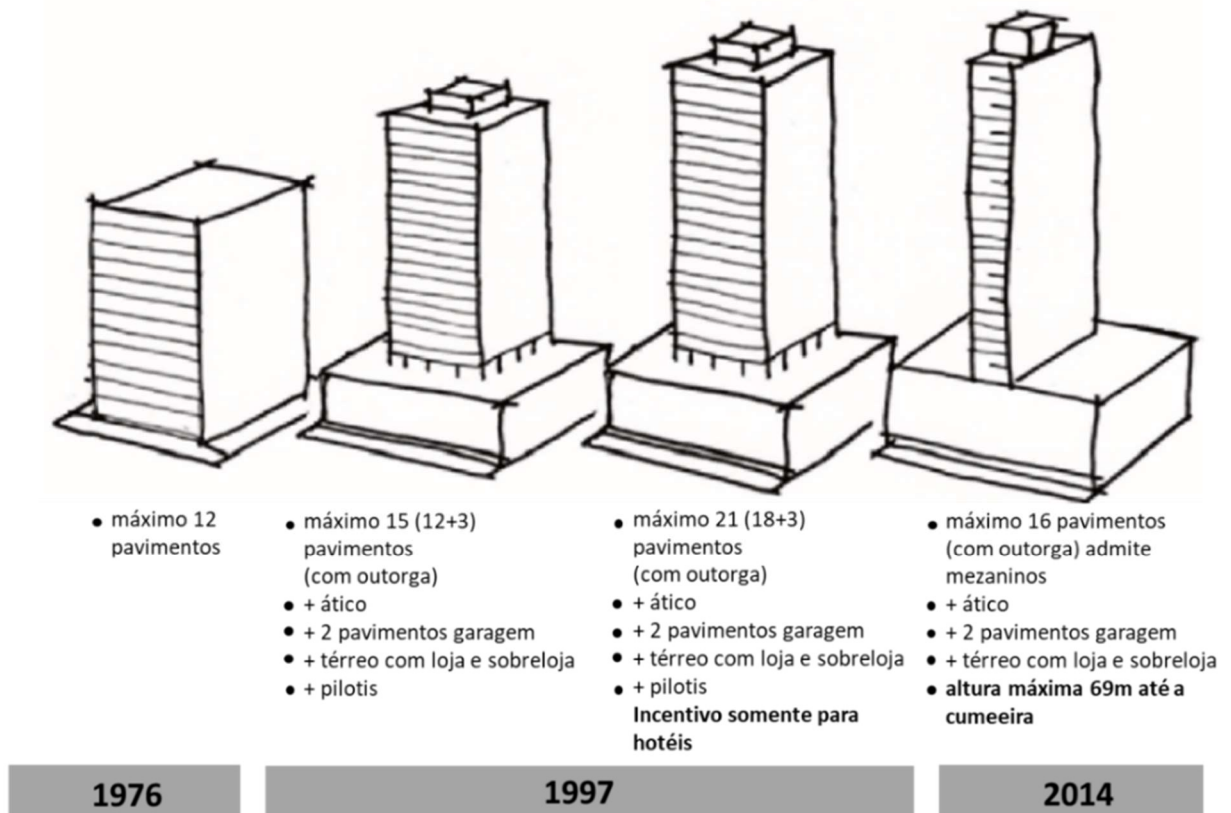


Fonte: BUILDINGS (2020)

Um fator de influência direta na verticalização da cidade ao longo dos anos é a consolidação dos planos diretores. Apenas 5% da área urbana de Florianópolis tem predominância de edifícios verticalizados (mais de 4 andares), em sua maioria concentrados no centro e na parte continental da cidade (PMF, 2017). A Figura 12, apresenta a evolução de índices urbanísticos aplicados a um lote urbano hipotético,

na área Mista Central da cidade. Nota-se um aumento considerável do gabarito dos edifícios desde as primeiras leis de zoneamento até o Plano Diretor vigente (PERES, 2020).

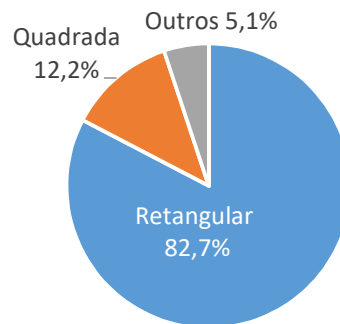
Figura 12 - Simulação comparativa entre algumas das legislações de Florianópolis



Fonte: Peres (2020)

No que diz respeito à forma, é possível afirmar que o estoque de edifícios comerciais de escritório de Florianópolis é majoritariamente de forma retangular seguida pela quadrada. Entre as formas menos frequentes estão a curvilínea, a triangular e a trapezoidal. Para edifícios com diferença de até 12,5% entre a menor e a maior aresta, a forma foi considerada quadrada.

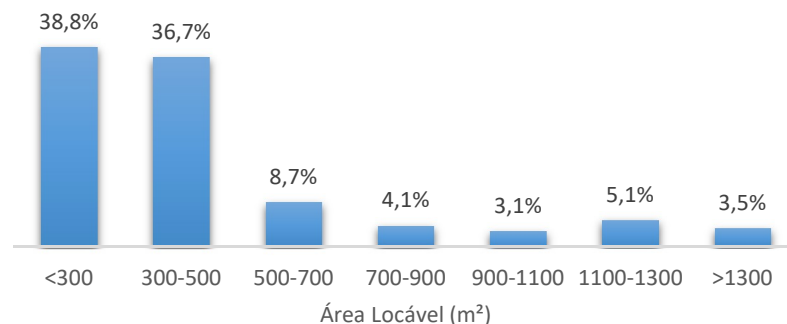
Figura 13 - Classificação dos edifícios quanto à forma.



Fonte: BUILDINGS (2020)

A Figura 14 mostra a distribuição de frequência com relação à área locável por pavimento tipo, onde é possível observar que 75,5% dos edifícios possuem área locável de até 500m², sendo que a quantidade de edifícios com o andar tipo menor que 300m² está muito próxima da quantidade de edifícios com o andar tipo com área entre 300 e 500m².

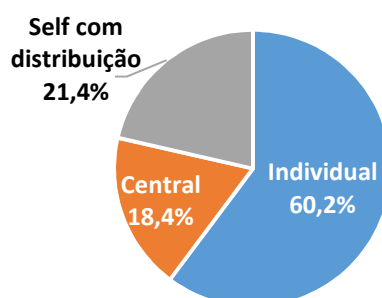
Figura 14 - Distribuição de frequência de edifícios em relação à área locável.



Fonte: BUILDINGS (2020)

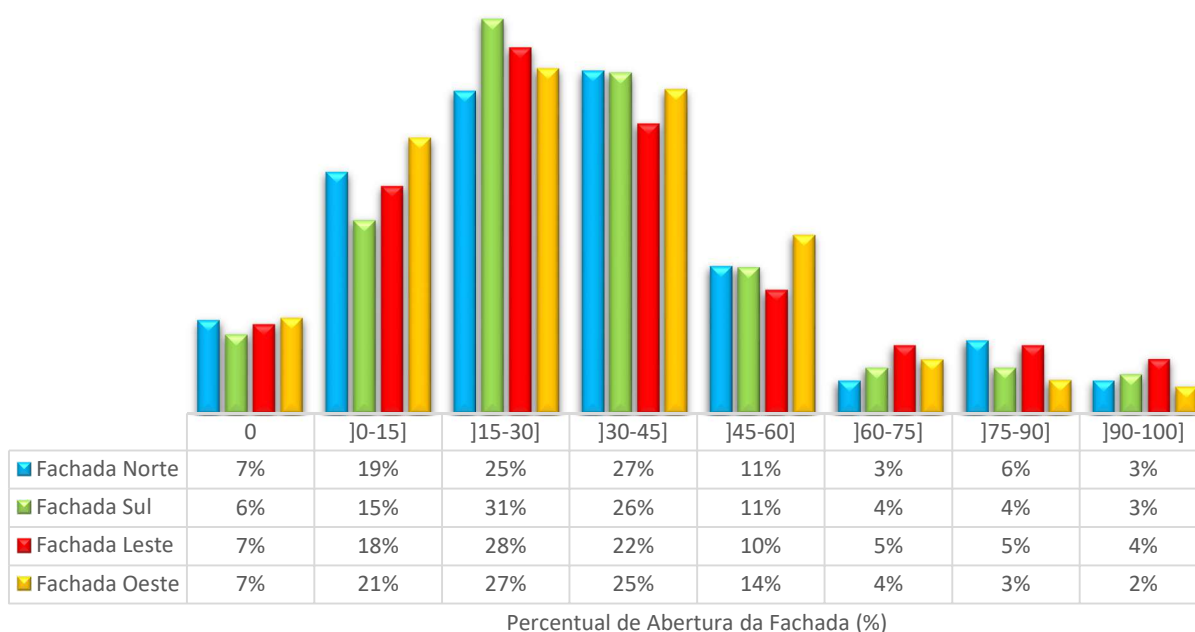
Com relação ao sistema de condicionamento de ar instalado, é possível afirmar que 60% dos equipamentos encontrados em edificações comerciais de escritório em Florianópolis correspondem a sistemas individuais de janela e/ou *split*. Os sistemas do tipo central e *self* com distribuição por dutos dividem quase que igualmente os 40% restantes dos sistemas instalados.

Figura 15 - Classificação dos edifícios quanto ao sistema de condicionamento de ar instalado.



Ao analisar a distribuição de frequência de edifícios em relação ao *WWR* (Figura 16) é possível afirmar que, para todas as orientações solares, o *WWR* dos edifícios se concentra na faixa de até 45%.

Figura 16 - Percentual de Abertura da Fachada nos edifícios da amostra.



O comportamento semelhante de distribuição do *WWR* em todas as orientações evidencia a ausência de preocupação com as questões termoenergéticas na fase de concepção dos projetos, já que, de maneira geral, sabe-se que as

orientações leste e oeste recebem grande intensidade de radiação solar, e a orientação oeste ainda está sujeita ao pico de radiação coincidente com o pico de temperatura do ar externo. Nas edificações totalmente expostas à radiação solar, a orientação da maior extensão das fachadas no sentido norte-sul pode minimizar os ganhos solares de verão. A orientação norte das janelas é boa tanto para o verão como para o inverno, pois permite o uso pleno da radiação solar para aquecimento nos períodos frios e impede a radiação direta nos períodos quentes (PROJETEEE, 2021).

3.2.2. Agrupamento dos dados

A base de dados foi estruturada em um arquivo formato .xls (Excel), com a memória de cálculo de cada *WWR* vinculado. Na etapa subsequente, no mesmo software, foram gerados histogramas de frequência e outros gráficos para análise preliminar dos dados.

Embora algumas técnicas, como histogramas de frequência ou uso de parâmetros representativos de regulamentos de construção possam ajudar, esses recursos não são suficientes para a identificação de edifícios representativos de um estoque. Entre os métodos estatísticos encontrados, o agrupamento por *clusters* foi identificado como o mais adequado para tal, tendo sido aplicado em estudos semelhantes conforme descrito no item 2.3.

Considerando que agrupar é o processo de organizar objetos em grupos cujos membros são semelhantes de alguma forma, o agrupamento é uma coleção de edifícios que são "semelhantes" entre eles e são "diferentes" dos edifícios pertencentes a outros *clusters*. Este conceito de agrupamento é usado como base do método proposto neste trabalho. Assim, edifícios com maior similaridade de características serão classificados no mesmo *cluster* e avaliados de acordo com a referência do centroide do *cluster*.

Nas análises foram utilizados os softwares SPSS V20 (IBM, 2011) para o agrupamento e Minitab 16 (MINITAB, 2010) para a elaboração dos dendrogramas. A medida de dissimilaridade adotada nesta pesquisa é distância euclidiana quadrada. O

edifício mais próximo do centroide de cada *cluster* foi determinado como representativo dos grupos.

A maioria dos estudos brasileiros utiliza como base para simulação termoenergética um modelo do pavimento tipo. Nesse tocante, CBCS (2014) aponta que simplificar o modelo, adotando um pavimento tipo no lugar da representação de todos os pavimentos, demonstra variação menor que 1% no resultado final, diminuindo a demanda de processamento de dados sem a perda de precisão no processo de simulação.

Diante disso, utilizou-se como variáveis principais para a análise de agrupamento a largura e profundidade nos edifícios de forma quadrada e retangular. Considerando que o agrupamento requer conjuntos de dados completos, o *WWR* foi considerado em uma segunda análise, uma vez que para quinze edifícios da amostra não foi possível identificar o índice em alguma das fachadas.

3.2.3. Definição dos edifícios representativos

O dendrograma foi utilizado para visualizar o processo de clusterização passo a passo. Ele é um diagrama de árvore que exhibe o agrupamento de observações e os níveis de similaridade entre elas. Neste estudo, as observações correspondem aos edifícios da amostra. Cada cor no diagrama representa um cluster. O nível de similaridade dos elementos contidos em cada cluster bem como a similaridade entre os clusters, de 0 a 100%, é medido ao longo do eixo Y. O eixo X mostra o número de cada elemento da amostra, permitindo a identificação dos edifícios na base de dados.

Uma amostra de 197 edifícios de escritórios na cidade de Florianópolis foi estudada, adotando a abordagem *k-means* como metodologia de classificação de 187 edifícios quanto à sua forma e dimensões e 179 edifícios quanto ao percentual de abertura das fachadas. Os dendrogramas gerados para cada simulação de *cluster* feita para ambas as formas podem ser consultados nos Apêndices A e B.

A análise de agrupamento para o *WWR* considerou 179 edifícios da amostra, independente da forma. Aqueles edifícios que não possuíam os dados de *WWR* para

alguma das orientações solares (18 edifícios) foram excluídos. As simulações de agrupamento consideraram 3 a 18 *clusters*, conforme Apêndice E.

3.3. CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA DE EDIFÍCIOS

3.3.1. Caracterização dos modelos

Considerado o resultado do agrupamento de dados, para a etapa subsequente de cálculo do consumo de energia, foram estabelecidos quatro modelos assim nomeados:

- (a) quadrado pequeno (Qp), medindo 15m x 15m;
- (b) quadrado grande (Qg), medindo 23m x 23m;
- (c) retângulo pequeno (Rp), medindo 15m x 24m e;
- (d) retângulo grande (Rg), medindo 15m x 34m.

O pavimento tipo foi considerado com uma única zona térmica, dotado de pé-direito de 3 metros do piso até a laje. Os parâmetros de ocupação, potência de iluminação e densidade de carga de equipamento foram adaptados do anexo C da ABNT NBR 16.401-1:2008, “Fontes Internas de Calor e Umidade” (ABNT, 2008).

A densidade de carga dos equipamentos foi definida como 16W/m², sendo atribuídos 8m² por posto de trabalho, considerando densidade média.

Tabela 6 - Densidade típica de carga de equipamentos para diversos tipos de escritórios.

Densidade típica de carga de equipamentos para diversos tipos de escritórios		
Tipo de Carga	Densidade (W/m ²)	Descrição do escritório. Assumindo:
Leve	5,4	15,5m ² por posto de trabalho com computador e monitor em cada um, mais impressora e fax. Fator de diversidade de 0,67, exceto 0,33 para impressoras.
Média	10,7	11,6m ² por posto de trabalho com computador e monitor em cada um, mais impressora e fax. Fator de diversidade de 0,75, exceto 0,50 para impressoras.
Média/alta	16,2	9,3m ² por posto de trabalho com computador e monitor em cada um, mais impressora e fax. Fator de diversidade de 0,75, exceto 0,50 para impressoras.
Alta	21,5	7,7m ² por posto de trabalho com computador e monitor em cada um, mais impressora e fax. Fator de diversidade de 0,75, exceto 0,50 para impressoras.

Fonte: Tabela C.6, (ABNT, 2008)

A Tabela C.2 da ABNT NBR 16.401-1:2008, que recomenda taxas típicas de dissipação de calor pela iluminação, sugere para escritórios a utilização de iluminação do tipo fluorescente com densidade de potência dissipada de 16W/m^2 . O valor atribuído nas simulações foi adaptado para 12W/m^2 , considerando que atualmente é comum a utilização de iluminação do tipo LED.

Com relação às rotinas de uso, foi considerada ocupação de 100% no período das 8h às 20h nos dias úteis, e das 8h até as 12h aos sábados. Determinou-se 10% dos equipamentos em funcionamento constante em períodos sem ocupação.

A Tabela 7 apresenta a composição de materiais para paredes, piso e cobertura dos modelos simulados. A cobertura e o piso foram configurados como fechamentos adiabáticos. A Tabela 8 apresenta as propriedades térmicas dos materiais que compõem os elementos construtivos discriminados.

Tabela 7 - Composição dos elementos construtivos.

Elemento Construtivo	Composição	Transmitância	Absortância
Paredes externas	Reboco (15mm) + Bloco de concreto (14mm) + câmara de ar bloco de concreto + Bloco de concreto (14mm) + Reboco (15mm)	$1,0\text{ W/m}^2\text{K}$	Interna: $\alpha=0,5$ Externa: $\alpha=0,5$
Laje (piso e teto)	Piso cerâmico (10mm) + concreto maciço (20cm)	$3,0\text{ W/m}^2\text{K}$	Reboco: $\alpha=0,5$ Piso: $\alpha=0,5$
Cobertura	Telha de fibrocimento (7 mm) + câmara de ar $e>5\text{cm}$ fluxo descendente + Reboco 15 mm+ Concreto maciço (10cm) + Reboco 15 mm	$1,5\text{ W/m}^2\text{K}$	0,50

Tabela 8 - Propriedades térmicas dos materiais utilizados: densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c).

Material	E (mm)	ρ [Kg/m ³]	λ [W/(m.K)]	c [J/(kg.K)]
Reboco	15	1800	1,00	1000
Bloco de concreto	14	2200	1.65	1000
Piso cerâmico	10	1600	0,90	920
Concreto maciço	100	2400	1,75	1000
Concreto maciço	200	2200	1,75	1000
Telha de fibrocimento	7	1900	0,95	840

Foi estabelecido o *WWR* de 30% para todas as fachadas dos modelos, sendo as janelas compostas por vidro incolor com propriedades ópticas e térmicas conforme Tabela 9.

Tabela 9 - Propriedades ópticas e térmicas do vidro utilizado.

Propriedade	Vidro incolor
Espessura (mm)	6
Transmissão energética (%)	77
Reflexão energética – externa (%)	7
Reflexão energética – interna (%)	7
Absorção energética (%)	15
Transmissão luminosa (%)	88
Reflexão luminosa – externa (%)	8
Reflexão luminosa – interna (%)	8
Emissividade – externa	0,84
Emissividade – interna	0,84
Condutividade (W/m.K)	1
Fator Solar (%)	84
U (W/m².K)	5,60
Índice de seletividade	1,05

Para o sistema de climatização foi estabelecido o COP de 3,2W/W (*coefficient of performance*), sendo o pavimento tipo totalmente climatizado. O termostato foi configurado com *setpoint* de aquecimento em 21°C e de resfriamento em 23°C. A programação de funcionamento seguiu a rotina de ocupação estabelecida, ou seja, o sistema opera, nos dias úteis, das 8h até as 20h e das 8h até as 12h aos sábados. A Tabela 10 resume as características do sistema:

Tabela 10 - Características do Sistema de condicionamento de ar

Tipo	PTHP (<i>Packaged Terminal Heat Pump</i>), equivalente a um aparelho Split
COP	3,2 W/W
Setpoints	Aquecimento: 21°C Resfriamento: 23°C
Capacidade	Definida pelo auto dimensionamento do programa EnergyPlus
Renovação de ar	0,0075 m³/s por pessoa
Taxa de infiltração	0,6 trocas por hora

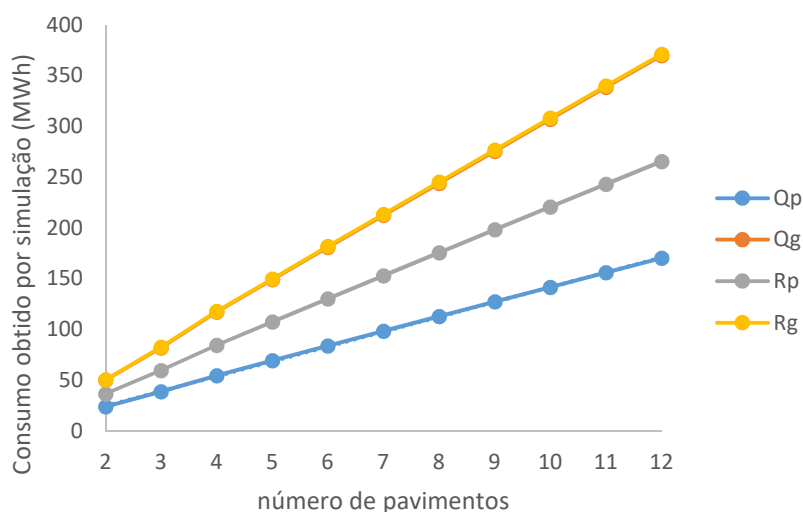
3.3.2. Simulação termoenergética dos modelos

Para estimar o consumo de energia dos modelos foi realizada a simulação termoenergética por meio do software *Energypius* V22-1-0 para o clima de Florianópolis. Os quatro modelos foram testados também com relação ao número de pavimentos (de 2 a 12 pavimentos). As simulações foram realizadas considerando o azimute 0°.

Os resultados obtidos na simulação foram divididos em três grupos correspondentes aos usos finais de energia com climatização de ar, iluminação e outros. O consumo de ar condicionado é a soma dos consumos com aquecimento, resfriamento e ventilação. O apêndice H mostra os resultados das simulações para cada modelo nos gabaritos de 2 a 12 pavimentos.

Ao correlacionar o consumo de energia com o tamanho, forma e altura dos modelos (Figura 17), as linhas referentes aos modelos grandes (Qg e Rg) se sobrepõem. Apesar de apresentarem formatos distintos, os modelos de dimensões maiores, com áreas semelhantes, resultam em consumo de energia similares. Nos prédios menores nota-se uma diferença significativa de consumo entre diferentes formas à medida que a altura do edifício é aumentada. Aparentemente, para os edifícios de grandes dimensões a forma tem pouco impacto no consumo de energia.

Figura 17 - Gráfico do consumo de energia dos modelos conforme altura do edifício.



A simulação termoenergética é um método eficaz de estimar o consumo de energia, no entanto, a maioria dos programas possuem interfaces gráficas de difícil manipulação e poucos são apresentados em língua portuguesa, o que dificulta a difusão de uso no Brasil. Outras barreiras ao uso da simulação incluem a necessidade de conhecimento prévio dos conceitos relacionados ao cálculo de fluxos de calor e balanço térmico de um edifício, além de raciocínio lógico e esforço de programação. A inserção de dados no *Energyplus* é em forma de texto, algo bem distante da realidade dos arquitetos, habituados a trabalhar com elementos gráficos. O mercado de projeto de edificações demanda um método mais simples para estimar o consumo de maneira rápida, tendo como entrada parâmetros usuais das rotinas de trabalho. Surge então a proposta de aplicação da análise dimensional com uma equação simplificada para cálculo do consumo de energia de um edifício.

3.4. MODELAMENTO MATEMÁTICO DO CONSUMO DE ENERGIA DE EDIFÍCIOS POR MEIO DA ANÁLISE DIMENSIONAL

Para aplicar a análise dimensional ao consumo de energia de um prédio foram estabelecidos três grupos de consumo, de acordo com os principais usos finais encontrados nos edifícios de escritórios: iluminação, equipamentos e climatização. Foram selecionadas variáveis e constantes que influenciam o consumo de energia dentro de cada grupo, suas unidades no Sistema Internacional de Unidades (SI) e suas dimensões, conforme Tabela 11. A escolha das variáveis baseou-se na rotina de trabalho do arquiteto, contemplando parâmetros com os quais os profissionais possuem familiaridade. Para o modelamento matemático do cálculo de consumo serão seguidas as etapas descritas no item 2.6.1.

Tabela 11 - Parâmetros de entrada para a modelagem do consumo de energia em edifícios por meio da análise dimensional.

Parâmetro	Simbologia	Unidade de medida	Dimensão
Consumo de energia do sistema de iluminação	C_{il}	kWh	ML^2T^{-2}
Consumo de energia de equipamentos	C_{eq}	kWh	ML^2T^{-2}
Consumo de energia para climatização	C_{ac}	kWh	ML^2T^{-2}
Densidade de potência instalada por m^2 para iluminação	W_{il}	kW/m^2	MT^{-3}
Densidade de potência instalada por m^2 para equipamentos	W_{eq}	kW/m^2	MT^{-3}
Densidade de capacidade de ar condicionado	Cap_{ac}	kW/m^2	MT^{-3}
Coefficiente de performance	COP	W/W	<i>adimensional</i>
Área do pavimento tipo	A_u	m^2	L^2
Área da fachada	A_f	m^2	L^2
Área envidraçada	A_v	m^2	L^2
Tempo de utilização do sistema	t	h	T
Densidade de ocupação	p	$pessoa/m^2$	L^{-2}
Número de pavimentos do edifício	n	<i>unidade</i>	<i>adimensional</i>
Percentual de abertura da fachada	WWR	$\%$	<i>adimensional</i>

3.4.1. Consumo de energia do sistema de iluminação de um edifício

Para o sistema de iluminação as variáveis e constantes consideradas para o equacionamento do consumo foram: o consumo de energia do sistema de iluminação (C_{il}), a densidade de potência instalada por m^2 para iluminação (W_{il}), a área do pavimento tipo (A_u), o tempo de utilização do sistema (t) e o número de pavimentos do edifício (n).

Por meio do teorema π de Buckingham, é possível afirmar que o número de produtos dimensionais é igual ao número de variáveis e constantes que descrevem o problema subtraído do número de dimensões necessárias para expressar suas fórmulas dimensionais, conforme Eq.8 (BUCKINGHAM, 1914). Apesar de elencadas cinco variáveis para estimativa do consumo, nota-se que apenas quatro delas são

dimensionais. Neste caso, obtém-se o número de produtos adimensionais determinado por:

$$N_v = 4 \ (C_{il}, W_{il}, A_u, t) \quad (20)$$

$$N_d = 3 \ (M, L, T) \quad (21)$$

Então,

$$N_p = 4 - 3 = 1 \quad (22)$$

Nesta situação, o teorema de Buckingham define que estes parâmetros são dependentes. Considerando que π_1 é um produto adimensional, suas dimensões fundamentais são elevadas ao expoente zero:

$$\pi_1 = M^0 L^0 T^0 \quad (23)$$

Sendo π_1 uma função das variáveis C_{il}, W_{il}, A_u e t , tem-se:

$$\pi_1 = f(C_{il}, W_{il}, A_u, t) \quad (24)$$

A equivalência do produto adimensional π_1 com o produto das variáveis dimensionais é realizada a fim de encontrar os expoentes que tornem as variáveis adimensionais:

$$M^0 L^0 T^0 = [C_{il}]^1 [W_{il}]^x [A_u]^y [t]^z \quad (25)$$

Assim, π_1 é encontrado resolvendo o seguinte sistema linear:

$$M^0 L^0 T^0 = [ML^2 T^{-2}]^1 [MT^{-3}]^x [L^2]^y [T]^z \quad (26)$$

Classificando o problema por dimensão para melhor visualização dos resultados:

Tabela 12 - Sistema linear de π_1 organizado por dimensão

Dimensão	Equação	Solução
M	$1+x+0y+0z=0$	$x=-1$
L	$2+0x+2y+0z=0$	$y=-1$
T	$-2-3x+0y+z=0$	$z=-1$

Assim,

$$\pi_1 = \frac{C_{il}}{W_{il} \cdot A_u \cdot t} \quad (27)$$

Resolvendo $\varphi(\pi_1) = 0$

$$\pi_1 = 1 \quad (28)$$

$$\frac{C_{il}}{W_{il} \cdot A_u \cdot t} = 1 \quad (29)$$

Logo, o consumo de energia com o sistema de iluminação do edifício para um pavimento pode ser dado pela seguinte equação:

$$C_{il} = W_{il} \cdot A_u \cdot t \quad (30)$$

A homogeneidade dimensional da equação pode ser comprovada por meio da substituição das variáveis por suas respectivas dimensões fundamentais:

$$ML^2T^{-2} = MT^{-3} \cdot L^2 \cdot T \quad (31)$$

$$ML^2T^{-2} = ML^2T^{-2} \quad (32)$$

Ao considerar o número de pavimentos como parâmetro adimensional, a fim de encontrar o consumo total de um edifício com n pavimentos, tem-se então:

$$C_{il} = W_{il} \cdot A_u \cdot t \cdot n \quad (33)$$

3.4.2. Consumo de energia de equipamentos em um edifício

Para aplicação da análise dimensional ao consumo de energia dos equipamentos (que não fazem parte dos sistemas de iluminação e de climatização) de um prédio as variáveis e constantes consideradas para o equacionamento foram: o consumo de energia de equipamentos (C_{eq}), a densidade de potência instalada por m² para equipamentos (W_{eq}), a área do pavimento tipo (A_u), o tempo de utilização do sistema (t) e o número de pavimentos do edifício (n).

O número de produtos π é então dado por:

$$N_v = 4 (C_{eq}, W_{eq}, A_u, t) \quad (34)$$

$$N_d = 3 (M, L, T) \quad (35)$$

Então,

$$N_p = N_v - N_d = 4 - 3 = 1 \quad (36)$$

Para calcular π_1 , é criado um sistema linear igualando o estado adimensional das dimensões do problema às variáveis correspondentes elevadas à potência de um novo conjunto de variáveis. O sistema linear representado pela Eq.36 é então resolvido:

$$M^0 L^0 T^0 = [C_{eq}]^1 [W_{eq}]^x [A_u]^y [t]^z \quad (37)$$

Classificando o problema por dimensão, para melhor visualização dos resultados tem-se:

Tabela 13 - Sistema linear de π_1 organizado por dimensão.

Dimensão	Equação	Solução
M	$1+x+0y+0z=0$	$x=-1$
L	$2+0x+2y+0z=0$	$y=-1$
T	$-2-3x+0y+z=0$	$z=-1$

Então:

$$\pi_1 = \frac{C_{eq}}{W_{eq} \cdot A_u \cdot t} \quad (38)$$

Assim, o consumo de energia de equipamentos e tomadas de um pavimento do edifício é dado por:

$$C_{eq} = W_{eq} \cdot A_u \cdot t \quad (39)$$

E o consumo de energia de equipamentos em um edifício com n pavimentos é dado pela seguinte equação:

$$C_{eq} = W_{eq} \cdot A_u \cdot t \cdot n \quad (40)$$

3.4.3. Consumo de energia para climatização de um edifício

O sistema de climatização é crucial para garantir o conforto térmico em edifícios, mas é também um dos principais consumidores de energia. Muitas variáveis exercem influência no consumo de energia para climatização de um edifício. Foram realizadas diversas pesquisas com foco na parametrização das características construtivas que impactam no consumo energético. Neste estudo foram mantidas as condições de envoltória referente aos fechamentos opacos (paredes e coberturas) dos modelos que representam o estoque edificação para a cidade de Florianópolis, e as variáveis selecionadas para o equacionamento foram: o consumo de energia para climatização (C_{ac}), a densidade de potência instalada em ar-condicionado, densidade

de ocupação (p), Área envidraçada (A_v), Área de fachada (A_f), área do pavimento tipo (A_u), tempo de utilização do edifício (t) e coeficiente de desempenho (COP). A densidade de potência de um sistema de climatização pode ser relacionada à densidade de capacidade instalada (Cap_{ac}), dividida pelo COP do sistema. Dado que COP é uma grandeza adimensional, o número de produtos adimensionais para o problema é dado por:

$$N_p = N_v - N_d = 7 - 3 = 4 \quad (41)$$

No caso de mais de um produto adimensional, os parâmetros π 's são formados escolhendo-se uma base de repetição. O número de variáveis repetidas deve ser igual ao número de dimensões do problema, que neste caso são três (M, L, T). Cada grupo π será formado pela combinação da base de repetição com cada uma das outras variáveis restantes.

Foram escolhidas como variáveis repetidas C_{ac} , Cap_{ac} e t . A viabilidade de uso das variáveis selecionadas é avaliada por meio de uma matriz, formada listando os expoentes das dimensões primárias (M, L e T) de cada variável. As linhas são as dimensões e as colunas são as variáveis. Se o determinante da matriz não for zero as variáveis selecionadas podem ser usadas como variáveis repetidas.

A matriz representada na Tabela 14 tem determinante igual a -2, assim, as variáveis selecionadas podem ser usadas como repetidas:

Tabela 14 - Matriz de coeficientes

	M	L	T
C_{ac}	1	2	-2
Cap_{ac}	1	0	-3
t	0	0	1

As variáveis restantes podem agora ser iteradas com as variáveis de repetição para encontrar os produtos adimensionais representados nas equações 42 a 45:

$$\pi_1 = \varphi(p, C_{ac}, Cap_{ac}, t) \quad (42)$$

$$\pi_2 = \varphi(A_v, C_{ac}, Cap_{ac}, t) \quad (43)$$

$$\pi_3 = \varphi(A_f, C_{ac}, Cap_{ac}, t) \quad (44)$$

$$\pi_4 = \varphi(A_u, C_{ac}, Cap_{ac}, t) \quad (45)$$

Calcula-se π_1 resolvendo o sistema linear:

$$M^0 L^0 T^0 = [p]^1 [C_{ac}]^x [Cap_{ac}]^y [t]^z \quad (46)$$

Tabela 15 - Sistema linear de π_1 organizado por dimensão

Dimensão	Equação	Solução
M	$0+x+y+0z=0$	$y=-1$
L	$-2+2x+0y+0z=0$	$x=1$
T	$0-2x-3y+z=0$	$z=-1$

Então:

$$\pi_1 = \frac{p \cdot C_{ac}}{Cap_{ac} \cdot t} \quad (47)$$

Calcula-se π_2 resolvendo o sistema linear:

$$M^0 L^0 T^0 = [A_v]^1 [C_{ac}]^x [Cap_{ac}]^y [t]^z \quad (48)$$

Tabela 16 - Sistema linear de π_2 organizado por dimensão

Dimensão	Equação	Solução
M	$0+x+y+0z=0$	$y=1$
L	$2+2x+0y+0z=0$	$x=-1$
T	$0-2x-3y+z=0$	$z=1$

Então:

$$\pi_2 = \frac{A_v \cdot Cap_{ac} \cdot t}{C_{ac}} \quad (49)$$

Considerando que A_v , A_f e A_u possuem a mesma dimensão, calcula-se π_3 e π_4 da mesma forma:

$$M^0 L^0 T^0 = [A_f]^1 [C_{ac}]^x [Cap_{ac}]^y [t]^z \quad (50)$$

$$M^0 L^0 T^0 = [A_u]^1 [C_{ac}]^x [Cap_{ac}]^y [t]^z \quad (51)$$

Tabela 17 - Sistema linear de π_3 e π_4 organizado por dimensão

Dimensão	Equação	Solução
M	$0+x+y+0z=0$	$y=1$
L	$2+2x+0y+0z=0$	$x=-1$
T	$0-2x-3y+z=0$	$z=1$

Então:

$$\pi_3 = \frac{A_f \cdot Cap_{ac} \cdot t}{C_{ac}} \quad (52)$$

E π_4 :

$$\pi_4 = \frac{A_u \cdot Cap_{ac} \cdot t}{C_{ac}} \quad (53)$$

Considerando o uso contínuo de sistemas de iluminação durante os períodos de ocupação em edifícios comerciais, a área envidraçada (A_f) foi incluída exclusivamente no cálculo do consumo de energia do sistema de climatização, pois é o único fator de consumo influenciado por ela nesse cenário. Considerando o princípio da homogeneidade dimensional tem-se:

$$M^0 L^0 T^0 = \pi_1 \cdot \pi_2 \cdot \pi_3 \cdot \pi_4 \quad (54)$$

Ou,

$$\frac{p \cdot C_{ac}}{Cap_{ac} \cdot t} \cdot \frac{A_v \cdot Cap_{ac} \cdot t}{C_{ac}} \cdot \frac{A_f \cdot Cap_{ac} \cdot t}{C_{ac}} \cdot \frac{A_u \cdot Cap_{ac} \cdot t}{C_{ac}} = 1 \quad (55)$$

$$p \cdot A_v \cdot \frac{A_f \cdot Cap_{ac} \cdot t}{C_{ac}} \cdot \frac{A_u \cdot Cap_{ac} \cdot t}{C_{ac}} = 1 \quad (56)$$

$$C_{ac}^2 = p \cdot A_v \cdot A_f \cdot A_u \cdot Cap_{ac}^2 \cdot t^2 \quad (57)$$

$$C_{ac} = \sqrt{p \cdot A_v \cdot A_f \cdot A_u \cdot Cap_{ac} \cdot t} \quad (58)$$

A homogeneidade dimensional da equação é comprovada por meio da substituição das variáveis pelas suas respectivas dimensões fundamentais:

$$ML^2T^{-2} = \sqrt{L^{-2} \cdot L^2 \cdot L^2 \cdot L^2 \cdot MT^{-3} \cdot T} \quad (59)$$

Assim,

$$ML^2T^{-2} = ML^2T^{-2} \quad (60)$$

A variável sem dimensão *COP* pode ser diretamente inserida na equação. Como resultado, o consumo de energia com o sistema de climatização para o edifício é calculado pela seguinte equação:

$$C_{ac} = \frac{\sqrt{p \cdot A_v \cdot A_f \cdot A_u \cdot Cap_{ac} \cdot t}}{COP} \quad (61)$$

3.4.4. Cálculo do consumo total de energia do edifício

O consumo total de energia de um edifício é então dado pela soma dos consumos com o sistema de iluminação (C_{il}), equipamentos (C_{eq}) e do consumo do sistema de condicionamento de ar (C_{ac}):

$$E = \overset{C_{il}}{\boxed{(W_{il} \cdot A_u \cdot t \cdot n)}} + \overset{C_{eq}}{\boxed{(W_{eq} \cdot t \cdot A_u \cdot n)}} + \overset{C_{ac}}{\boxed{\left(\frac{\sqrt{p \cdot A_v \cdot A_f \cdot A_u \cdot Cap_{ac} \cdot t}}{COP} \right)}} \quad (62)$$

Onde “ E ” é o consumo de energia do edifício (kWh), W_{il} , é a densidade de potência instalada para iluminação (kW/m²), W_{eq} é a densidade de potência instalada no conjunto de equipamentos e tomadas do prédio (kW/m²), Cap_{ac} é densidade de capacidade instalada do sistema de climatização do prédio (kW/m²), A_u é a área do pavimento tipo (m²), A_v é a área envidraçada (m²), A_f é a área de fachada (m²), t é o tempo de ocupação do edifício (horas), p é a densidade de ocupação (pessoa/m²) e n é o número de pavimentos.

3.5. INCLUSÃO DOS PARÂMETROS URBANOS NO CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA

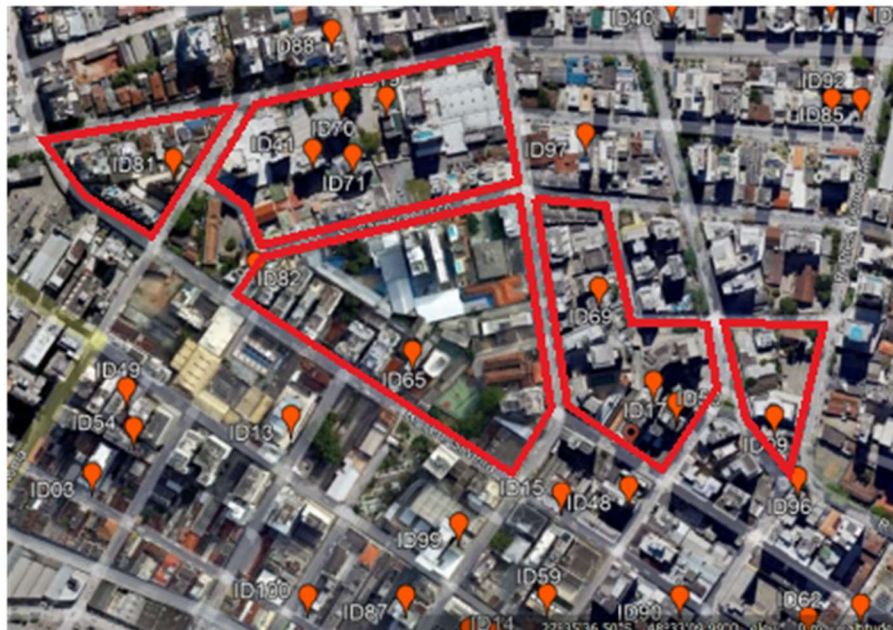
Um estudo preliminar na disposição dos edifícios nas quadras da cidade evidenciou a dificuldade de descrever e padronizar o entorno dos edifícios, já relatada na literatura. Dentre os primeiros 100 edifícios da amostra, 43 se localizam em quadras de formato irregular, sendo as demais quadras apresentando geometria e tamanhos variados. Ficou, então, impossibilitada a categorização dos casos para aplicação da técnica de análise de agrupamento na identificação de condições típicas de entorno dos edifícios de escritórios em Florianópolis.

A Figura 18 mostra a discrepância observada entre o formato e dimensões das quadras em um recorte da região central da cidade.

A Figura 19 mostra que, em algumas situações, não há sequer a definição do traçado das quadras pela ausência de vias que as delimitem. Muitos prédios comerciais da cidade ficam nas margens de grandes rodovias estaduais, como a SC401 (Rodovia José Carlos Daux) e SC404 (Rua Admar Gonzaga), que apresentam essas condições.

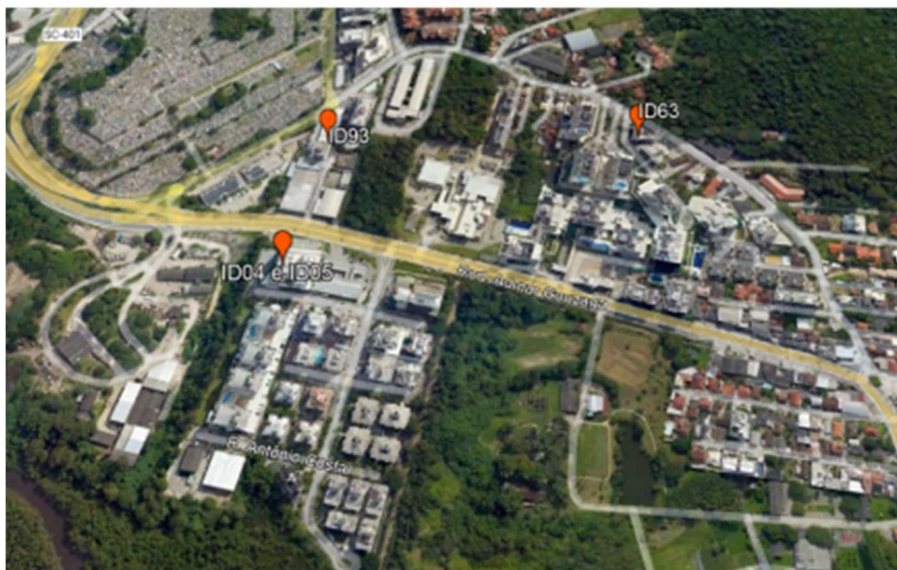
Diante disso, optou-se nessa pesquisa pela utilização dos índices urbanísticos na configuração de uma quadra padrão para análise dos efeitos do sombreamento causado pelo entorno no consumo de energia de edifícios.

Figura 18 - Configuração de algumas quadras onde estão inseridos prédios da amostra.



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 19 - Exemplo de ausência da definição do traçado das quadras.



Fonte: Google Earth (2022)

Em pesquisa anterior, Beck (2020) analisou a disponibilidade de luz natural no interior dos ambientes por meio de cenários dos tipos de quadras para a Área Mista Central de Florianópolis de acordo com os índices urbanísticos estabelecidos pelo

Código de Obras e Plano Diretor da cidade. A área escolhida tem caráter adensado e permite maior verticalização dos edifícios, o que possibilitou a análise do cenário mais crítico com relação a disponibilidade de luz natural. A configuração da quadra foi baseada nos índices constantes na Tabela 18.

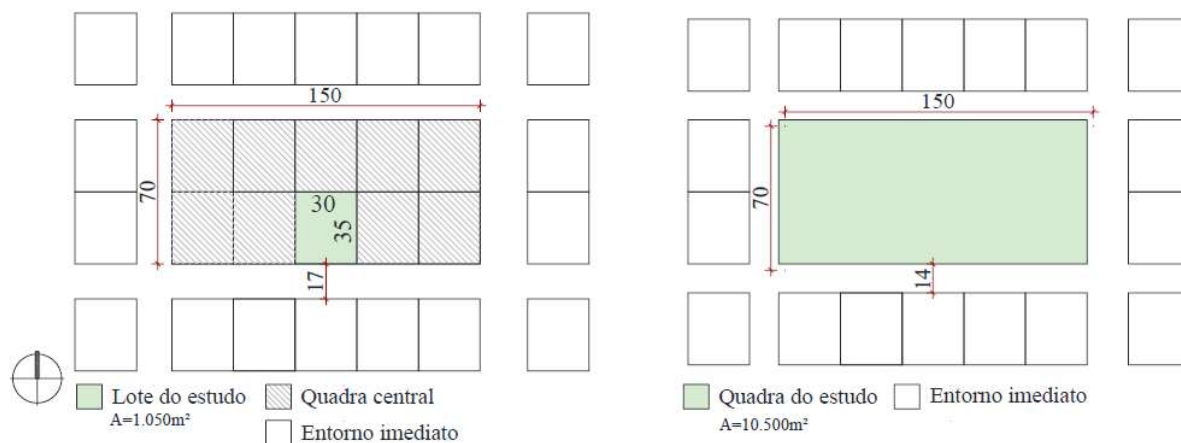
Tabela 18 - Limite de Ocupação do plano diretor de Florianópolis para a AMC 16.5

Macro Regiões	Área	N° Máx. Pavtos		T.O. Máxima			IA						Área Máx. Quadra	Área Mín. do Lote	Testada Mín. do Lote	
		Padrão	Acrésc. TDC				Mín	Básico	Máx. Outorga Onerosa	Acrésc. TDC	Adicional Subsolos	Máx. Total				
Macro Área de Usos Urbanos	AMC 16.5	12	4	Gabarito	1 ao 5	50%		1	1	4,8	0,56	1	6,36	2ha	1.050 m²	30 m
					6 ao 16											

Fonte: Beck (2020).

Assim, o lote foi definido com base nos valores mínimos de testada (30 m) e área mínima de 1050 m². A configuração da quadra (Figura 20) resultou então do agrupamento de dez lotes, totalizando uma área de 1,05 ha. A largura mínima de 17 m para vias locais, estipulada pelo plano diretor, foi diminuída para 14 m, que representa melhor a realidade.

Figura 20 - Configuração da quadra de referência para estudo do sombreamento.

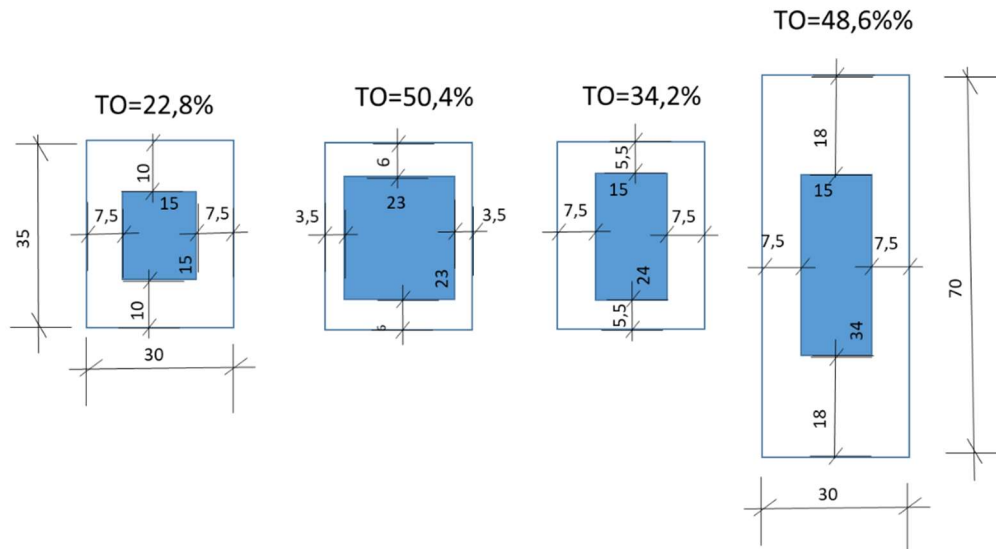


Fonte: Beck (2020)

Estabelecida a configuração da quadra, foram criados os cenários de ocupação dos lotes considerando os modelos tidos como representativos de edifícios

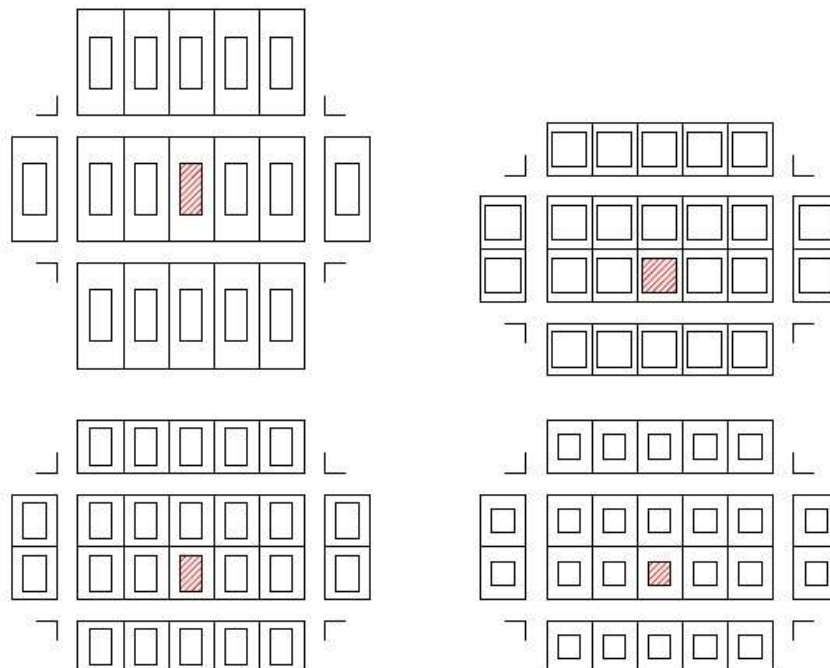
de escritório em Florianópolis. A Figura 21 mostra a implantação dos edifícios nos lotes e as respectivas taxas de ocupação (TO).

Figura 21 - Implantação dos modelos nos lotes estipulados para estudo e suas respectivas TO.



Os modelos da Figura 21 foram simulados com a implantação conforme a Figura 22 em duas situações: (a) com entorno da mesma altura, e (b) sem entorno.

Figura 22 - Cenários para análise do sombreamento



Os parâmetros de entrada replicaram o descrito na seção 3.3.1. Foram avaliadas também oito orientações diferentes ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$ e 315°), tendo como referência o azimuth da fachada principal, a fim de avaliar a influência da orientação solar no consumo de energia do edifício.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

Dois produtos importantes no estudo do consumo de energia em edifícios são resultado desta pesquisa: (1) a identificação de edifícios representativos da categoria de escritórios em Florianópolis; e (2) o desenvolvimento de método simplificado de cálculo do consumo de energia que facilita a comparação entre edifícios reais e representativos.

Optou-se neste trabalho, para facilitar a compreensão, o desenvolvimento do método a partir de um exemplo prático. No entanto, o método é suficientemente abrangente para ser aplicado a uma classe de problemas similares.

4.1. IDENTIFICAÇÃO DE EDIFÍCIOS REPRESENTATIVOS

4.1.1. Forma dos edifícios

Para a forma quadrada, foram adotados três *clusters* (Figura 23), sendo um deles considerado *outlier*. *Outliers* são dados que se distanciam radicalmente de todos os outros, valores que fogem da normalidade e podem causar desequilíbrio nos resultados obtidos. O *cluster* excluído continha apenas um edifício da amostra. Assim, restaram dois grandes grupos, que juntos representam 96% da amostra de edifícios de forma quadrada.

Para a forma retangular, a análise considerou oito *clusters* (Figura 24). Seis deles foram excluídos, o que soma dez elementos da amostra de 163 edifícios de forma retangular. A exclusão se justifica pelo fato de que estes *clusters* contêm apenas um ou três edifícios. Assim, foi possível formar dois grandes e consistentes grupos, que juntos representam 94% da amostra de edifícios retangulares.

Figura 23 - Dendrograma de 3 *clusters* para os edifícios de forma quadrada.

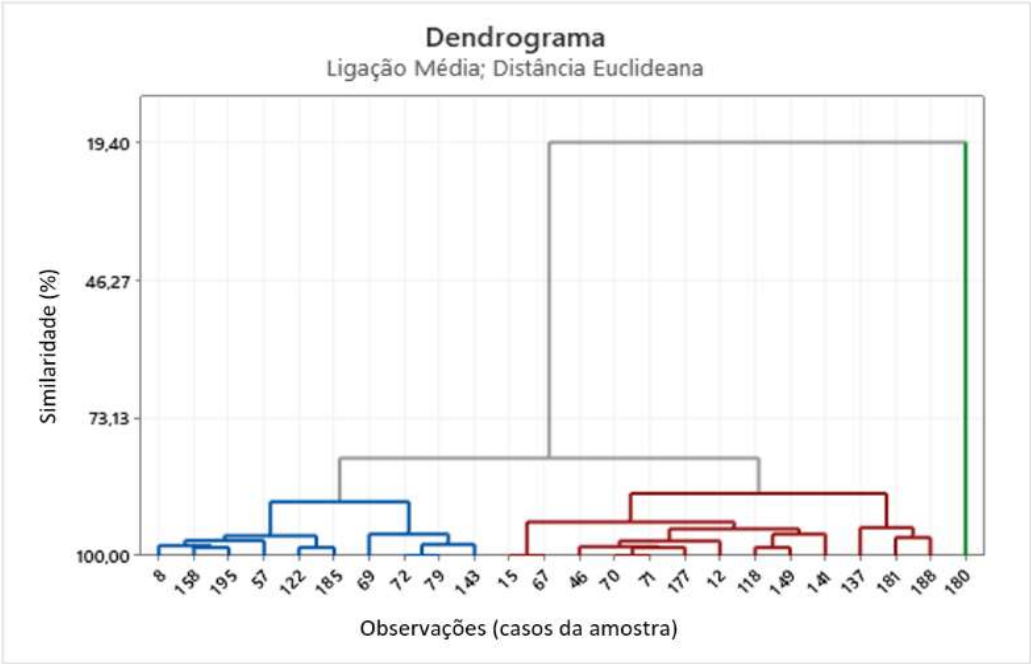
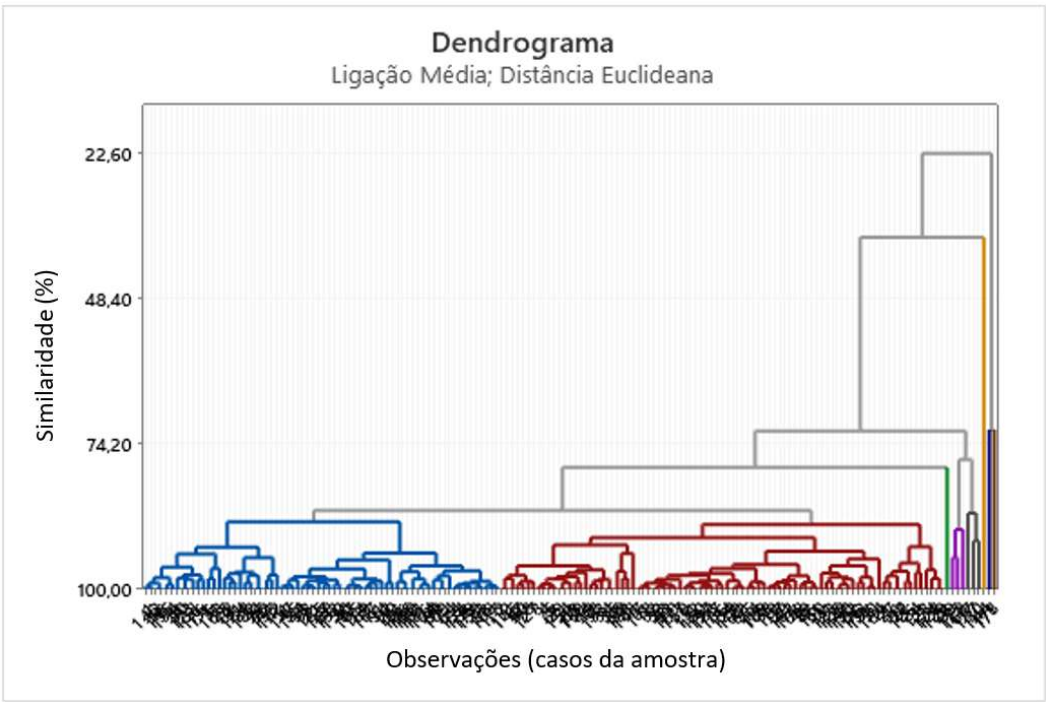


Figura 24 - Dendrograma de 8 *clusters* para os edifícios de forma retangular.



A Tabela 19 mostra a quantidade de edifícios em cada cluster para ambas as formas. A Tabela 20 mostra a quantidade de casos excluídos e analisados para cada

forma e consequentemente sua prevalência. É possível verificar que, tanto para a forma quadrada quanto para a retangular, a quantidade de edifícios excluídos ficou próxima a 5%, o que pode ser considerado um baixo índice.

Tabela 19 - Quantidade de edifícios em cada *cluster* para ambas as formas.

Cluster	Quadrada	Retangular
1	10 edifícios	68 edifícios
2	13 edifícios	85 edifícios
3	1 edifício	1 edifícios
4	-	3 edifícios
5	-	3 edifícios
6	-	1 edifícios
7	-	1 edifícios
8	-	1 edifícios

Tabela 20 - Distribuição dos casos excluídos/analísados por forma

	Quadrada		Retangular	
	N	%	N	%
Excluído	1	4,2%	10	6,1%
Analísados	23	95,8%	153	93,9%

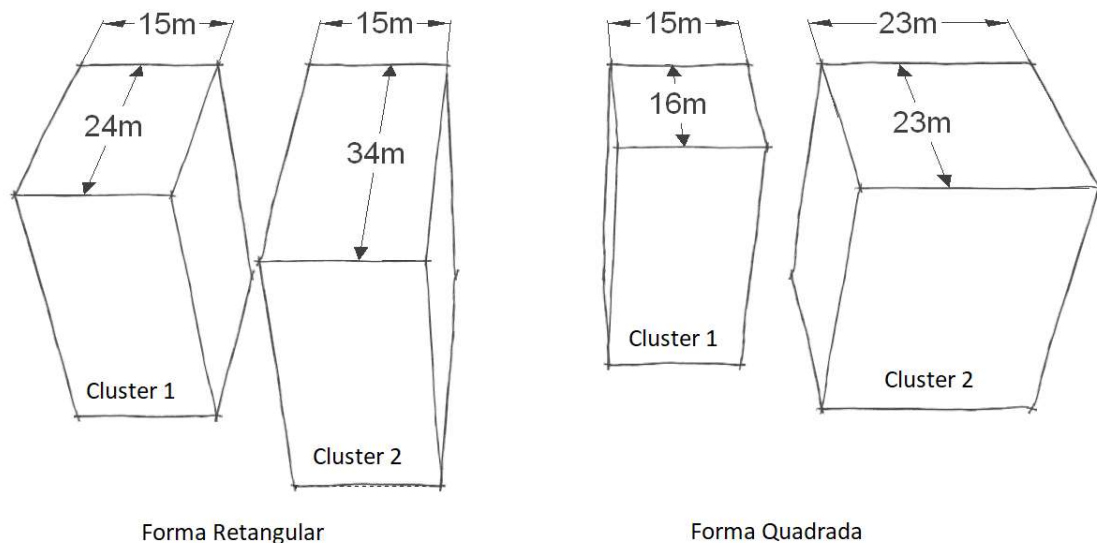
Os edifícios representativos de cada *cluster* foram selecionados com base na menor distância euclidiana até o centroide do *cluster* a que ele pertence. As distâncias de cada edifício e de cada cluster ao centroide constam no Apêndice C. A Tabela 21 indica a representatividade de cada *cluster* na amostra. A Figura 25 ilustra as dimensões dos edifícios representativos para as formas quadrada e retangular.

Tabela 21 - Edifícios representativos de cada *cluster* para as formas quadrada e retangular.

Forma	Edifício da Amostra	Cluster	Representatividade do cluster na amostra	Largura (m)	Profundidade (m)
Quadrada*	185	1	41,7%	16	15
	12	2	54,2%	23	23
Retangular	191	1	41,7%	24	15
	77	2	52,2%	15	34

(*). Destaca-se que a forma quadrada considera tolerância de 12,5% entre as duas dimensões.

Figura 25 - Dimensões dos edifícios representativos de cada *cluster*, formas retangular e quadrada.



Para validar a diferença entre os *clusters* as médias das variáveis largura e profundidade para ambas as formas foram comparadas por meio do teste ANOVA (Tabelas 22 e 23). Definido o nível de significância de 0,05 (5%), conclui-se que a diferença média entre os *clusters* é altamente significativa, mostrando assim que os *cluster* são bem distintos.

A variável N corresponde ao número de edifícios em cada *cluster*. A mediana é uma medida de posição que divide a amostra ao meio, ou seja, 50% dos edifícios estão acima do valor da mediana e 50% abaixo. A mediana é uma medida que deve ser analisada em relação à média, pois quanto mais próximo seu valor for em relação à média, mais simétrica é a distribuição. A variabilidade é medida pelo desvio padrão. Quanto mais próximo (ou maior) esse valor for em relação à média, maior será a variabilidade, ou seja, a heterogeneidade dos dados. O Coeficiente de Variação (CV) é uma medida que avalia o quanto a variabilidade representa da média. O ideal é que este índice seja o mais baixo possível (<50%), pois desta forma, haverá baixa variabilidade e, conseqüentemente, uma homogeneidade dos resultados. Os valores mínimo e máximo são respectivamente o menor e o maior valor encontrado na amostra. O intervalo de confiança (IC), ora somado e ora subtraído da média, mostra

a variação da média segundo uma probabilidade definida que corresponde ao grau de confiança, ou seja, se a probabilidade for 0,9, o grau de confiança será de 90%.

Tabela 22 - Comparação dos *clusters* para a forma quadrada.

<i>Cluster</i>		Média	Mediana	Desvio Padrão	CV	Min	Max	N	IC	P-valor
Largura	1	15,00	16	2,71	0	11	18	10	1,68	<0,001
	2	23,15	22	2,58	0	20	28	13	1,40	
Profundidade	1	14,90	16	2,56	0	11	18	10	1,59	<0,001
	2	23,69	24	3,04	0	20	30	13	1,65	

Fonte: a autora

Tabela 23 - Comparação dos *clusters* para a forma retangular.

<i>Cluster</i>		Média	Mediana	Desvio Padrão	CV	Min	Max	N	IC	P-valor
Largura	1	22,10	18	10,26	0	7	45	68	2,44	<0,001
	2	15,20	13	7,56	0	6	39	85	1,61	
Profundidade	1	15,81	16	5,01	0	6	26	68	1,19	<0,001
	2	34,38	33	7,55	0	23	55	85	1,60	

4.1.2. Percentual de abertura das fachadas

Para a análise do *WWR*, mostrou-se mais coerente o arranjo com 14 *clusters* (Figura 26), sendo que o maior deles representa 66,48% da amostra, com similaridade entre os elementos contidos nele próxima de 75%.

Os *clusters* 1 e 2, juntos, correspondem a 73,74% da amostra de 179 edifícios analisados. É importante perceber que o *WWR* do edifício mais próximo do centroide do *cluster* 1, tomado como representativo da categoria, corrobora com a faixa mencionada como a mais frequente nos diagramas anteriormente apresentados (Figura 16).

A Tabela 24 mostra o número de edifícios contidos em cada *cluster*, a representatividade dos *clusters* na amostra, os edifícios representativos de cada *cluster* e seus respectivos *WWRs*. Os dois edifícios contidos no *cluster* 11 apresentam a mesma distância euclidiana até o centroide. O mesmo ocorre com o *cluster* 13.

Figura 26 - Dendrograma de 14 *clusters* para análise do *WWR* em 179 edifícios da amostra.

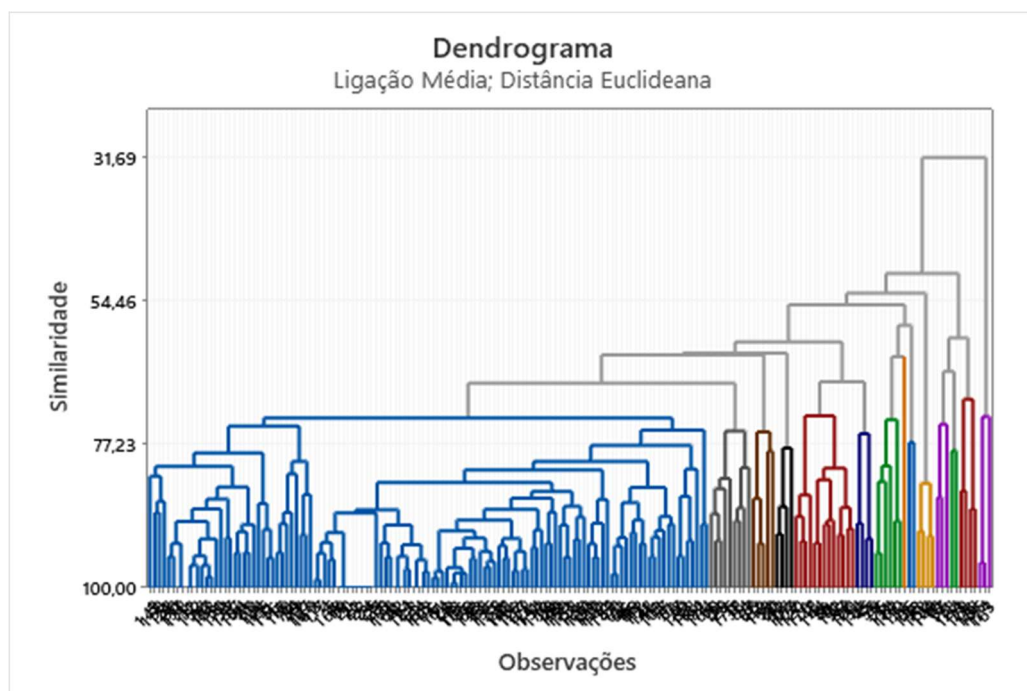


Tabela 24 - Número de edifícios contidos em cada cluster, representatividade dos clusters na amostra, edifícios representativos de cada *cluster* e seus respectivos *WWRs*.

Cluster	N	Representatividade do cluster na amostra	Edifício representativo do cluster	WWR norte	WWR sul	WWR leste	WWR oeste
1	119 edifícios	66,48%	130	33%	30%	24%	24%
2	13 edifícios	7,26%	112	0%	0%	61%	36%
3	6 edifícios	3,35%	9	55%	25%	58%	58%
4	3 edifícios	1,67%	10	0%	75%	54%	54%
5	9 edifícios	5,02%	19	66%	35%	24%	13%
6	4 edifícios	2,23%	36	83%	87%	29%	29%
7	4 edifícios	2,23%	48	21%	14%	88%	48%
8	5 edifícios	2,79%	92	12%	64%	13%	13%
9	1 edifícios	0,55%	39	76%	2%	94%	94%
10	4 edifícios	2,23%	80	0%	27%	0%	66%
11	2 edifícios	1,11%	72	88%	17%	88%	5%
			160	80%	55%	82%	16%
12	4 edifícios	2,23%	85	1%	83%	83%	0%
13	2 edifícios	1,11%	87	52%	98%	94%	52%
			137	57%	94%	57%	60%
14	3 edifícios	1,67%	191	83%	83%	100%	100%

Para validar a diferença entre os *clusters* as médias dos *WWRs* foram comparadas por meio do teste ANOVA. Considerando o nível de significância de 0,05 (5%), é possível concluir que a diferença média entre os *clusters* é altamente significativa, comprovando que eles são distintos (Apêndice F).

Para determinar com precisão entre quais clusters ocorre a diferença, foi conduzido o teste *post hoc* de Tukey que é utilizado para comparar todos os clusters aos pares (Apêndice G).

4.2. APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO PARA CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA EM EDIFÍCIOS

Considerando que a análise dimensional pode ter como ponto de partida resultados experimentais, neste estudo foram utilizados os resultados da simulação termoenergética dos arquétipos para validação do equacionamento proposto para cálculo de consumo de energia em edifícios de escritórios em Florianópolis.

Os parâmetros de entrada para validação do equacionamento replicaram os valores estabelecidos para a simulação termoenergética dos modelos conforme segue:

Tabela 25 - Parâmetros de entrada para o equacionamento do consumo de energia do edifício.

Parâmetro	Descrição	Valor adotado para cálculo do consumo total
W_{il}	Densidade de potência instalada Sistema de iluminação	12W/m ²
W_{eq}	Densidade de potência instalada Equipamentos e tomadas do prédio	16W/m ²
$\frac{Cap_{ac}}{COP}$	Densidade de potência instalada Sistema de climatização de ar	Dada pela densidade de capacidade instalada, resultado da simulação, e COP fixado em 3,2 (W/W)
A_u	Área do pavimento tipo	Área do pavimento tipo do modelo (m ²)
A_v	Área envidraçada	Área de vidro nas fachadas (m ²)
A_f	Área da fachada	Área total de fachada (m ²)
t	Tempo de utilização do prédio	3328 horas/ano (260 dias úteis+52 sábados/ano)
p	Densidade de ocupação	0,125 (8m ² por pessoa)
n	Número de pavimentos do edifício	2 a 12 pavimentos

Após aplicar a expressão teórica proposta para calcular o consumo de energia em edifícios, foi possível determinar a diferença percentual entre os valores calculados e aqueles obtidos por meio da simulação computacional dos quatro arquétipos.

Considerando que W_{il} e W_{eq} são linearmente proporcionais à área total da edificação (área útil do pavimento tipo multiplicada pelo número de pavimentos), observou-se uma diferença significativa apenas no consumo relacionado ao sistema de ar condicionado. É necessário, portanto, reiterar o conceito de que a análise dimensional permite uma série de manipulações, desde que os grupos π permaneçam sem dimensões (como visto na Eq. 9). Portanto, os valores das constantes sem dimensão, i ou $\exp(\pi_{m-n})$, podem ser ajustados com base em valores experimentais ou simulados.

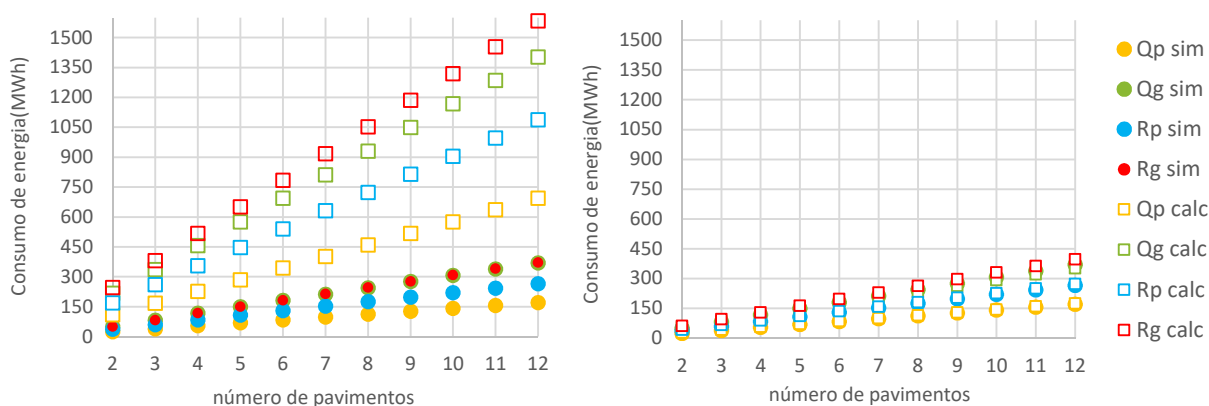
Assim, o fator 0,25 foi encontrado por tentativa e erro e aplicado à equação para calcular o consumo de energia para climatização do edifício (C_{ac}). Em teoria, esse fator representa todas as outras características não incluídas na equação, como geometria do edifício, tipo de vidro, diferenças nas fachadas, tipo de sistema de ar condicionado, diferentes *schedules* ao longo do dia, semana e mês, etc. A influência de todos esses parâmetros pode ser explorada na simulação detalhada do desempenho do edifício. No entanto, a Eq. 63 pode ser aplicada para estimar o consumo de energia de arquétipos com uma variedade de aplicações, como estabelecer um *benchmark* de consumo de energia.

$$E = (W_{il} \cdot A_u \cdot t \cdot n) + (W_{eq} \cdot t \cdot A_u \cdot n) + \left(\frac{\sqrt{p \cdot A_v \cdot A_f \cdot A_u} \cdot Cap_{ac} \cdot t}{COP} \cdot 0,25 \right) \quad (63)$$

A Figura 27 mostra a comparação entre os valores de consumo de energia do sistema de climatização obtidos por meio da simulação computacional *versus* o consumo de energia calculado usando a equação derivada da análise dimensional para os quatro arquétipos, considerando configurações de 2 a 12 pavimentos. O gráfico à esquerda exibe os valores calculados pela Eq.62, enquanto o gráfico à direita apresenta os valores ajustados após a aplicação do fator 0,25, conforme Eq.63. Qualquer número poderia ser aplicado na equação para ajustar os valores calculados

aos valores observados. Neste caso, os valores observados foram gerados por meio de simulações computacionais.

Figura 27 - Consumo de energia obtido por meio de simulação computacional (sim) em comparação com os valores calculados (calc) usando Eq.62 à esquerda, enquanto a comparação usando Eq.63 à direita.



O Apêndice I mostra o comparativo do consumo de energia simulado e calculado por meio da Eq.63 para os quatro modelos com diferentes gabaritos, variando de 2 a 12 pavimentos.

Os valores de consumo obtidos por meio da equação foram também testados na Plataforma de Cálculos Benchmarking de Consumo de Energia desenvolvida no âmbito do projeto Desempenho Energético Operacional em Edificações (DEO/CBCS)² e comparados com os valores de consumo obtidos por simulação (Tabela 26).

Tabela 26 – Valores reais de consumo obtidos por meio da Plataforma DEO/CBCS comparados aos valores de consumo obtidos por simulação termoenergética e calculados por meio da Eq.63.

Modelo	Área útil condicionada (m²)	Número de andares	Densidade ocupacional (pessoa/m²)	Consumo Equação (kWh/m²/ano)	Consumo Simulado (kWh/m²/ano)	Consumo da equação na Plataforma DEO (kWh/m²/ano)
Qp	675	3	8	156	155	156
Qg	1587	3	8	148	154	148
Rp	1080	3	8	153	157	153
Rg	1530	3	8	152	156	152

² <https://plataformadeo.cbcs.org.br/>

Foi possível observar que, quando inserido o valor de consumo total de energia elétrica em um período de 12 meses calculado por meio da Eq.63 para os modelos, a ferramenta forneceu como resultado o mesmo consumo real de energia (kWh/m²/ano).

Considerando as formas quadradas e retangulares, outros modelos foram testados para avaliar o impacto das variáveis Au , t e n na diferença entre os valores de consumo de energia calculados e simulados, conforme Tabela 27.

Tabela 27 – Dimensões dos casos avaliados para teste da equação e diferença percentual entre o consumo final calculado e o consumo obtido por simulação para edifícios quadrados e retangulares com áreas, número de pavimentos e tempo de uso variados.

	Dimensões	Área (m ²)	t (h)	n	Consumo Calculado (MWh)	Consumo Simulado (MWh)	Diferença absoluta
Teste 1	16x16	256	3328	2	78	79	1,2%
Teste 2	17x17	289	3328	2	87	89	1,6%
Teste 3	18x18	324	3328	2	97	99	2,2%
Teste 4	19x19	361	3328	2	107	109	2,8%
Teste 5	21x21	441	3328	2	129	133	3,1%
Teste 6	23x23	529	3328	2	153	158	3,3%
Teste 7	24x24	576	3328	2	166	171	3,3%
Teste 8	15x20	300	3328	4	186	194	4,4%
Teste 9	18x30	540	3328	12	986	1047	6,1%
Teste 10	10x16	160	3328	10	268	271	1,3%
Teste 11	12x9	108	3328	12	217	221	1,7%
Teste 12	12x9	108	3328	6	108	110	1,8%
Teste 13	10x25	250	3328	6	254	251	1,4%
Teste 14	14x28	392	3328	8	497	513	3,2%
Teste 15	11x40	440	3328	11	837	803	4,0%
Teste 16	15x24	360	3120	8	421	444	5,4%
Teste 17	19x19	361	3120	6	308	330	7,2%
Teste 18	15x24	360	3380	2	107	108	1,5%
Teste 19	24x24	576	3588	5	458	487	6,3%
Teste 20	18x30	540	3588	5	441	449	1,7%
Teste 21	18x30	540	3068	12	907	969	6,8%

Nos testes realizados, mantendo-se as características da envoltória dos modelos e o clima a que estavam sujeitos, a equação forneceu uma estimativa do consumo de energia total com diferença de no máximo 7,2% em relação ao valor obtido por simulação para um edifício com até 12 pavimentos, independentemente de

sua forma, tamanho e tempo de uso. Edifícios retangulares maiores em dimensões e altura apresentaram uma maior diferença entre os valores previstos e simulados, o que confirma a influência da forma no consumo de energia calculado (Tabela 27). Assim, a equação fornecida pela análise dimensional está limitada a tamanhos, formas e construções específicas.

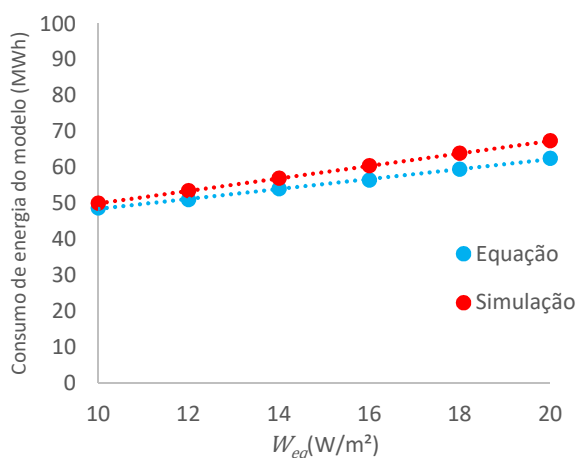
Testes adicionais foram realizados para verificação do impacto de cada variável na relação entre os consumos calculados pela equação e obtidos por meio da simulação termoenergética. Para isso, um pavimento tipo do modelo Rp foi submetido a uma nova rodada de cálculos e simulações.

A densidade de potência instalada para equipamentos (W_{eq}) foi alterada conforme valores listados na Tabela 28. A diferença entre os valores de consumo de energia total do edifício é inferior a 10% e aumenta à medida que a potência instalada também é aumentada (Figura 28).

Tabela 28 - Diferença percentual entre o consumo final calculado e o consumo simulado para diferentes densidades de potência instaladas para tomadas e equipamentos do edifício.

Área (m ²)	W_{il} (W/m ²)	COP	p (m ² /pessoa)	h_p	n	WWR	W_{eq} (W/m ²)	Consumo Calculado (MWh)	Consumo Simulado (MWh)	Diferença absoluta
360	12	3,2	8	3	1	30%	10	49	50	2,8%
							12	51	54	4,8%
							14	54	57	5,3%
							16	57	60	7,0%
							18	60	64	7,0%
							20	63	67	7,8%

Figura 28 - Consumo de energia calculado e obtido por simulação para variação de W_{eq} .



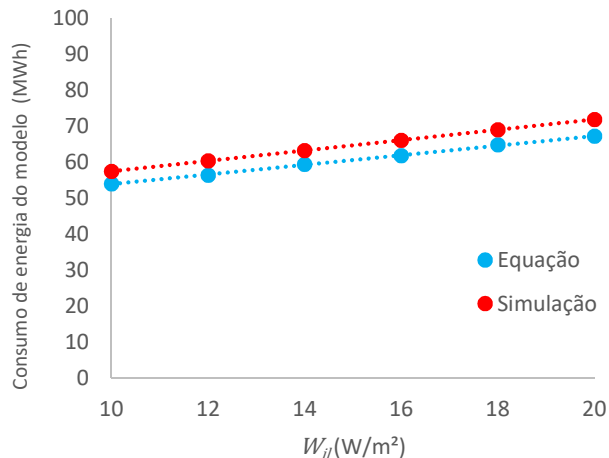
A densidade de potência instalada para iluminação (W_{il}) foi alterada conforme valores listados na Tabela 29.

Tabela 29 - Diferença percentual entre o consumo final calculado e o consumo simulado para diferentes densidades de potência instaladas para o sistema de iluminação do edifício.

Área (m ²)	W_{eq} (W/m ²)	COP	p (m ² /pessoa)	h_p (m)	n	WWR	W_{il} (W/m ²)	Consumo Calculado (MWh)	Consumo Simulado (MWh)	Diferença absoluta
360	16	3,2	8	3	1	30%	10	54	58	6,4%
							12	57	60	7,0%
							14	60	63	6,4%
							16	62	66	6,9%
							18	65	69	6,4%
							20	67	72	6,9%

É possível perceber que o consumo total de energia do edifício calculado por meio da equação permanece próximo do valor obtido por simulação (Figura 29), com diferença média de 6,7%, sendo a máxima de 7,0% e mínima de 6,4%.

Figura 29 - Consumo de energia calculado e obtido por simulação para variação de W_{il} .

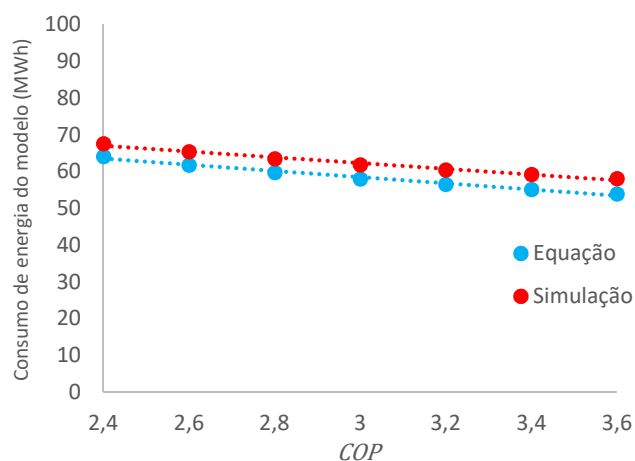


O coeficiente de performance (COP) foi alterado conforme valores listados na Tabela 30. A diferença média entre os valores calculados e obtidos por simulação é de 6,6% e aumenta à medida que a eficiência do sistema é aumentada.

Tabela 30 - Diferença percentual entre o consumo final calculado e o consumo simulado para diferentes coeficientes de performance do sistema de condicionamento de ar.

Área (m ²)	W_{il} (W/m ²)	W_{eq} (W/m ²)	p (m ² /pessoa)	h_p (m)	n	WWR	COP	Consumo Calculado (MWh)	Consumo Simulado (MWh)	Diferença absoluta
360	12	16	8	3	1	30%	2,4	64	68	5,3%
							2,6	62	65	5,8%
							2,8	60	64	6,2%
							3	58	62	6,6%
							3,2	57	60	7,0%
							3,4	55	59	7,4%
							3,6	54	58	7,7%

Figura 30 - Consumo de energia calculado e obtido por simulação para variação do COP .



Diferentes densidades de ocupação foram testadas para verificação da influência na relação entre os consumos calculados e obtidos por meio da simulação do modelo. Para o comparativo, a densidade é dada pela relação área por ocupante do edifício. Foram avaliados os valores listados na Tabela 31.

Há de se considerar que a densidade de ocupação é um parâmetro importante na incerteza das previsões de consumo, principalmente em um prédio comercial onde há fluxo variável de pessoas e o horário de trabalho muitas vezes não é bem definido.

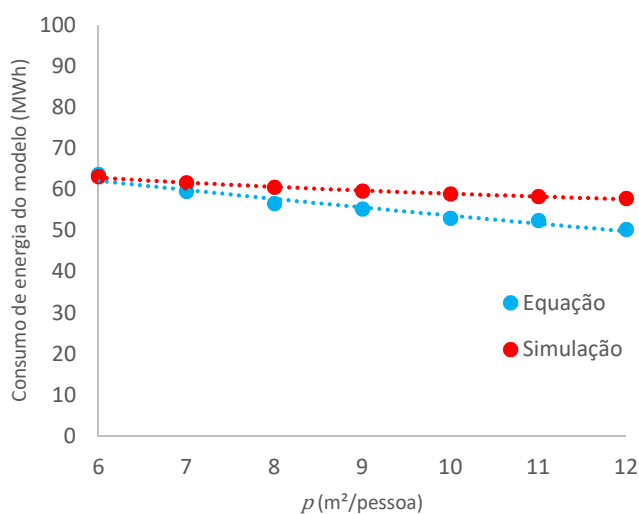
A Figura 31 ilustra o impacto da alteração da densidade de ocupação no consumo calculado pela equação 63. Percebe-se que alterar a variável p pode refletir em diferenças entre os consumos equacionado e obtido por simulação maiores de

10% quando aplicadas densidades mais baixas, com razão de área por pessoa acima de 9 m².

Tabela 31 - Diferença percentual entre o consumo final calculado e o consumo simulado para diferentes densidades ocupacionais.

Área (m ²)	W_{il} (W/m ²)	W_{eq} (W/m ²)	COP	h_p (m)	n	WWR	p (m ² /pessoa)	Consumo Calculado (MWh)	Consumo Simulado (MWh)	Diferença absoluta
360	12	16	3,2	3	1	0,3	6	64	63	0,9%
							7	60	62	3,5%
							8	57	60	7,0%
							9	55	60	8,0%
							10	53	59	11,2%
							11	52	58	11,2%
							12	50	58	14,9%

Figura 31 - Consumo de energia calculado e obtido por simulação para variação de p .

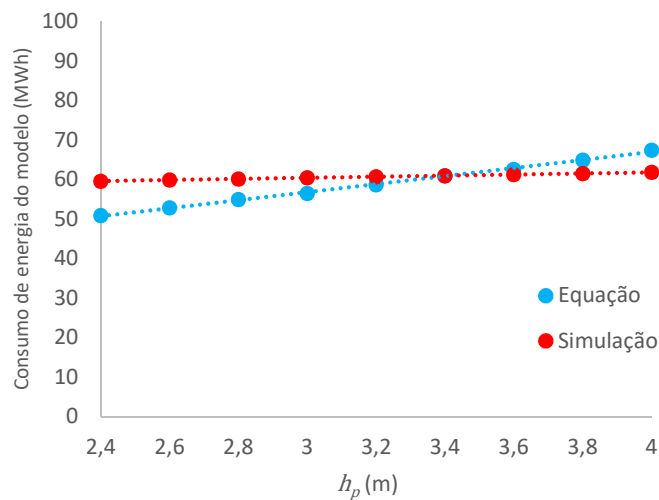


A variação do pé-direito do pavimento tipo (h_p) mostrou diferenças maiores que 10% entre os valores de consumo calculados pela equação e os obtidos por meio da simulação para alturas menores de 2,8 m. A faixa de altura comumente utilizada (entre 2,8 e 3,2 m) apresentou diferença tolerável entre os valores de consumo, como mostra a Tabela 32.

Tabela 32 - Diferença percentual entre o consumo final calculado e o consumo simulado para diferentes alturas do pavimento tipo do modelo submetido à simulação.

Área (m ²)	W_{il} (W/m ²)	W_{eq} (W/m ²)	COP	p (m ² /pessoa)	n	WWR	h_p (m)	Consumo Calculado (MWh)	Consumo Simulado (MWh)	Diferença absoluta
360	12	16	3,2	8	1	0,3	2,4	51	60	17,2%
							2,6	53	60	13,3%
							2,8	55	60	9,5%
							3	57	60	7,0%
							3,2	59	61	3,5%
							3,4	61	61	0,1%
							3,6	63	61	2,1%
							3,8	65	62	5,2%
							4	67	62	8,3%

Figura 32 - Consumo de energia calculado e obtido por simulação para variação de h_p .

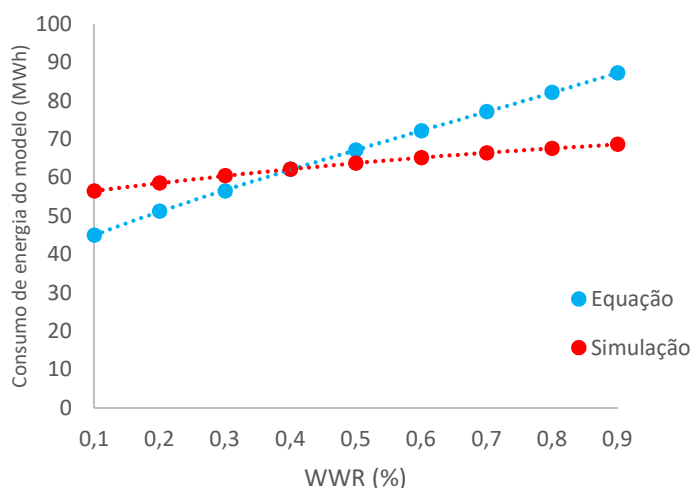


A variação de WWR também foi testada, sendo o parâmetro que mostrou maior influência sobre a diferença entre os consumos calculados e obtidos por meio da simulação (Tabela 33). É possível observar que dentro da faixa percentual de 30 a 60% de abertura da fachada, o consumo de energia obtido por meio da equação apresentou diferença menor de 10% em relação ao consumo de energia obtido por meio da simulação termoenergética dos modelos.

Tabela 33 - Diferença percentual entre o consumo final calculado e o consumo simulado para diferentes WWR s do modelo submetido à simulação.

Área (m ²)	W_{il} (W/m ²)	W_{eq} (W/m ²)	COP	h_p (m)	p (m ² /pessoa)	n	WWR	Consumo Calculado (MWh)	Consumo Simulado (MWh)	Diferença absoluta
360	12	16	3,2	3	8	1	10%	45	56	25%
							20%	51	59	14,2%
							30%	57	60	7,0%
							40%	62	62	0%
							50%	67	64	5,1%
							60%	72	65	9,7%
							70%	77	66	13,9%
							80%	82	68	17,8%
							90%	87	69	21,4%

Figura 33 - Consumo de energia calculado e obtido por simulação para variação do WWR .



A aplicação da equação se mostrou viável para estimativa de consumo de energia de edifícios comerciais que tenham de 30 a 60% da área de fachada envidraçada. Para aplicação do equacionamento a edifícios que apresentem valores de WWR abaixo de 30% e acima de 60%, o fator “0,25” atribuído ao cálculo de C_{ac} deve ser adaptado considerando dados experimentais obtidos por meio de simulação termodinâmica. Para cada WWR existe um quociente que permitirá uma aproximação dos valores de consumo calculado e obtido por simulação com baixas margens de erro.

A Eq.62 é flexível e poderia incluir outros parâmetros, tais como características físicas dos componentes da envoltória ou até mesmo dados do arquivo climático

utilizado. Essa é uma das vantagens da aplicação da análise dimensional, a possibilidade de otimização das equações, incluindo ou excluindo parâmetros à medida que se fizer necessário.

4.2.1. A inclusão do parâmetro “sombreamento” do entorno na equação

Ao simular o consumo de energia dos modelos Qp, Qg, Rp e Rg com diferentes entornos e orientações solares foi possível observar que, quando considerado entorno do mesmo gabarito do modelo nas configurações de quadra testadas, a economia de energia variou pouco em função da orientação solar do edifício. Esse resultado é coerente com dados já encontrados por Mangan et al (2021) que, ao analisarem edifícios de formas quadrada e retangular com alturas de 3 a 15 pavimentos em 120 cenários para o clima de Istambul-Turquia, apontaram que a altura do edifício e os afastamentos do entorno têm um papel mais significativo do que a orientação solar no desempenho energético e econômico dos edifícios. O Apêndice J apresenta os valores de consumo de energia simulados para cada orientação.

A Tabela 34 mostra os gabaritos dos modelos simulados e os valores de consumo de energia total correspondentes a cada cenário, considerado o azimute de 0°. A Tabela 35 separa o consumo total de energia com climatização em resfriamento, aquecimento e ventilação.

Considerando o azimute de 0° como referência é possível afirmar que, quando implantados em um cenário onde os prédios circundantes possuem o mesmo gabarito dos modelos, o sombreamento causa um consumo de energia total do edifício em média 4% menor do que o edifício considerado em um lote sem entorno.

O consumo para resfriamento representa 92% do consumo com climatização do edifício. Mas é possível observar que, mesmo que o sombreamento cause uma diminuição de 6 a 16% no consumo de energia para resfriamento, quando considerado o consumo total do edifício esse impacto é pouco significativo frente à imprecisão da própria simulação.

Tabela 34 – Valores de consumo calculado por simulação para os modelos com entorno e sem entorno.

Modelo	Consumo simulado sem sombra (MWh)				Consumo simulado com sombra (MWh)				Diferença
	C_{il}	C_{eq}	C_{ac}	E	C_{il}	C_{eq}	C_{ac}	E	E
Qp 12 pavtos	115	178	158	451	115	178	141	434	-4%
Qp 6 pavtos	57	89	76	222	57	89	71	217	-2%
Qg 12 pavtos	253	393	331	978	253	393	277	924	-5%
Qg 6 pavtos	126	196	157	480	126	196	139	462	-4%
Rp 12 pavtos	172	267	234	674	172	267	201	641	-5%
Rp 6 pavtos	86	133	111	331	86	133	102	322	-3%
Rg 12 pavtos	215	334	291	841	215	334	254	804	-4%
Rg 6 pavtos	107	167	138	413	107	167	127	402	-3%
								média	-4%

Tabela 35 – Valores de consumo calculados por simulação do sistema de climatização desmebrados em uso com resfriamento, aquecimento e ventilação.

Modelo	Resfriamento (92% do C_{ac})			Aquecimento (menos de 1% do C_{ac})			Ventilação (8% do C_{ac})		
	Consumo (MWh) s/sombra	Consumo (MWh) c/sombra	Redução do consumo	Consumo (MWh) s/sombra	Consumo (MWh) c/sombra	Acréscimo do consumo	Consumo (MWh) s/sombra	Consumo (MWh) c/sombra	Redução do consumo
Qp 12 pavtos	144	129	10%	0,10	0,12	18%	13	11	16%
Qp 6 pavtos	69	65	6%	0,07	0,08	9%	6	5	9%
Qg 12 pavtos	305	257	16%	0,09	0,15	35%	26	20	22%
Qg 6 pavtos	144	128	11%	0,08	0,11	24%	12	10	17%
Rp 12 pavtos	214	185	14%	0,10	0,14	28%	19	15	20%
Rp 6 pavtos	102	94	8%	0,08	0,10	19%	9	8	12%
Rg 12 pavtos	267	234	12%	0,11	0,14	22%	23	19	19%
Rg 6 pavtos	127	117	8%	0,08	0,10	16%	11	10	11%
	Média		11%	Média		21%	Média		16%
	Desvio padrão		3%	Desvio padrão		7%	Desvio padrão		4%

O sombreamento, apesar de causar impacto significativo no consumo de energia para resfriamento, quando considerado no consumo total, na amostra avaliada representou uma diferença média no consumo total de energia de 4%. Assim, a forma simplificada de incluir o sombreamento na estimativa é considerar que os edifícios sombreados pelo entorno teriam uma economia de 4% no consumo de energia, o que pode ser expresso matematicamente da seguinte forma, como um ajuste da Eq. 62:

$$E_{sombra} = [(C_{il}) + (C_{eq}) + (C_{ac})] .0,96 \quad (64)$$

CAPÍTULO 5 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como resultado do estudo, é possível afirmar que os edifícios comerciais de escritórios de Florianópolis podem ser representados por plantas de duas formas, em quatro tamanhos distintos: (a) quadrado pequeno, medindo 16 m x 15 m e (b) quadrado grande, medindo 23 m x 23 m; (c) retângulo pequeno, medindo 24 m x 15 m e; (d) retângulo grande, medindo 15 m x 34 m. Com relação ao sistema de condicionamento de ar instalado, os edifícios da categoria utilizam majoritariamente sistemas de condicionamento individual providos por meio de aparelhos de janela e/ou *split*. No que diz respeito ao *WWR*, o edifício comercial de escritórios típico da cidade de Florianópolis possui 33% de área envidraçada na fachada norte, 30% na fachada sul, e 24% nas fachadas leste e oeste.

Estudos brasileiros desenvolvidos nos últimos 17 anos, com o uso de modelos de edifícios para simulação e avaliação do consumo de energia foram baseados em edifícios hipotéticos, modelos da literatura internacional. Naqueles onde analisou-se de edifícios reais, em sua maioria, envolveram amostras reduzidas.

Os resultados do presente estudo mostram que as características do edifício de escritório típico de Florianópolis, com relação ao *WWR*, forma e dimensões, diferem dos modelos utilizados em estudos anteriores com foco na avaliação do consumo de energia de edifícios de escritórios da cidade. Poucos modelos encontrados na literatura representariam o edifício de escritórios típico de Florianópolis. Alguns estudos como os de Rupp (2011) e Santesso e Chvatal (2018), se aproximam ao utilizar modelos de proporção 1:1 e 1:2 nas dimensões do edifício. No entanto, o *WWR* de 33% na fachada norte, 30% na fachada sul, e 24% nas fachadas leste e oeste não é explorado em nenhum deles. A diferença encontrada aponta também para a importância da regionalização dos modelos, consideradas as dimensões continentais do Brasil, características climáticas e especificidades da legislação do uso do solo em cada cidade/região.

O cálculo do consumo de energia por meio da análise dimensional se mostrou viável ao reduzir as entradas a parâmetros com os quais arquitetos têm familiaridade em suas rotinas de trabalho.

A equação tem potencial para estimativas de consumo de energia em edifícios, fornecendo valores de referência como *benchmark* em estágio inicial de projeto, podendo ser aplicada na definição de modelos de referência em programas de etiquetagem ou certificação ambiental. Portanto, estimativas de consumo de energia podem ser feitas para arquétipos com características semelhantes às usadas como base para este estudo. Simulações adicionais podem ser realizadas para estabelecer equações específicas para diferentes arquétipos, fornecendo estimativas de uso de energia com maior precisão.

Para a aplicação da Eq.63 a edifícios sujeitos a diferentes climas, com uma combinação de elementos de construção e valores de *WWR* diferentes dos modelos testados, o fator "0,25" atribuído ao cálculo de C_{ac} deve ser ajustado com base em novos dados (por exemplo, de simulações computacionais). Em outras palavras, o consumo de energia relacionado às características da envoltória (que inclui *WWR*) e ao clima foi simplificado para o fator "0,25" na equação proposta para os modelos do estudo. No entanto, para cada condição combinada de envoltória e clima, existe um fator que permitirá uma aproximação dos valores de consumo de energia calculados e simulados com uma diferença aceitável. Assim, a modificação dessa constante poderia ser estudada para outras combinações de características da envoltória em edifícios sujeitos a diferentes climas.

A metodologia apresentada pode ser usada para abordar problemas semelhantes. Seu desenvolvimento neste estudo, usando o conjunto de edifícios de escritórios em Florianópolis como exemplo, foi feito para auxiliar o leitor na compreensão da metodologia e na identificação dos parâmetros de cálculo.

No contexto deste estudo, não havia dados de consumo de eletricidade disponíveis para os edifícios em investigação, portanto, a validação empírica não foi possível. Portanto, estudos futuros poderiam usar valores reais de consumo em vez de valores de simulação para otimizar a teoria proposta.

A aplicação da análise de agrupamento para determinação de um cenário de entorno típico é inviável devido à diversidade de usos do solo e deslocamentos urbanos. Além disso, a configuração de quadras está interligada a aspectos de zoneamento e outros condicionantes legais. Um cenário foi criado para a área mista

central da cidade, mas a análise de sombreamento pode variar no restante da cidade, de acordo com parâmetros de gabarito dos prédios e largura de vias e passeios estipulados pelo Plano Diretor para cada zona da cidade.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

Os problemas gerais abordados nesta tese consistiram em como acessar o desempenho energético de um parque imobiliário existente e como definir o consumo de energia de um modelo de referência de forma simplificada. Os objetivos do estudo são desafiadores, devido à indisponibilidade de informações de consumo de energia dos edifícios e a dificuldade de descrever e padronizar o entorno dos edifícios.

Nas primeiras etapas da pesquisa, discutiu-se como classificar o parque imobiliário existente no nível urbano para identificar edifícios representativos que possam ser utilizados como referência na avaliação do consumo de energia de uma categoria de edifícios. Uma amostra de 197 edifícios comerciais de escritórios na cidade de Florianópolis foi estudada, adotando a abordagem *k-means* como metodologia de classificação de 187 edifícios quanto à sua forma e dimensões e 179 edifícios quanto ao *WWR* (razão de área de janela nas fachadas). O edifício mais próximo do centroide de cada *cluster* foi determinado como representativo dos grupos. A análise multivariada do sistema de condicionamento de ar não foi necessária já que a análise da frequência relativa mostrou que a utilização de sistemas individuais de condicionamento em edifícios de escritório é uma realidade em Florianópolis, o que limita o estudo de outros sistemas dotados de centrais de água gelada. Os sistemas individuais de condicionamento de ar (*split* e aparelhos de janela) foram unificados na análise por possuírem funcionamento e metodologia de cálculo de consumo semelhantes.

Considerando que 83% dos edifícios de escritórios de Florianópolis são retangulares e 12% são quadrados, o modelo Rp (retângulo pequeno) representa 34% dos edifícios da categoria, o modelo Rg (retângulo grande) 43%, o modelo Qp (quadrado pequeno) 5% e o modelo Qg (quadrado grande) 7%. O *WWR* tido como representativo aproxima-se de 30% em todas as fachadas.

A avaliação detalhada do desempenho energético de um prédio requer uma grande quantidade de dados de entrada relacionados à categoria do edifício, condições ambientais, propriedades termofísicas da envoltória, geometria, estratégias de controle dos diferentes sistemas, entre vários outros parâmetros. O uso de

ferramentas de software especializadas apresenta muitos desafios em relação à obtenção de informações confiáveis e detalhadas, o que cria uma curva de aprendizado acentuada para arquitetos e engenheiros. Na fase de avaliação preliminar, pode ser mais conveniente recorrer a um modelo simplificado que permita estimativas rápidas acerca do consumo de energia com aceitável nível de precisão e sem custo computacional excessivo ou experiência do usuário. A análise dimensional é um meio de simplificar um problema físico recorrendo à homogeneidade dimensional para reduzir o número de variáveis do problema.

A Eq.63 foi validada por meio da comparação do consumo de energia calculado por simulações dinâmicas detalhadas realizadas no *EnergyPlus* para os modelos representativos de edifícios de escritório no clima de Florianópolis.

É possível afirmar que a equação, apresentada por meio da teoria adimensional, é capaz de fornecer uma estimativa do consumo de energia total de um edifício de escritórios de até 12 pavimentos com diferença menor do que 10% em relação ao consumo obtido por meio da simulação computacional, independente da forma (quadrada e retangular), tamanho e gabarito. A aplicação da equação se mostrou viável diante da variação de outros parâmetros, resultando em faixas aceitáveis de diferença entre os consumos calculados e obtidos por simulação computacional.

Adicionalmente, a equação é passível de ajustes, podendo incluir outros parâmetros de entrada na medida que for necessário. Assim, a análise dimensional se mostra uma ferramenta prática e poderosa para estimar o consumo de energia de edifícios, a fim de estabelecer um ponto de referência para uma variedade de aplicações, como análises preliminares de uso de energia do edifício no projeto conceitual ou mesmo para o desenvolvimento de regulamentações de desempenho de edifícios.

6.1. RECOMENDAÇÃO DE FUTUROS TRABALHOS

1- Ao considerar os edifícios de escritório totalmente climatizados, o estudo não correlacionou a utilização da ventilação natural ao sistema de ar

condicionado e ao *WWR* estabelecidos como representativos da categoria. Estudos futuros poderiam considerar a climatização de modo misto (ventilação híbrida).

2- No contexto deste estudo, não existiam dados de consumo de eletricidade disponíveis dos edifícios estudados, portanto, não foi possível realizar a validação empírica. Assim, estudos futuros poderiam utilizar valores de consumo reais em vez de valores obtidos por simulação para validação da equação proposta.

3- A constante aplicada no cálculo do consumo de energia para climatização do edifício pode ser estudada considerando diferentes *WWR's* e características da envoltória dos modelos.

4- O sombreamento pode ser estudado com maior profundidade, considerando alturas distintas para edifícios do entorno, a fim de estabelecer maior número de cenários e seus respectivos valores de redução do consumo de energia.

5- A aplicação da presente teoria poderia ser replicada a outros climas, obtendo-se valores tabelados para a constante de ajuste de consumo em função de variáveis climáticas.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 16401-1 : Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 1:Projetos das instalações**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- ADENE - Agência para a Energia. Sistema de Certificação Energética de Edifícios de Portugal. Lisboa: ADENE, 2006.
- AKSOEZEN, Mehmet *et al.* Building age as an indicator for energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 87, p. 74–86, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.074>
- ALLEGRINI, Jonas; DORER, Viktor; CARMELIET, Jan. Influence of the urban microclimate in street canyons on the energy demand for space cooling and heating of buildings. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 823–832, 2012.
- ALMEIDA, Renato S M *et al.* On the dimensional analysis for the creep rate prediction of ceramic fibers. **Ceramics International**, v. 44, n. 13, p. 15924–15928, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.06.012>
- Alves, Luciana e Sá; Rocha, Gelson (2019). **O novo Sistema Internacional de Unidades (SI)**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Metrologia e Sociedade Brasileira de Física.
- ALVES, Tatiana Paula. **Energy savings potential of the high-rise office building stock. A case study of Belo Horizonte, Brazil**. 2017. 197 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- ANDREIS, Cínthia. **Influência de fachadas envidraçadas no consumo de energia de um edifício de escritórios em diferentes cidades brasileiras**. 2014.198 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2014.
- ARAMBULA LARA, Rigoberto; CAPPELLETTI, Francesca; GASPARELLA, Andrea. Selection of Representative Buildings through Preliminary Cluster Analysis. *In*: **International High Performance Buildings Conference**, 2014. Disponível em: <http://docs.lib.purdue.edu/ihpbc/137>
- BAGLIVO, C *et al.* Cost-optimal analysis and technical comparison between standard and high efficient mono-residential buildings in a warm climate. **Energy**, v. 83, p. 560–575, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.062>
- BALLARINI, Ilaria; CORGNATI, Stefano Paolo; CORRADO, Vincenzo. 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>
- BENEDETTO, Gisele Saveriano; ROMÉRO, Marcelo de Andrade. Avaliação da aplicação do modo misto na redução da carga térmica em edifícios de escritórios nas

idades de São Paulo e Rio de Janeiro. In: NUTAU, 2008. São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2008

BESSA, Vanessa Montoro Taborianski. **Contribuição à Metodologia de Avaliação das Emissões de Dióxido de Carbono no Ciclo de Vida das Fachadas de Edifícios de Escritórios**. 2010. 263f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

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>

BP. **BP Energy Outlook**. London:BP,2018.

BPIE. **Europe ' s buildings under the microscope**, Buildings Performance Institute Europe, 2011. Disponível em: <https://doi.org/ISBN: 9789491143014>

BRANDÃO DE VASCONCELOS, Ana *et al.* A Portuguese approach to define reference buildings for cost-optimal methodologies. **Applied Energy**, v. 140, n. January 2012, p. 316–328, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.035>

BRASIL. **Instrução Normativa nº 2, de 04 de junho de 2014**. Disponível em: <https://www.comprasgovernamentais.gov.br/index.php/legislacao/instrucoes-normativas/304-instrucao-normativa-n-2-de-04-de-junho-de-2014>

BRØGGER, Morten; WITTCHEN, Kim Bjarne. Estimating the energy-saving potential in national building stocks – A methodology review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. July 2017, p. 1489–1496, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.239>

BRUGNERA, Rosilene Regolão *et al.* Escritórios de planta livre: o impacto de diferentes soluções de fachada na eficiência energética. **Ambiente Construído**, v. 19, nº3, p. 295–315, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000300339>

BUCKINGHAM, E. On physically similar systems; Illustrations of the use of dimensional equations. **Physical Review**, v. 4, n. 4, p. 345–376, 1914. Disponível em: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.4.345>

BUFFAT, René *et al.* Big data GIS analysis for novel approaches in building stock modelling. **Applied Energy**, v. 208, n. May, p. 277–290, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.041>

BUILDINGS. **Buildings: Pesquisa Imobiliária Inteligente**. 2020. Disponível em: <http://www.buildings.com.br/>

CARLO, Joyce Correna. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvimento de Edificações Não-residenciais**. 196 f. 2008. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CARLUCCI, Salvatore *et al.* On the impact of stochastic modeling of occupant behavior on the energy use of office buildings. **Energy & Buildings**, v. 246, p. 111049, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111049>

CARVALHO, Marcia Marques de Queiroz. **Alternativas arquitetônicas para o aumento da eficiência no uso de energia elétrica por edifícios comerciais**. 407 f. 2011. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

CASSOLA, Fernando *et al.* Using Virtual Choreographies to Identify Office Users' Behaviors to Target Behavior Change Based on Their Potential to Impact Energy Consumption. **Energies**, v. 15, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15124354>

CB3E. **Proposta de método para a avaliação da eficiência energética com base em energia primária de edificações comerciais , de serviços e públicas**. Florianópolis/SC, 2017.

CBCS. **Benchmarking de escritórios corporativos e recomendações para certificação DEO no Brasil - Relatório Final**. 2014.

CEBDS. **Destravando o financiamento à eficiência energética no Brasil: soluções financeiras e não-financeiras para os agentes de mercado**. 2014.

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, CEC. **California Commercial End-Use Survey**. 2006.

CIULLA, Giuseppina; D'AMICO, Antonino; BRANO, Valerio Lo. Evaluation of building heating loads with dimensional analysis: Application of the Buckingham π theorem. **Energy and Buildings**, v. 154, p. 479-490, 2017.

CORGNATI, Stefano Paolo *et al.* Reference buildings for cost optimal analysis: Method of definition and application. **Applied Energy**, [s. l.], v. 102, p. 983–993, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.001>

DEB, Chirag; LEE, Siew Eang. Determining key variables influencing energy consumption in office buildings through cluster analysis of pre- and post-retrofit building data. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 159, n. November, p. 228–245, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.007>

DI TURI, Silvia; STEFANIZZI, Pietro. Energy analysis and refurbishment proposals for public housing in the city of Bari, Italy. **Energy Policy**, [s. l.], 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.01.016>

DOE. **Building Performance Database**. 2020. Disponível em: <https://bpd.lbl.gov/#explore>. Acesso em: 10 out. 2020.

DOE. **Buildings Energy Data Book**. [S. l.: s. n.], 2012.

DUARTE, Vanessa Cavalcanti Paes. **Comparação do Desempenho Energético de Sistemas de Climatização para uma edificação Comercial em Florianópolis/SC**. 184f. 2014. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina,

Florianópolis, 2014.

EDDY, William F.; MARTON, Krisztina. **Effective Tracking of Building Energy Use: Improving the Commercial Buildings and Residential Energy Consumption Surveys**. Washington, DC: National Academies Press, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.17226/13360>.

EIA. **Commercial Building Energy Consumption Survey (CBECS)**. [S. l.: s. n.], 2003.

EIA. **Annual Energy Outlook 2019 with projections to 2050**. [S. l.: s. n.], 2019.

EIA. **Residential Energy Consumption Survey (RECS)**. [S. l.: s. n.], 2015.

EPE. **Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019** Rio de Janeiro : EPE. Rio de Janeiro, RJ: [s. n.], 2020.

EVERITT, Brian S *et al.* **Cluster Analysis**. 5th Edition. King's College London, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

FAMUYIBO, Albert Adesoji; DUFFY, Aidan; STRACHAN, Paul. Developing archetypes for domestic dwellings — An Irish case study. **Energy & Buildings**, [s. l.], v. 50, p. 150–157, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.033>

FERREIRA, M; ALMEIDA, M; RODRIGUES, A. Cost-optimal energy efficiency levels are the first step in achieving cost effective renovation in residential buildings with a nearly-zero energy target. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 133, p. 724–737, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.017>

FIGUEIREDO, Cíntia Mara de. **Ventilação natural em edifícios de escritórios na cidade de São Paulo: limites e possibilidades do ponto de vista do conforto térmico**. 221 f. 2007. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

FIRTH, S.K.; LOMAS, K.J.; WRIGHT, A.J. Targeting household energy efficiency measures using sensitivity analysis. **Building Research and Information**, v. 38 (1), p. 25–41, 2010. Disponível em: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/09613210903236706>

FOLIENTE, Greg; SEO, Seongwon. Modelling building stock energy use and carbon emission scenarios. **Smart and Sustainable Built Environment**, v. 1, n. 2, p. 118–138, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/20466091211260578>

GAITANI, N. *et al.* 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>

GANGOLELLS, Marta *et al.* Office representatives for cost-optimal energy retrofitting analysis: A novel approach using cluster analysis of energy performance certificate databases. **Energy and Buildings**, v. 206, p. 109557, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109557>

GHIASSI, Neda; MAHDAVI, Ardeshir. Reductive bottom-up urban energy computing supported by multivariate cluster analysis. **Energy & Buildings**, v. 144, p. 372–386, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.004>

GIBBINGS, J.C. **Dimensional Analysis**. Liverpool: Springer, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-317-6>

HAIR, Joseph F.Jr *et al.* **Análise Multivariada de Dados**. 6ª edição. Porto Alegre: [s. n.], 2009.

HÖRNER, Michael; LICHTMESS, Markus. Energy performance of buildings: A statistical approach to marry calculated demand and measured consumption. **Energy Efficiency**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9664-2>

IBM. **SPSS 20 (Statistical Package for Social Sciences). Software. 2012**. Concessão: 2011.

ICHINOSE, Toshiaki; LEI, Lei; LIN, Ye. Impacts of shading effect from nearby buildings on heating and cooling energy consumption in hot summer and cold winter zone of China. **Energy & Buildings**, v. 136, p. 199–210, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.064>

IEA, International Energy Agency. **Building Energy Performance Certification**. 2017. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/>.

IEA, International Energy Agency. **Energy Efficiency: Buildings**. 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/energyefficiency/buildings/cooling/>

IEA. , International Energy Agency. **Energy Efficiency 2020**, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/dfd85134-en>

IEE, Intelligent Energy Europe. **ASIEPI - Reference buildings for EP calculation studies**. 2009.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (normal climatológica de 1991-2020; recordes de temperatura: 1931-presente)**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 29 jun. 2022.

INMETRO. **Manual para Aplicação do RTQ-C: Comercial, de Serviço e Público**. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: http://www.pbenedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/manual-rtqc_V4.pdf.

INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas** **Diário Oficial da União**. [S. l.: , 2013.

INE, Instituto Nacional de Estatística. **Estatísticas de Edifícios**. Disponível em: https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_base_dados&contexto=bd&seITab=tab1. Acesso em: 5 mar. 2022

IPEEC. **Delivering Energy Savings in Buildings**. 2015. Disponível em:

http://www.ipeec.org/upload/publication_related_language/pdf/1.pdf

JAIN, Anil K.; DUBES, Richard C. **Algorithms for clustering data**. Prentice-Hall, Inc., 1988.

JEWETT JR, John W.; SERWAY, Raymond A. **Física para cientistas e engenheiros-mecânica**. 8ª edição. São Paulo: Cengage Learning, v. 1, 2012.

JOHANSSON, Erik. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate : A study in Fez , Morocco. **Building and Environment**, v. 41, p. 1326–1338, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.022>

KAVGIC, M. *et al.* A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. **Building and Environment**, [s. l.], v. 45, n. 7, p. 1683–1697, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.021>

KAZAS, Georgios; FABRIZIO, Enrico; PERINO, Marco. Energy demand profile generation with detailed time resolution at an urban district scale: A reference building approach and case study. **Applied Energy**, [s. l.], v. 193, p. 243–262, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.095>

KAZEMI, Majid; BARATI, Reza. Application of dimensional analysis and multi-gene genetic programming to predict the performance of tunnel boring machines. **Applied Soft Computing**, v. 124, p. 108997, 2022.

KNEIFEL, Joshua. Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 42, n. 3, p. 333–340, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.011>

KRARTI, Moncef; DUBEY, Kankana. Review analysis of economic and environmental benefits of improving energy efficiency for UAE building stock. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 82, n. June 2017, p. 14–24, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.013>

KRISTENSEN, Martin Heine; HEDEGAARD, Rasmus Elbæk; PETERSEN, Steffen. Hierarchical calibration of archetypes for urban building energy modeling. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 175, p. 219–234, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.030>

KRÜGER, E L; MINELLA, F O; RASIA, F. Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba , Brazil. **Building and Environment**, [s. l.], v. 46, p. 621–634, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.09.006>

LABEEE. **Levantamento de dados visando a definição de protótipos de edificações brasileiras**. Florianópolis, 2005. Disponível em: <http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/desenvolvimento/RT200505.pdf>. Acesso em: 27 set. 2019.

LAM, Joseph C.; HUI, Sam C.M. Sensitivity analysis of energy performance of office buildings. **Building and Environment**, v. 31, n. 1, p. 27–39, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(95\)00031-3](https://doi.org/10.1016/0360-1323(95)00031-3)

LEDESMA, Gabriela; PONS-VALLADARES, Oriol; NIKOLIC, Jelena. Real-reference buildings for urban energy modelling : A multistage validation and diversification approach. **Building and Environment**, v. 203, n. June, p. 108058, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108058>

LEE, HoSung. Optimal design of thermoelectric devices with dimensional analysis. **Applied Energy**, v. 106, p. 79-88, 2013.

LEE, W. L.; YIK, F. W.H. Regulatory and voluntary approaches for enhancing building energy efficiency. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 5, p. 477–499, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.03.002>

LEMONS, Don S. **A student's guide to dimensional analysis**. New York: [s. n.], 2017.

LI, Wenliang *et al.* Modeling urban building energy use: A review of modeling approaches and procedures. **Energy**, [s. l.], v. 141, p. 2445–2457, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.071>

LI, Xinyi *et al.* Developing urban residential reference buildings using clustering analysis of satellite images. **Energy and Buildings**, v. 169, p. 417–429, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.064>

LIMA, Izabella; SCALCO, Veridiana; LAMBERTS, Roberto. Estimating the impact of urban densification on high-rise office building cooling loads in a hot and humid climate. **Energy and Buildings**, v. 182, p. 30–44, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.019>

LINDEN, Ricardo. Técnicas de Agrupamento. **Revista de Sistemas de Informação da FSMA**, v. 4, p. 18–36, 2009.

LIU, Haijing *et al.* Evaluating the impact of shading from surrounding buildings on heating/ cooling energy demands of different community forms. **Building and Environment**, v. 206, n. August, p. 108322, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108322>

LV, Yajun *et al.* Definition of typical commercial building for South China ' s Pearl River Delta : Local data statistics and model development. **Energy & Buildings**, v. 190, p. 119–131, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.035>

MACHADO, Praum Eduardo *et al.* Evaluation of the impacts of urban form on the microclimate of neighbourhoods in Rio de Janeiro, Brazil. **Parc, Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas/SP, v. 13, p. 1–21, 2022.

MACHADO, Rayner Maurício e Silva. **Modelagem do impacto da ilha de calor sobre o desempenho energético de escritórios condicionados artificialmente**. 99f. 2019. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Florianópolis, Florianópolis, 2019.

MANGAN, Suzi Dilara *et al.* The impact of urban form on building energy and cost efficiency in temperate-humid zones. **Journal of Building Engineering**, v. 33, n. December 2019, p. 101626, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101626>

MANN, Gee; BECERIK-GERBER, Burcin. Understanding the Influence of Occupant Behavior on Energy Consumption Patterns in Commercial Buildings. *In: , 2012.*

Computing in Civil Engineering. 2012. Disponível em:

<https://doi.org/10.1061/9780784412343.0072>

MARCONDES, Mônica Pereira. **Soluções Projetuais de Fachadas para Edifícios de Escritórios com Ventilação Natural em São Paulo**. 244f. 2010. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MARTINS, Nelson; PAULI, Ronald U.; MAUAD, Farid C. **Análise Dimensional**. São Paulo: [s. n.], 1979.

MASTRUCCI, Alessio *et al.* Estimating energy savings for the residential building stock of an entire city: A GIS-based statistical downscaling approach applied to Rotterdam. **Energy and Buildings**, v. 75, p. 358–367, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.032>

MATA, É; KALAGASIDIS, A Sasic; 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>

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>

MATHEW, Paul A. *et al.* Big-data for building energy performance: Lessons from assembling a very large national database of building energy use. **Applied Energy**, v. 140, p. 85–93, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.042>

MATTINEN, Maija K. *et al.* Modeling and visualization of residential sector energy consumption and greenhouse gas emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 81, p. 70–80, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.054>

MELO, A. P. *et al.* Development of surrogate models using artificial neural network for building shell energy labelling. **Energy Policy**, v. 69, p. 457–466, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.02.001>

MINITAB. Minitab versão 16. 2010.

MIRZAEI, Parham A. Recent challenges in modeling of urban heat island. **Sustainable Cities and Society**, v. 19, p. 200–206, 2015.

NABER, Elias; VOLK, Rebekka; SCHULTMANN, Frank. From the Building Level Energy Performance Assessment to the National Level: How are Uncertainties Handled in Building Stock Models. **Procedia Engineering**, v. 180, p. 1443–1452, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.307>

NÄGELI, Claudio *et al.* Synthetic building stocks as a way to assess the energy demand and greenhouse gas emissions of national building stocks. **Energy and Buildings**, v. 173, p. 443–460, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.055>

NBI. **Energy Performance of LEED for New Construction Buildings**. Washington DC, 2008.

NGUYEN, Anh-tuan; REITER, Sigrid; RIGO, Philippe. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, v. 113, p. 1043–1058, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>

NREL. **U.S. Department of Energy commercial reference building models of the national building stock** Report No. TP-5500-46861. Golden, Colorado - USA. 2011. Disponível em: [https://doi.org/NREL Report No. TP-5500-46861](https://doi.org/NREL%20Report%20No.%20TP-5500-46861).

ORIOLI, Aldo; GANGI, Alessandra Di. An improved photographic method to estimate the shading effect of obstructions. **Solar Energy**, v. 86, n. 11, p. 3470–3488, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.027>

ÖSTERBRING, Magnus *et al.* A differentiated description of building-stocks for a georeferenced urban bottom-up building-stock model. **Energy and Buildings**, v. 120, p. 78–84, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.060>

PAONE, Antonio. The Impact of Building Occupant Behavior on Energy Efficiency and Methods to Influence It : A Review of the State of the Art. **Energies**, v. 11, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en11040953>

PERES, Arlis Buhl. **Da passagem à permanência : arquitetura e valorização da paisagem nas transformações do bairro agrônoma - Florianópolis , SC**. 318f. 2020. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Geografia - Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.

PIERI, Stella Panayiota; TZOUVADAKIS, Ioannis; SANTAMOURIS, Mat. Identifying energy consumption patterns in the Attica hotel sector using cluster analysis techniques with the aim of reducing hotels' CO2 footprint. **Energy and Buildings**, v. 94, p. 252–262, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.017>

PINTO, Mônica Martins. **Desempenho Energético De Edifícios De Escritórios Com Vidros Insulados Em Climas Brasileiros**. 237f. 2017. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

PIRRÓ, Lúcia Fernanda de Souza. **O impacto das envoltentes verticais no desempenho energético de edifícios de escritórios**. 2005. Tese (Doutorado) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - Universidade de São Paulo, 2005.

PISELLO, Anna Laura *et al.* Inter-building effect : Simulating the impact of a network of buildings on the accuracy of building energy performance predictions. **Building and Environment**, v. 58, p. 37–45, 2012. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.017>

PISELLO, Anna Laura. Simulating the Thermal-Energy Performance of Buildings at the Urban Scale : Evaluation of Inter- Building Effects in Different Urban Configurations. **Journal of Urban Technology**, v. 21, n. May, p. 3–20, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10630732.2014.884386>

PMF, Prefeitura Municipal de Florianópolis. **Estudos Base - Iniciativa Cidades Emergentes e Sustentáveis Estudo 3: Crescimento Urbano**. 2017. Disponível em: <http://www.pmf.sc.gov.br/entidades/turismo/index.php?cms=cidades+emergentes+e+sustentaveis>.

POPESCU, Daniela *et al.* Impact of energy efficiency measures on the economic value of buildings. **Applied Energy**, v. 89, n. 1, p. 454–463, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.015>

PROCEL. **Edificações Etiquetadas**. 2022. Disponível em: <http://www.pbgedifica.com.br/edificacoes-etiquetadas/>. Acesso em: 10 dez. 2022.

PROJETEEE. **Projeteee**. 2021. Disponível em: <http://projeteee.mma.gov.br/estrategias-bioclimaticas/>. Acesso em: 20 abr. 2021.

RAFSANJANI, Hamed Nabizadeh; AHN, Changbum R; ALAHMAD, Mahmoud. A Review of Approaches for Sensing, Understanding, and Improving Occupancy-Related Energy-Use Behaviors in Commercial Buildings. **Energies**, v. 8, p. 10996–11029, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en81010996>

ROSA, Aline Schaefer da Rosa. **Determinação de modelos de referência de habitações populares unifamiliares para Florianópolis através de análise de agrupamento**. 198 f. 2014. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

RUPP, Ricardo Forgiarini. **Dimensionamento de área de janela em edificações comerciais: integração da iluminação natural com a artificial e utilização da ventilação híbrida**. 212 f. 2011. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

SANTANA, Marina Vasconcelos. **Influência de parâmetros construtivos no consumo de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis–SC**. 181 f. 2006. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SANTESSO, Caroline Antonelli; CHVATAL, Maria KarinSoares. Consumo energético de salas de escritório climatizadas de modo misto em São Paulo: considerações sobre o projeto. **Ambiente Construído**, p. 119–137, 2018.

SARTOR, Dale; *et al.* Strategies for Energy Benchmarking In Cleanrooms and Laboratory-Type Facilities. *In:* , 2000, Pacific Grove, California. **Proceedings of the 2000 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings**. Pacific Grove, California. 2000.

SCE. **Estatística do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios**. [S. /], 2018. Disponível em: <https://www.sce.pt/estatisticas/>. Acesso em: 28 maio 2019.

SCHAEFER, Aline; GHISI, Enedir. 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>

SCHMIDT-NIELSEN, K. **Scaling: Why is Animal Size so Important?** Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

SOOMRO, Altaf Mazhar. **Influencing Human Behaviour to Optimise Energy in Commercial Buildings** **ACIS 2019 Proceedings**. 2019. Disponível em: <https://aisel.aisnet.org/acis2019/95>.

SREBRIC, Jelena; HEIDARINEJAD, Mohammad; LIU, Jiying. Building neighborhood emerging properties and their impacts on multi-scale modeling of building energy and airflows. **Building and Environment**, v. 91, p. 246–262, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.031>

STEINBACH, Jan *et al.* **Internal working paper: literature review of integrating user and investment behaviour in bottom-up simulation models**. 2013.

SUMMERFIELD, A. J.; LOWE, Robert. Challenges and future directions for energy and buildings research. **Building Research and Information**, v. 40, n. 4, p. 391–400, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09613218.2012.693839>

SUN, Bin. A dimensional analysis based thermal–mechanical damage model for crack growth simulation of concrete-like materials at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, v. 357, p. 129429, 2022.

SWAN, Lukas G.; UGURSAL, V. Ismet. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 8, p. 1819–1835, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.033>

TABULA. **Typology approach for building stock**. Projeto de pesquisa. Comissão Europeia. Bruxelas, 2015.

TARDIOLI, Giovanni *et al.* Identification of representative buildings and building groups in urban datasets using a novel pre-processing, classification, clustering and predictive modelling approach. **Building and Environment**, v. 140, n. February, p. 90–106, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.035>

TRANCANELLI, Diego. Grandezas físicas e análise dimensional : da mecânica à gravidade quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 38, n. 2, p. e2505, 2016.

VARTHOLOMAIOS, Aristotelis. A parametric sensitivity analysis of the influence of urban form on domestic energy consumption for heating and cooling in a Mediterranean city. **Sustainable Cities and Society**, v. 28, p. 135–145, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.09.006>

VELOSO, Ana Carolina de Oliveira. **Avaliação do consumo de energia elétrica de edificações de escritórios e sua correlação com as decisões de projeto**. 125f, 2017. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

WESTPHAL, Fernando Simon. **Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais**. 131f. 2007. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

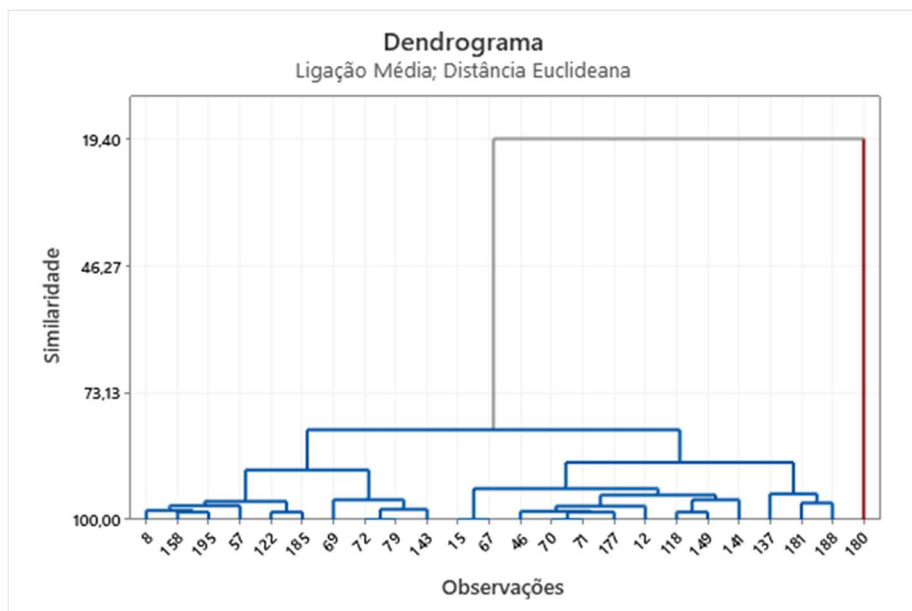
YOSHINO, Hiroshi; HONG, Tianzhen; NORD, Natasa. IEA EBC annex 53 : Total energy use in buildings — Analysis and evaluation methods. **Energy & Buildings**, v. 152, n. March 2013, p. 124–136, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.038>

ZIMMERMANN, Gerhard. Modeling and Simulation of Individual User Behavior for Building Performance Predictions. *In: , 2007. **Proceedings of the 2007 summer computer simulation conference***. 2007. p. 913–920.

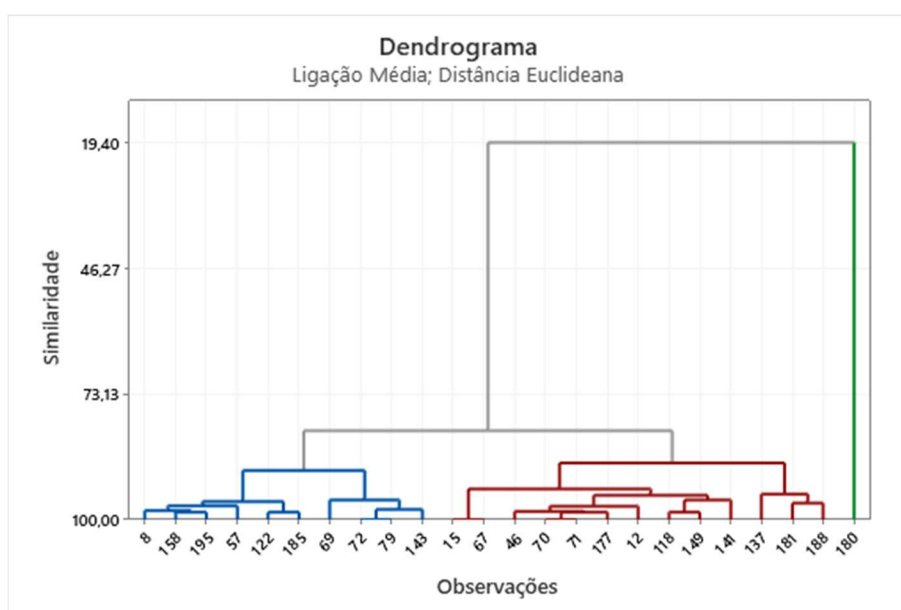
APÊNDICES

APÊNDICE A - DENDROGRAMA DE 2 E 3 *CLUSTERS* PARA CLASSIFICAÇÃO DOS EDIFÍCIOS DE FORMA QUADRADA QUANTO ÀS DIMENSÕES.

(a) Dendrograma de 2 *clusters* para classificação dos edifícios de forma quadrada quanto às dimensões.

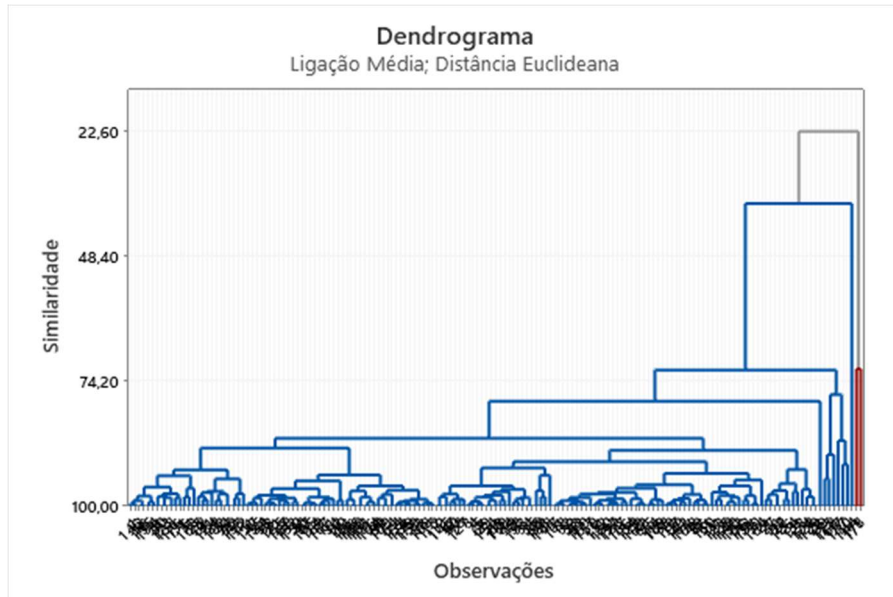


(b) Dendrograma de 3 *clusters* para classificação dos edifícios de forma quadrada quanto às dimensões.

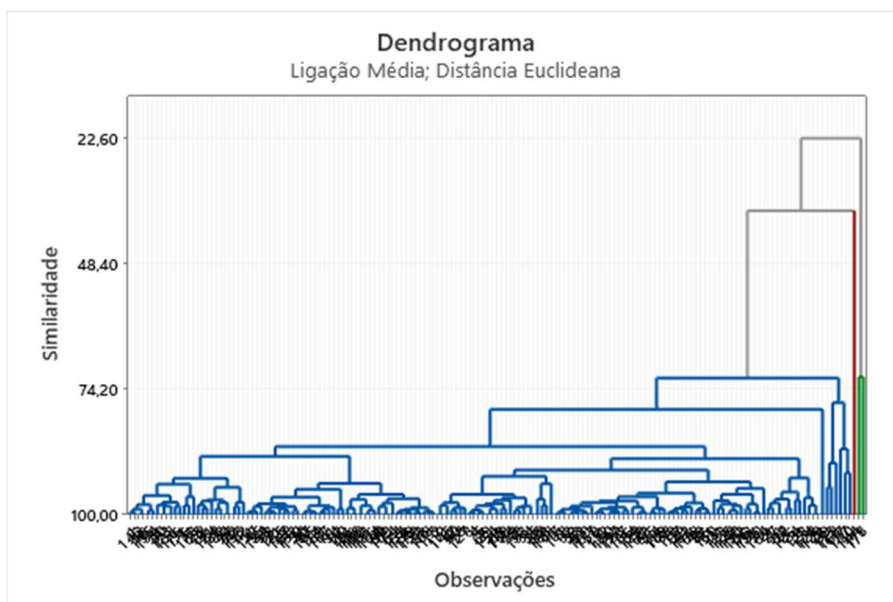


APÊNDICE B - DENDROGRAMAS DE 2 A 8 *CLUSTERS* PARA CLASSIFICAÇÃO DOS EDIFÍCIOS DE FORMA RETANGULAR QUANTO ÀS DIMENSÕES.

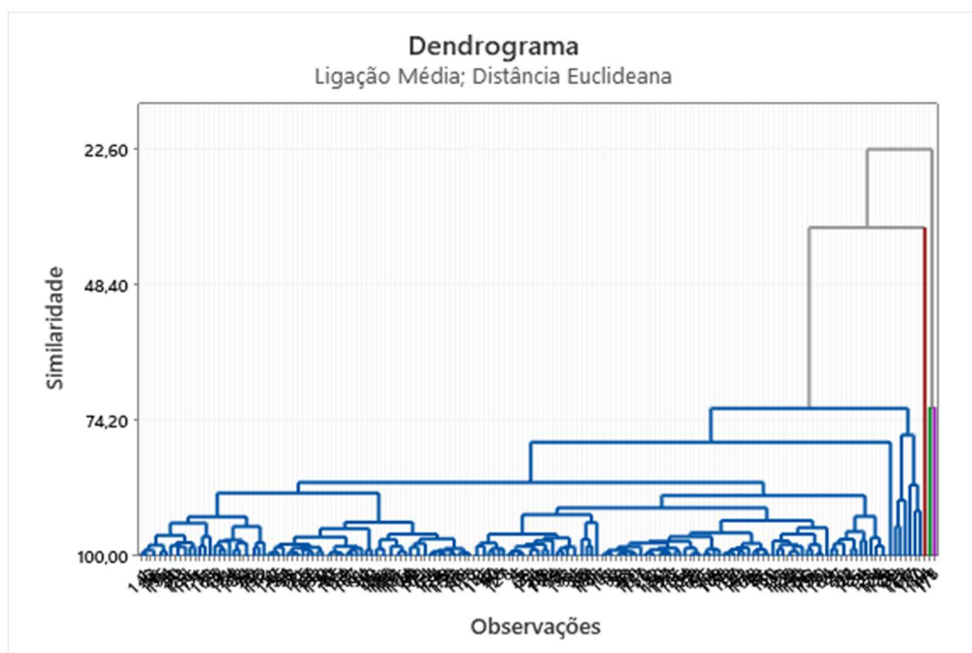
(a) Dendrograma de 2 *clusters* para classificação dos edifícios de forma retangular quanto às dimensões.



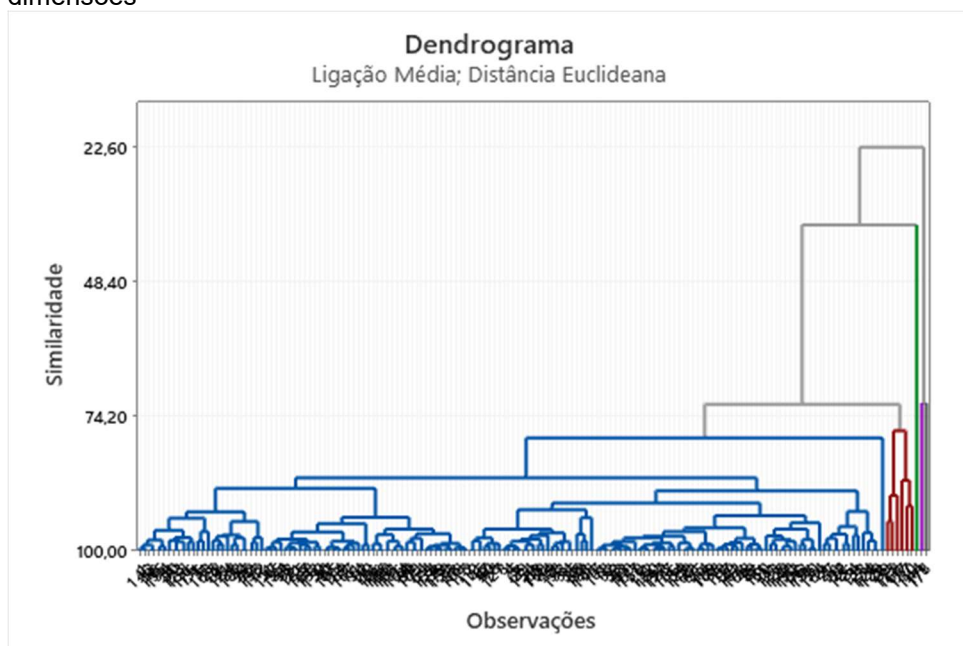
(b) Dendrograma de 3 *clusters* para classificação dos edifícios de forma retangular quanto às dimensões.



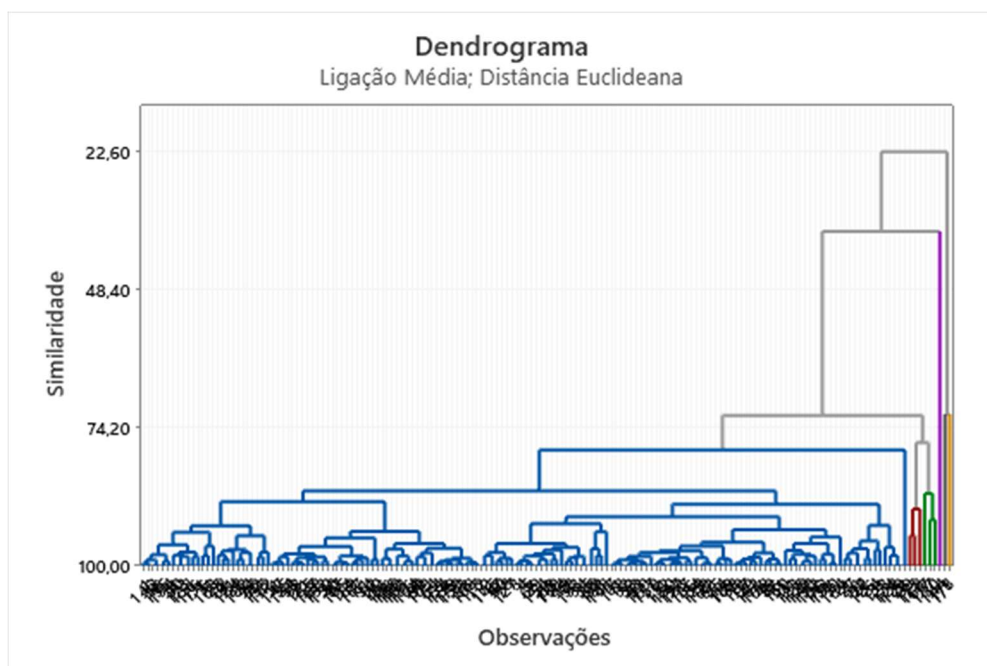
(c) Dendrograma de 4 *clusters* para classificação dos edifícios de forma retangular quanto às dimensões.



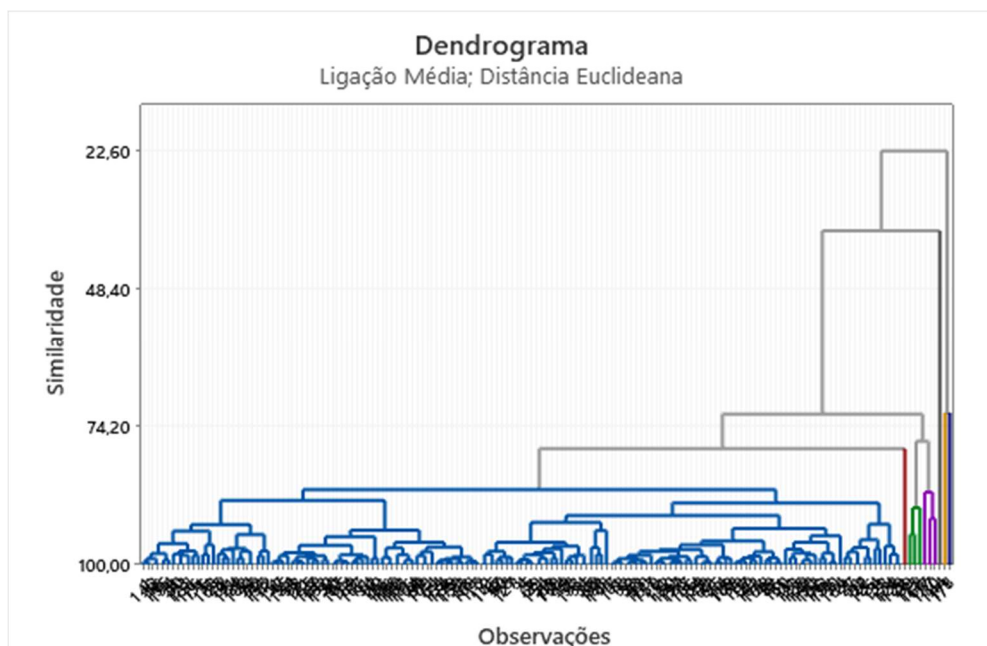
(d) Dendrograma de 5 *clusters* para classificação dos edifícios de forma retangular quanto às dimensões



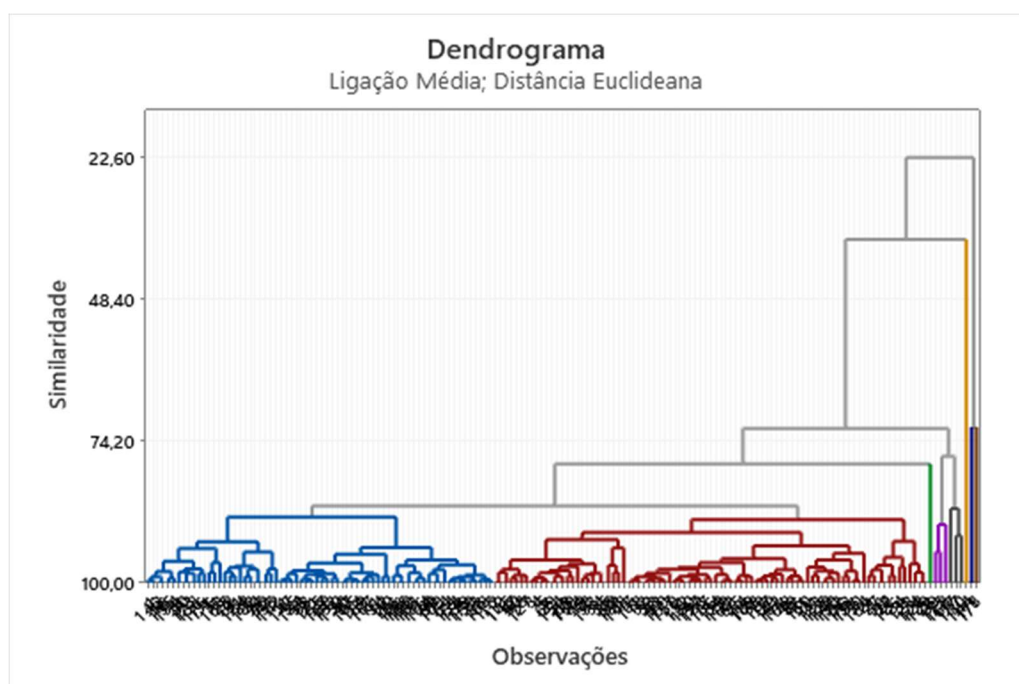
(e) Dendrograma de 6 *clusters* para classificação dos edifícios de forma retangular quanto às dimensões.



(f) Dendrograma de 7 *clusters* para classificação dos edifícios de forma retangular quanto às dimensões.



(g) Dendrograma de 8 *clusters* para classificação dos edifícios de forma retangular quanto às dimensões.



APÊNDICE C – FORMA QUADRADA: DISTÂNCIA EUCLIDIANA DE CADA ELEMENTO DA AMOSTRA AO CENTROIDE DO CLUSTER

(a) Distância euclidiana de cada elemento do cluster 1 até o centroide.

A marcação em vermelho representa o edifício da amostra que foi considerado como representativo do cluster, por possuir a menor distância euclidiana até o centroide.

Amostra	Largura	Profundidade	Cluster	Distância
8	17	17	1	2,90
57	18	16	1	3,20
69	13	14	1	2,19
72	12	12	1	4,17
79	12	12	1	4,17
122	16	16	1	1,49
143	11	11	1	5,59
158	18	18	1	4,31
195	17	18	1	3,69
185	16	15	1	1,00
15	20	20	2	4,86
46	22	25	2	1,74
70	22	24	2	1,19
71	22	24	2	1,19
118	22	21	2	2,93
137	26	26	2	3,66
141	25	22	2	2,50
149	23	21	2	2,70
177	21	24	2	2,18
181	27	30	2	7,39
188	28	28	2	6,48
12	23	23	2	0,71
67	20	20	2	4,86

APÊNDICE D – FORMA RETANGULAR: DISTÂNCIA EUCLIDIANA DE CADA ELEMENTO DA AMOSTRA AO CENTROIDE DO CLUSTER

Amostra	Largura	Profundidade	Cluster	Distância
11	17	21	1	5,15
40	10	21	1	8,65
53	16	18	1	4,15
55	16	21	1	5,65
56	24	8	1	4,85
60	12	9	1	8,46
64	12	14	1	5,96
74	18	11	1	4,46
85	13	18	1	5,65
87	10	21	1	8,65
89	10	20	1	8,15
92	7	13	1	8,96
93	17	19	1	4,15
94	11	17	1	6,15
96	17	14	1	3,46
99	14	11	1	6,46
100	16	8	1	6,96
103	19	6	1	6,46
104	18	7	1	6,46
105	10	22	1	9,15
106	22	9	1	3,46
107	10	19	1	7,65
108	18	15	1	2,46
109	14	11	1	6,46
110	7	15	1	7,96
114	9	22	1	9,65
115	18	14	1	2,96
121	16	19	1	4,65
124	14	22	1	7,15
132	14	17	1	4,65
134	18	12	1	3,96
138	24	18	1	2,04
139	17	12	1	4,46
147	17	22	1	5,65
150	15	16	1	3,65
156	19	12	1	3,46
165	22	9	1	3,46
167	14	19	1	5,65
179	19	13	1	2,96
186	19	6	1	6,46
191	24	15	1	1,35
88	15	20	1	5,65
111	9	18	1	7,65
73	17	13	1	3,96
1	31	14	1	5,35

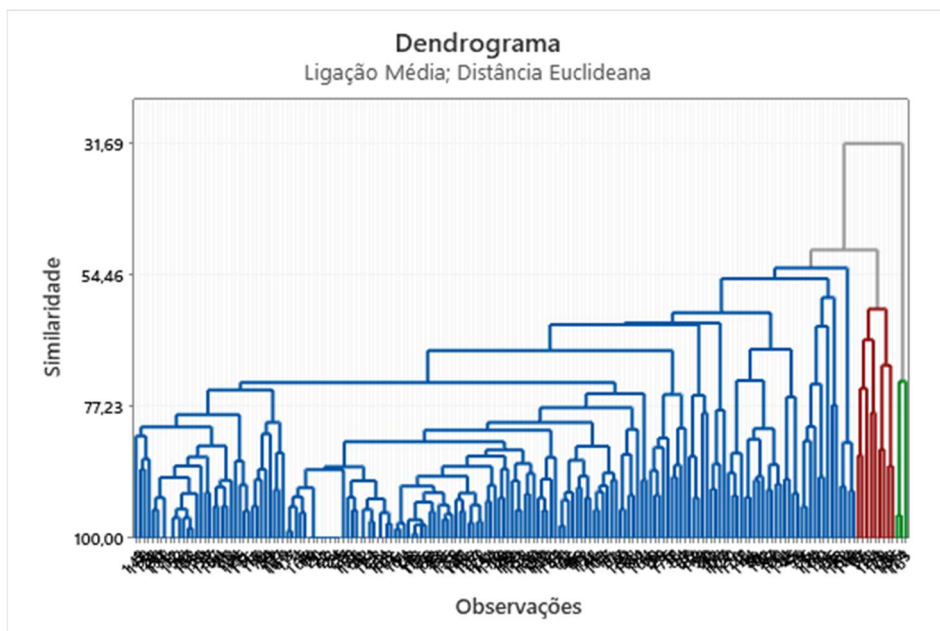
6	32	7	1	9,35
13	30	15	1	4,35
16	30	15	1	4,35
25	39	26	1	13,54
28	36	21	1	9,54
31	33	10	1	8,35
42	43	14	1	11,35
44	40	21	1	11,54
45	40	21	1	11,54
51	27	21	1	5,04
68	37	23	1	11,04
90	27	18	1	3,54
91	36	25	1	11,54
135	45	16	1	11,54
142	40	16	1	9,04
146	31	13	1	5,85
155	34	15	1	6,35
163	38	6	1	12,85
173	27	18	1	3,54
176	27	15	1	2,85
184	33	23	1	9,04
194	33	16	1	5,54
182	36	19	1	8,54
2	10	47	2	8,91
3	12	38	2	3,41
4	13	38	2	2,91
5	13	40	2	3,91
7	12	31	2	3,29
9	14	33	2	1,29
18	12	30	2	3,79
19	9	40	2	5,91
29	15	39	2	2,41
32	13	29	2	3,79
33	13	29	2	3,79
34	9	37	2	4,41
35	9	37	2	4,41
43	13	30	2	3,29
47	9	44	2	7,91
48	6	30	2	6,79
54	11	33	2	2,79
58	10	39	2	4,91
59	7	29	2	6,79
61	17	39	2	3,21
65	6	50	2	12,41
66	13	39	2	3,41
76	17	32	2	2,09
77	15	34	2	0,29
78	10	42	2	6,41
80	8	43	2	7,91
83	12	29	2	4,29
84	17	36	2	1,71

86	7	28	2	7,29
98	10	54	2	12,41
101	12	31	2	3,29
112	10	47	2	8,91
113	14	42	2	4,41
120	9	32	2	4,29
127	11	44	2	6,91
130	15	32	2	1,29
133	7	55	2	14,41
136	14	35	2	0,91
148	18	52	2	10,21
151	13	33	2	1,79
152	13	33	2	1,79
153	19	32	2	3,09
154	15	39	2	2,41
157	10	28	2	5,79
159	12	42	2	5,41
160	12	28	2	4,79
161	7	27	2	7,79
169	9	32	2	4,29
183	15	31	2	1,79
197	14	32	2	1,79
62	8	32	2	4,79
145	13	46	2	6,91
193	7	40	2	6,91
10	25	25	2	9,59
38	8	25	2	8,29
41	20	23	2	8,09
49	10	24	2	7,79
95	13	26	2	5,29
97	8	26	2	7,79
102	9	25	2	7,79
116	15	27	2	3,79
119	7	25	2	8,79
123	18	24	2	6,59
125	22	26	2	7,59
140	22	26	2	7,59
162	19	27	2	5,59
166	6	24	2	9,79
189	15	25	2	4,79
190	21	25	2	7,59
14	13	25	2	5,79
21	27	39	2	8,21
22	27	34	2	6,09
23	39	34	2	12,09
24	27	44	2	10,71
27	26	41	2	8,71
36	24	37	2	5,71
37	24	37	2	5,71
126	25	33	2	5,59
131	22	44	2	8,21

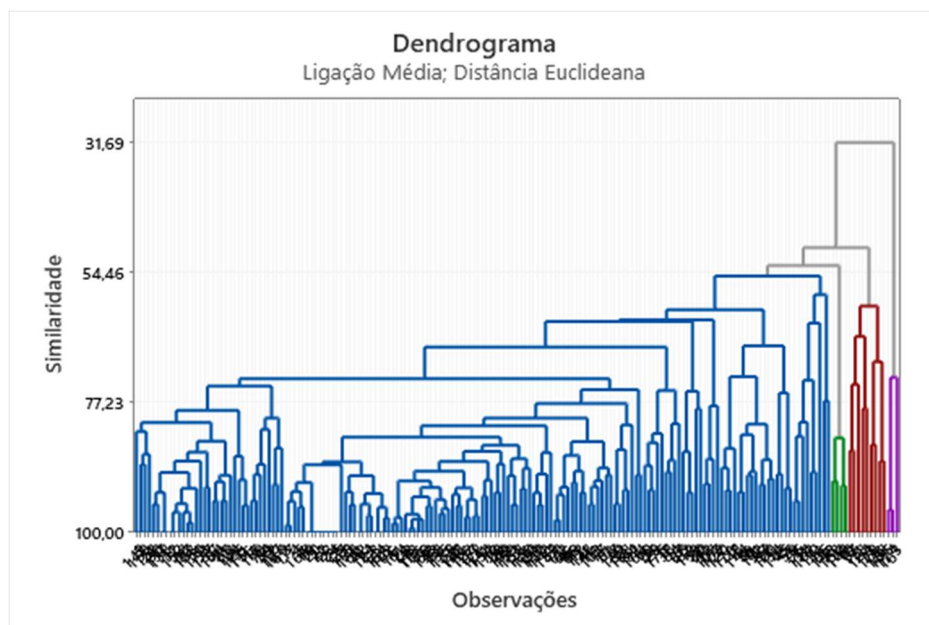
164	29	28	2	10,09
174	37	41	2	14,21
196	22	31	2	5,09
50	21	31	2	4,59
128	36	38	2	12,21
129	36	38	2	12,21

APÊNDICE E - DENDROGRAMAS DE 3 A 18 *CLUSTERS* PARA CLASSIFICAÇÃO DOS EDIFÍCIOS COM RELAÇÃO AO *WWR*.

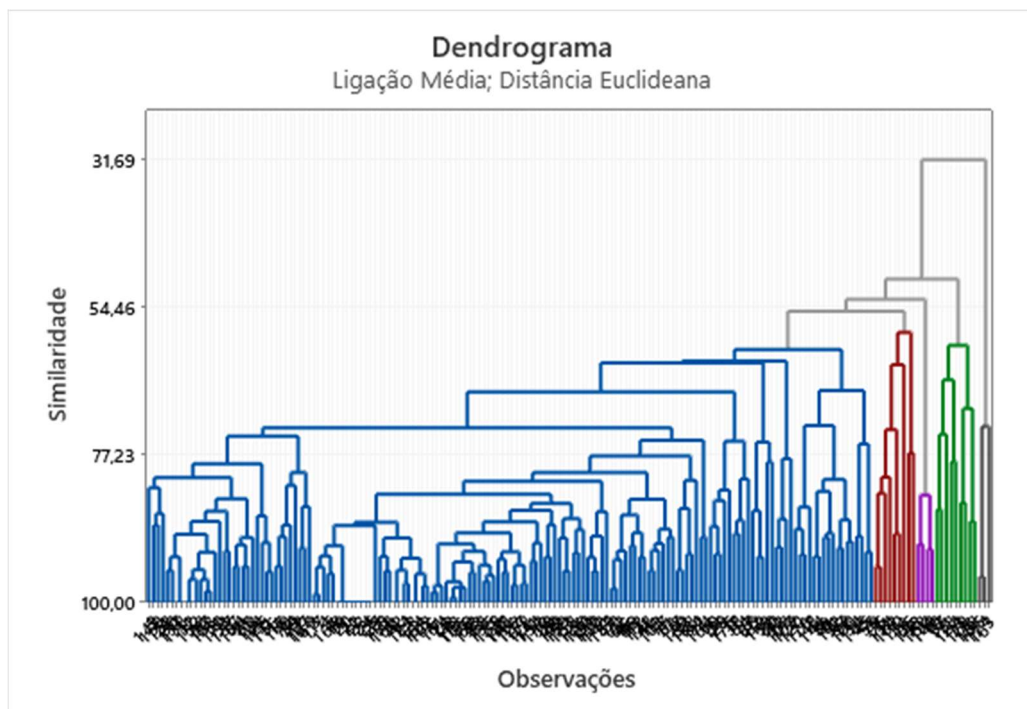
(a) Dendrograma de 3 *clusters* para classificação dos edifícios com relação ao *WWR*.



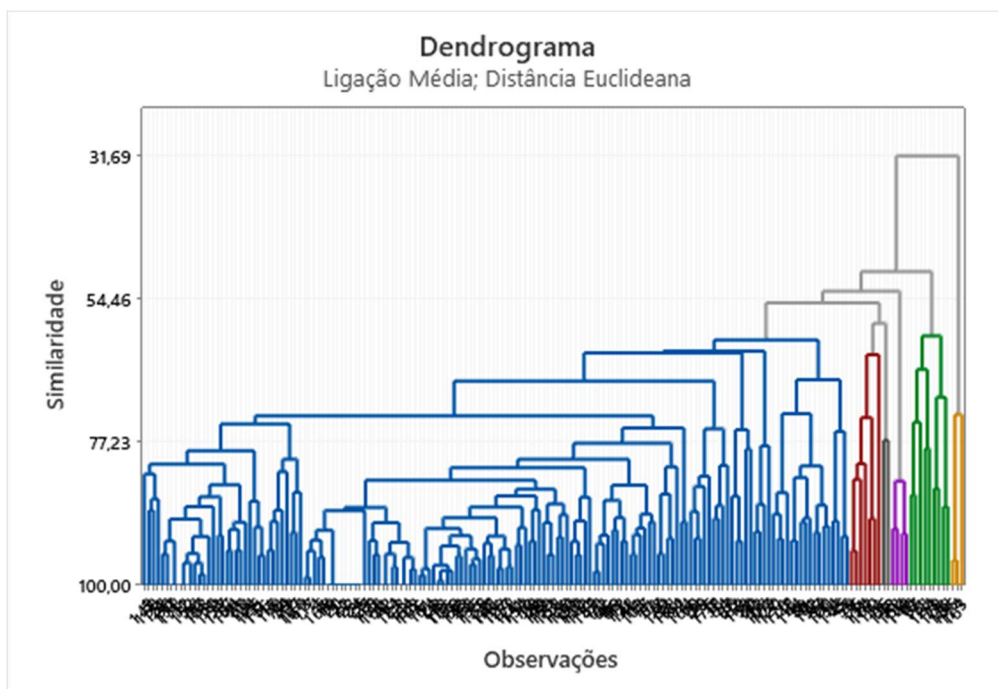
(b) Dendrograma de 4 *clusters* para classificação dos edifícios com relação ao *WWR*.



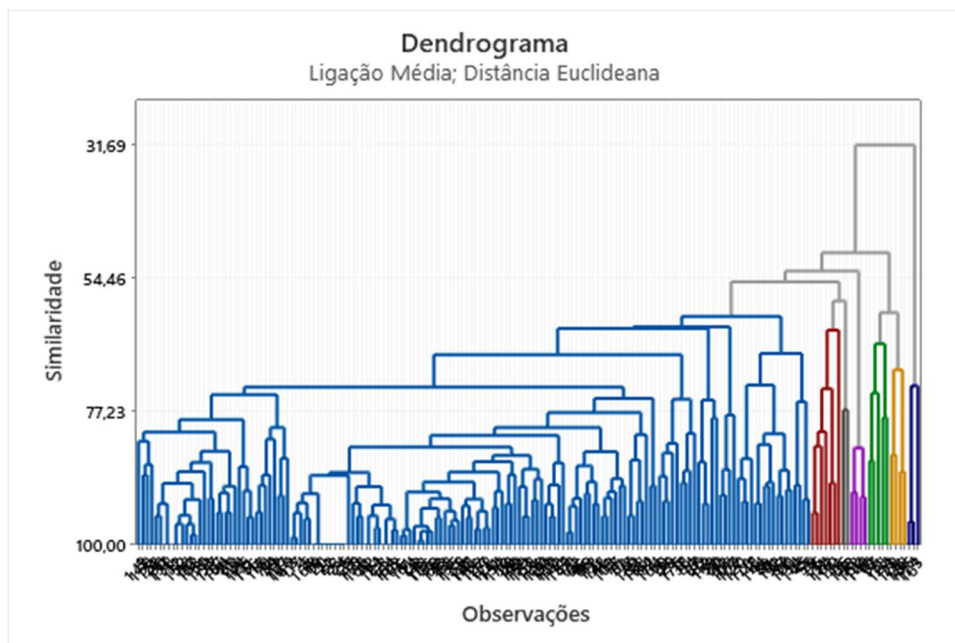
(c) Dendrograma de 5 *clusters* para classificação dos edifícios com relação ao *WWR*.



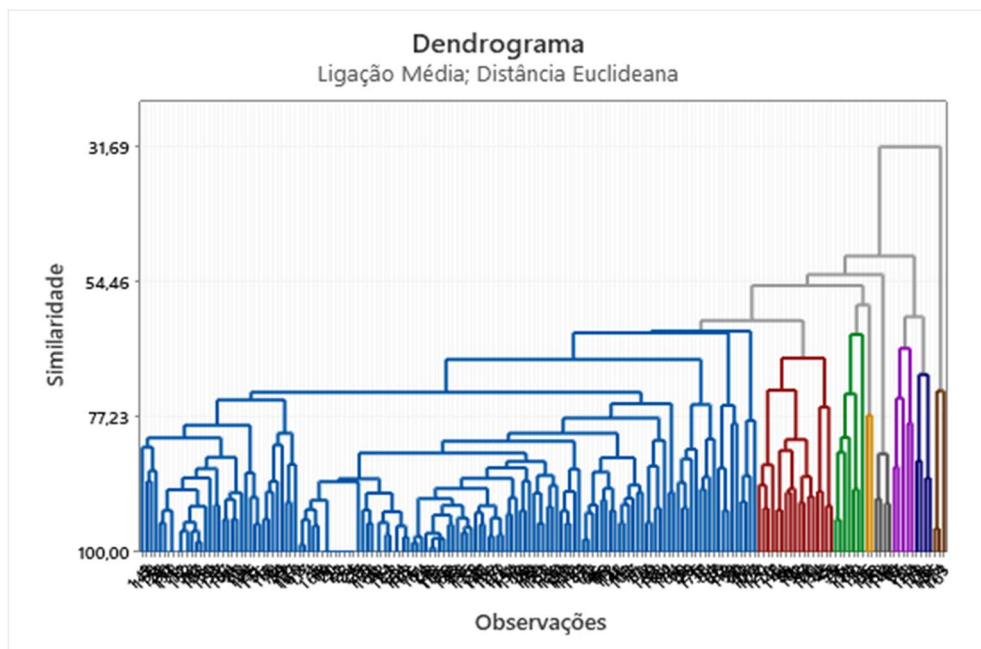
(d) Dendrograma de 6 *clusters* para classificação dos edifícios com relação ao *WWR*.



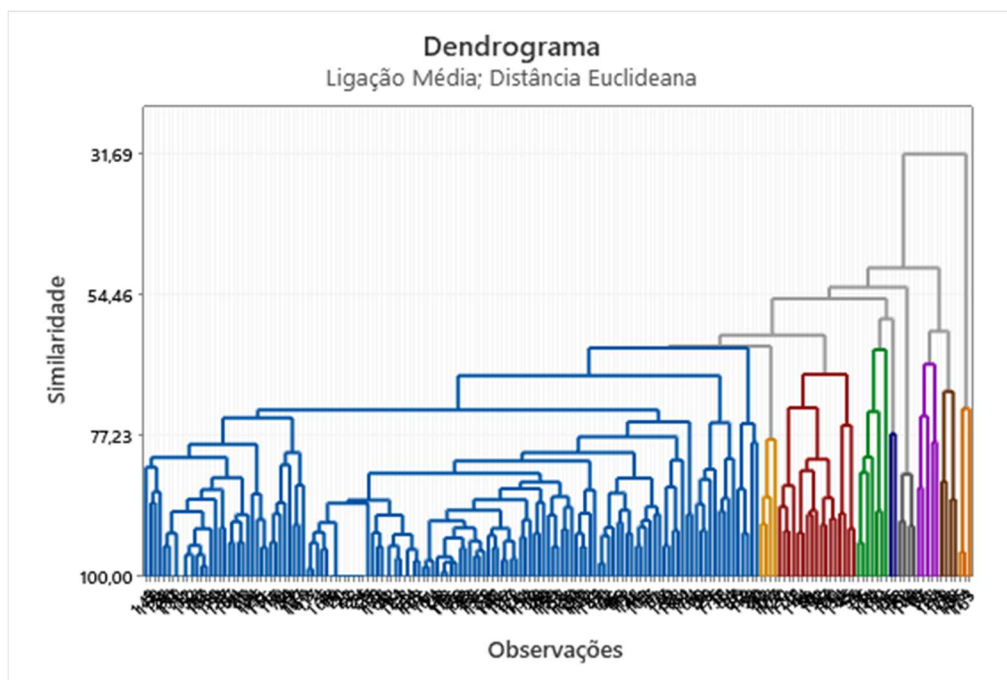
(e) Dendrograma de 7 *clusters* para classificação dos edifícios com relação ao *WWR*.



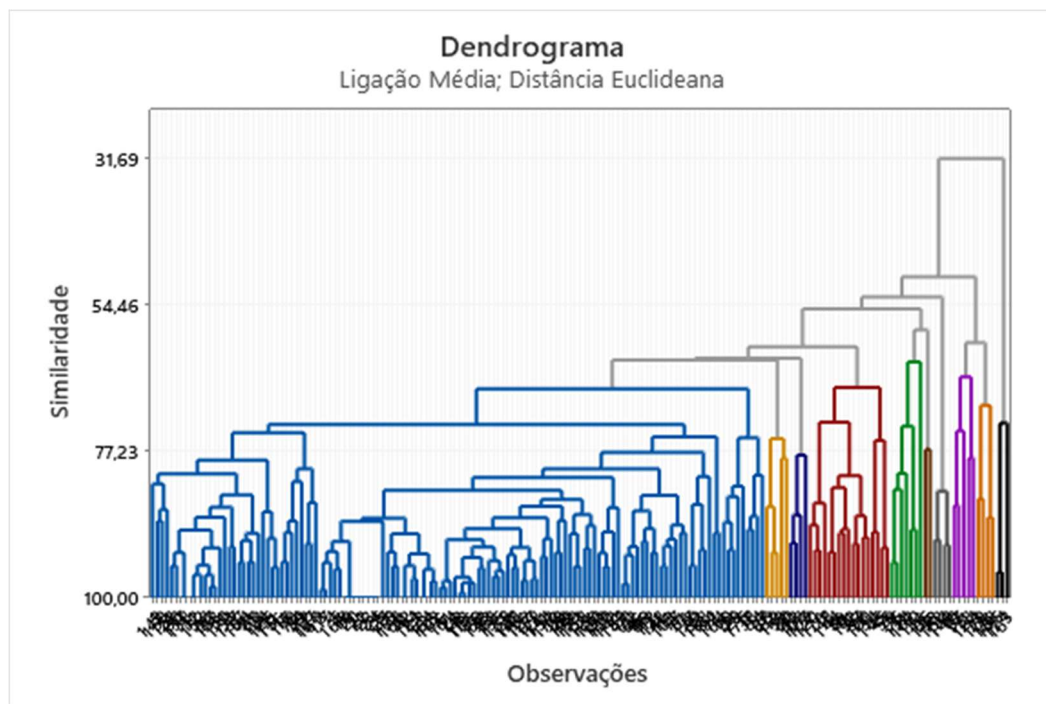
(f) Dendrograma de 8 *clusters* para classificação dos edifícios com relação ao *WWR*.



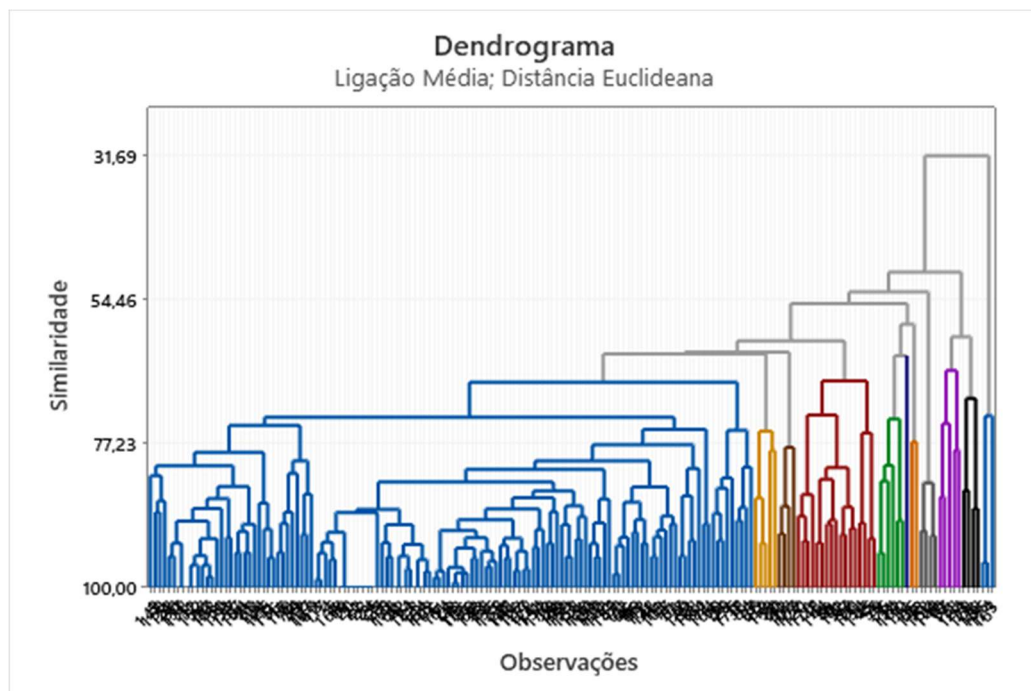
(g) Dendrograma de 9 *clusters* para classificação dos edifícios com relação ao WWR.



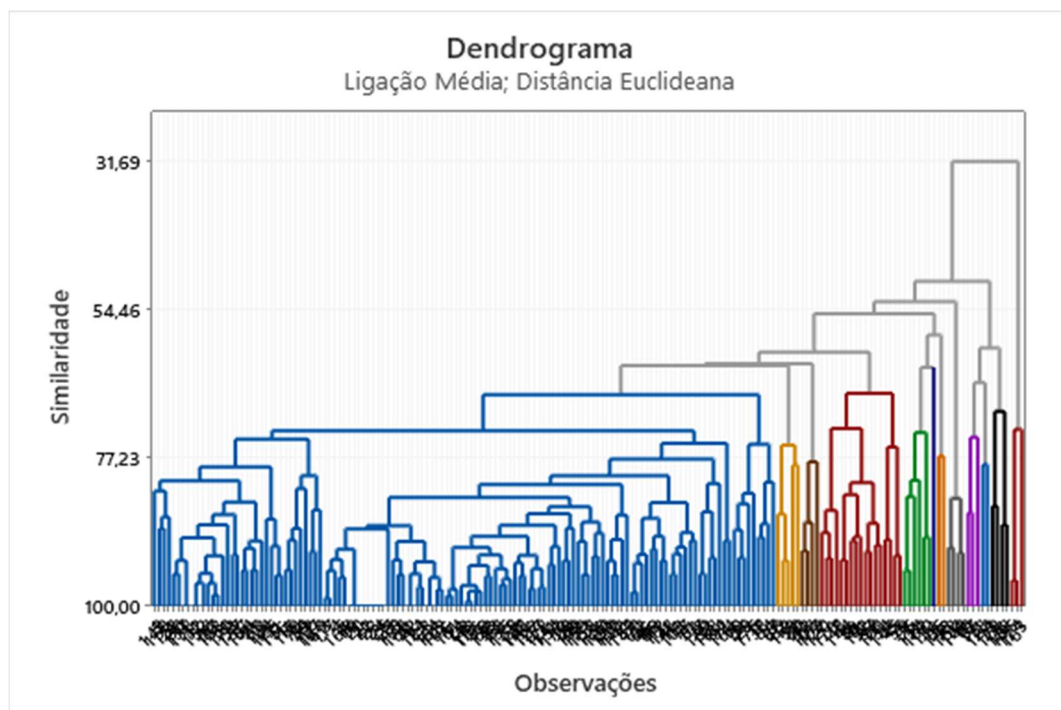
(h) Dendrograma de 10 *clusters* para classificação dos edifícios com relação ao WWR.



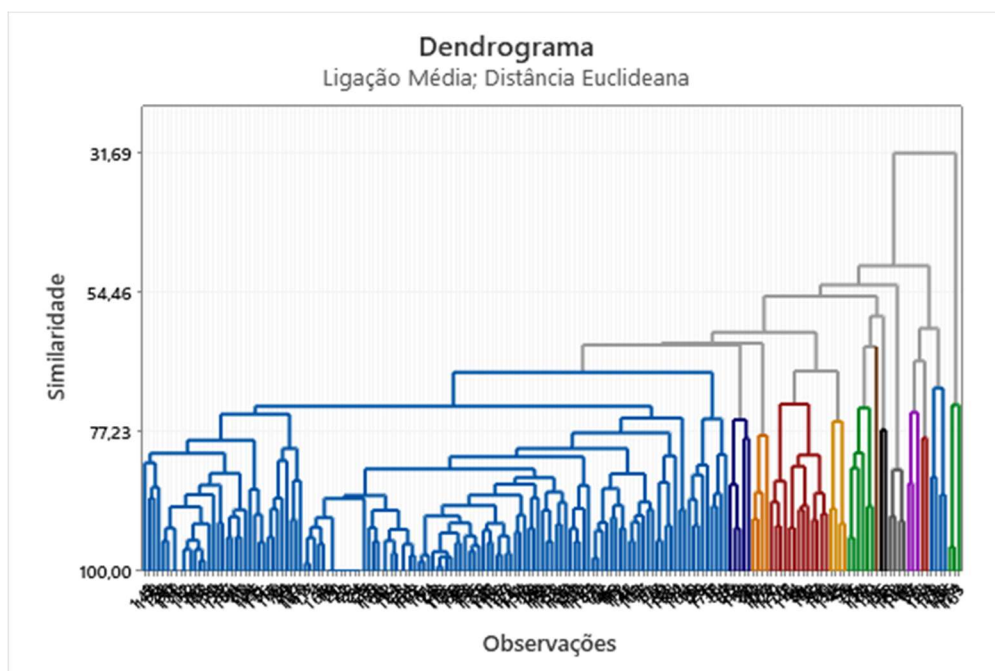
(i) Dendrograma de 11 *clusters* para classificação dos edifícios com relação ao WWR.



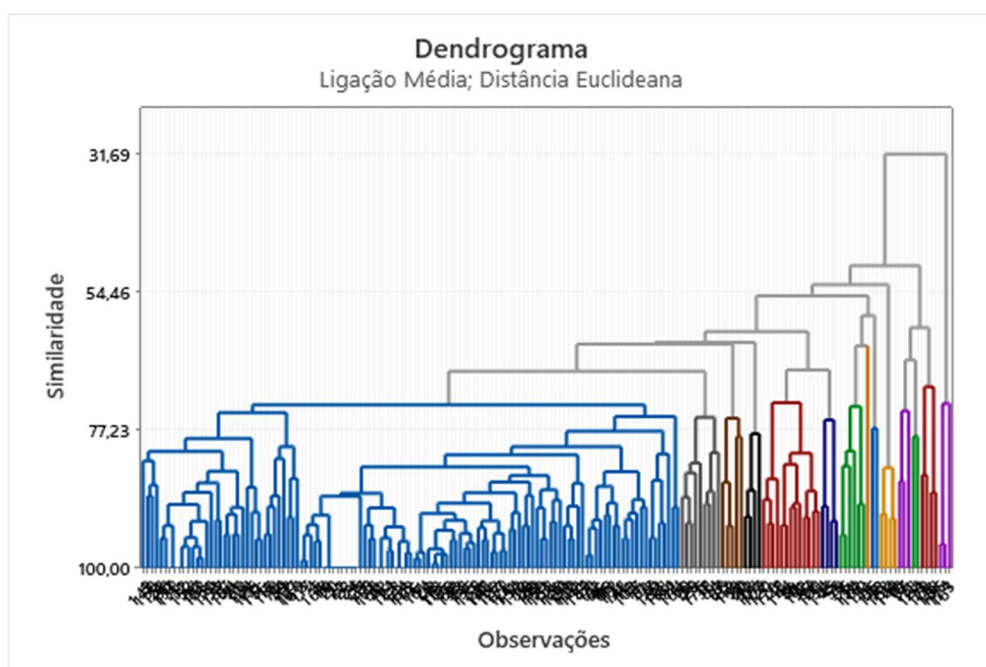
(j) Dendrograma de 12 *clusters* para classificação dos edifícios com relação ao WWR.



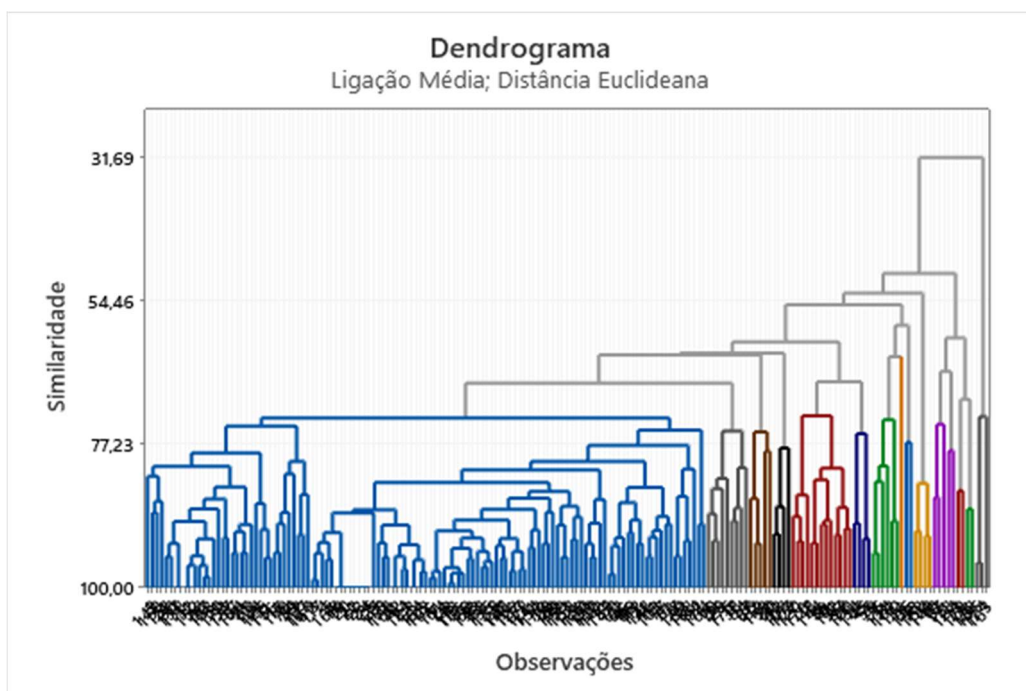
(k) Dendrograma de 13 *clusters* para classificação dos edifícios com relação ao WWR.



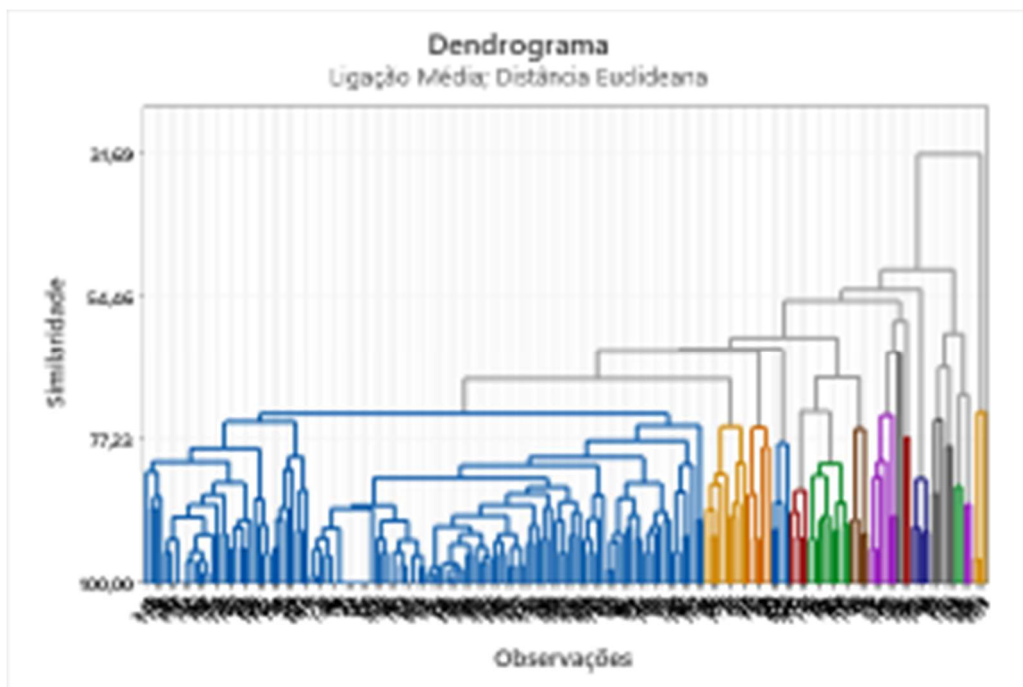
(l) Dendrograma de 14 *clusters* para classificação dos edifícios com relação ao WWR.



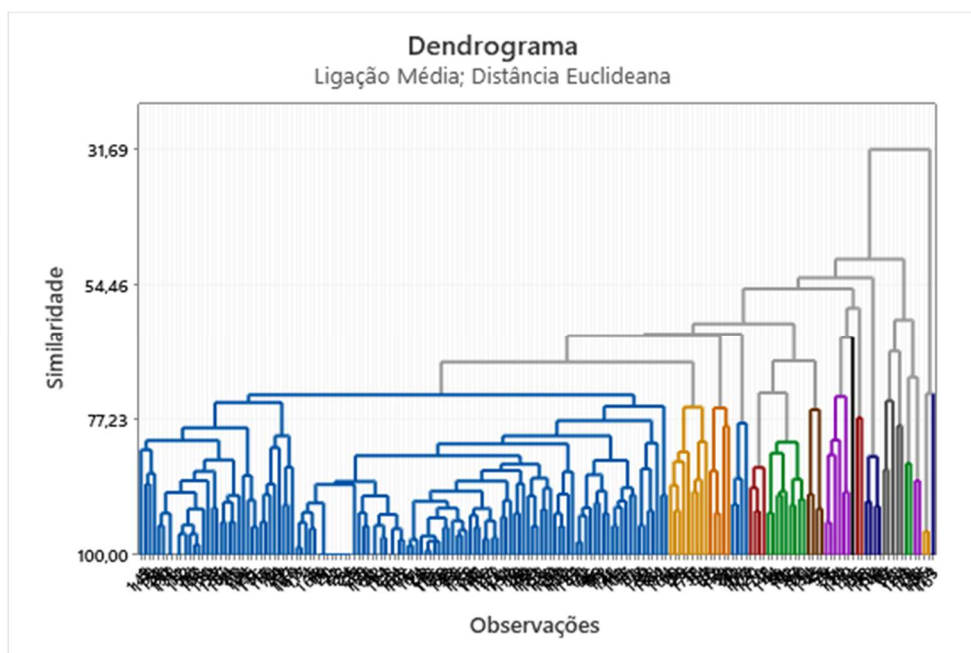
(m) Dendrograma de 15 *clusters* para classificação dos edifícios com relação ao WWR.



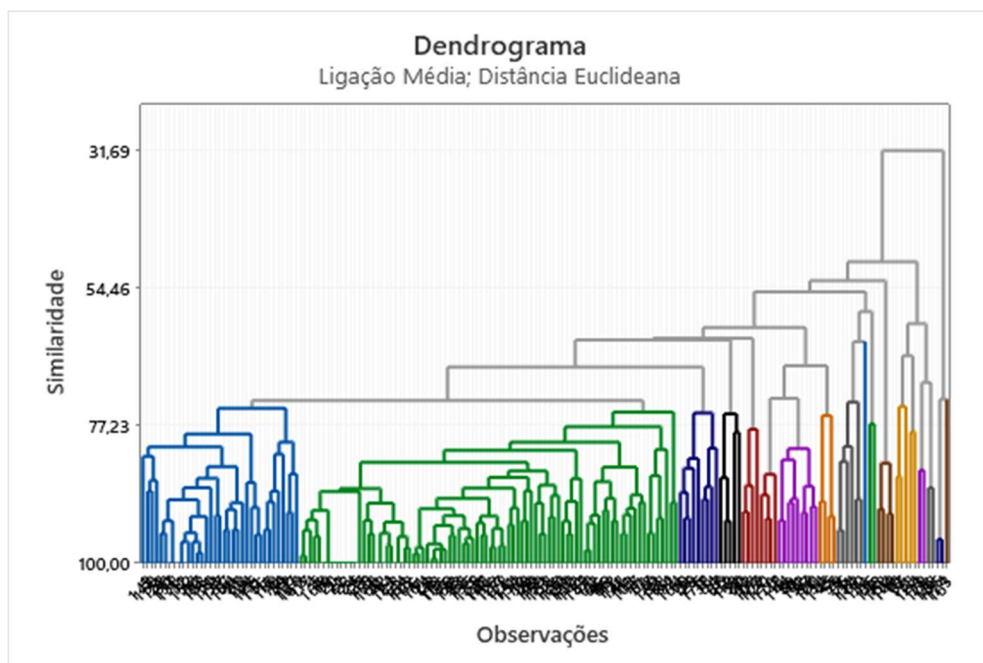
(n) Dendrograma de 16 *clusters* para classificação dos edifícios com relação ao WWR.



(o) Dendrograma de 17 *clusters* para classificação dos edifícios com relação ao WWR.



(p) Dendrograma de 18 *clusters* para classificação dos edifícios com relação ao WWR.



APÊNDICE F - COMPARAÇÃO DOS 14 CLUSTERS PARA ANÁLISE DO WWR.

Considerando que o *cluster* 9 possui apenas um edifício, a sigla “-x-” foi utilizada quando não foi possível aplicar a estatística.

		Média	Mediana	Desvio Padrão	CV	Min	Max	N	IC	p-valor
Norte	Cluster 01	28,1	29	14,3	51%	0	61	119	2,6	<0,001
	Cluster 02	6,2	6	5,8	94%	0	15	13	3,1	
	Cluster 03	67,7	65,5	19,7	29%	45	96	6	15,8	
	Cluster 04	7,3	10	6,4	88%	0	12	3	7,3	
	Cluster 05	70,1	75	18,4	26%	39	96	9	12,0	
	Cluster 06	80,5	77,5	11,7	15%	71	96	4	11,4	
	Cluster 07	22,5	22,5	5,4	24%	16	29	4	5,3	
	Cluster 08	18,2	14	12,3	68%	6	38	5	10,8	
	Cluster 09	76,0	76	- x -	- x -	76	76	1	- x -	
	Cluster 10	4,8	4	5,6	118%	0	11	4	5,5	
	Cluster 11	84,0	84	5,7	7%	80	88	2	7,8	
	Cluster 12	11,5	9	13,5	117%	0	28	4	13,2	
	Cluster 13	54,5	54,5	3,5	6%	52	57	2	4,9	
	Cluster 14	87,0	83	10,6	12%	79	99	3	12,0	
Sul	Cluster 01	27,7	27	14,5	52%	0	65	119	2,6	<0,001
	Cluster 02	5,2	5	5,8	110%	0	17	13	3,1	
	Cluster 03	23,2	21,5	10,5	45%	11	40	6	8,4	
	Cluster 04	79,3	81	3,8	5%	75	82	3	4,3	
	Cluster 05	31,3	28	14,6	46%	6	50	9	9,5	
	Cluster 06	81,5	79,5	12,1	15%	71	96	4	11,9	
	Cluster 07	21,5	21,5	9,9	46%	12	31	4	9,7	
	Cluster 08	79,4	76	20,0	25%	57	100	5	17,5	
	Cluster 09	2,0	2	- x -	- x -	2	2	1	- x -	
	Cluster 10	37,3	29,5	17,3	46%	27	63	4	16,9	
	Cluster 11	36,0	36	26,9	75%	17	55	2	37,2	
	Cluster 12	69,0	67	25,0	36%	45	97	4	24,5	
	Cluster 13	96,0	96	2,8	3%	94	98	2	3,9	
	Cluster 14	76,0	79	8,9	12%	66	83	3	10,1	
Leste	Cluster 01	24,8	24	14,6	59%	0	68	119	2,6	<0,001
	Cluster 02	61,7	61	16,0	26%	36	89	13	8,7	
	Cluster 03	50,0	49	7,5	15%	43	58	6	6,0	
	Cluster 04	57,7	54	27,7	48%	32	87	3	31,3	
	Cluster 05	16,2	18	10,6	65%	0	30	9	6,9	
	Cluster 06	24,5	27,5	7,0	29%	14	29	4	6,9	
	Cluster 07	86,0	85,5	11,2	13%	73	100	4	11,0	
	Cluster 08	13,0	13	8,0	62%	0	21	5	7,0	
	Cluster 09	94,0	94	- x -	- x -	94	94	1	- x -	
	Cluster 10	2,3	0	4,5	200%	0	9	4	4,4	
	Cluster 11	85,0	85	4,2	5%	82	88	2	5,9	
	Cluster 12	89,8	91,5	12,2	14%	76	100	4	11,9	
	Cluster 13	75,5	75,5	26,2	35%	57	94	2	36,3	
	Cluster 14	84,7	97	24,0	28%	57	100	3	27,2	
Oeste	Cluster 01	26,5	26	15,0	57%	0	67	119	2,7	<0,001

<i>Cluster 02</i>	27,2	28	21,8	80%	0	62	13	11,8
<i>Cluster 03</i>	59,2	55,5	16,2	27%	43	83	6	13,0
<i>Cluster 04</i>	50,7	51	3,5	7%	47	54	3	4,0
<i>Cluster 05</i>	13,0	13	9,4	72%	0	25	9	6,1
<i>Cluster 06</i>	29,8	28,5	2,9	10%	28	34	4	2,8
<i>Cluster 07</i>	63,0	60,5	20,5	33%	44	87	4	20,1
<i>Cluster 08</i>	13,6	13	10,3	76%	0	26	5	9,0
<i>Cluster 09</i>	94,0	94	- x -	- x -	94	94	1	- x -
<i>Cluster 10</i>	69,8	72,5	12,3	18%	54	80	4	12,0
<i>Cluster 11</i>	10,5	10,5	7,8	74%	5	16	2	10,8
<i>Cluster 12</i>	8,0	7,5	9,3	116%	0	17	4	9,1
<i>Cluster 13</i>	56,0	56	5,7	10%	52	60	2	7,8
<i>Cluster 14</i>	97,3	97	2,5	3%	95	100	3	2,8

APÊNDICE G - P-VALORES DO POST HOC DE TUKEY NOS 14 CLUSTERS UTILIZADOS PARA ANÁLISE DO WWR.

Na Tabela, basta cruzar a linha do cluster desejado com a coluna de um segundo cluster para encontrar o p-valor da comparação da média entre eles. A sigla “CL” indica os *clusters*, os p-valores grifados em vermelho são aqueles que demonstram diferença média entre os *clusters* altamente significativa, os em preto são considerados não significativos perante o nível de significância adotado. Os p-valores grifados em azul, por estarem próximos ao limite de aceitação (0,05), são aqueles que tendem a ser significativos.

		CL 1	CL 2	CL 3	CL 4	CL 5	CL 6	CL 7	CL 8	CL 9	CL 10	CL 11	CL 12	CL 13
Norte	CL 2	<0,001												
	CL 3	<0,001	<0,001											
	CL 4	0,325	1,000	<0,001										
	CL 5	<0,001	<0,001	1,000	<0,001									
	CL 6	<0,001	<0,001	0,965	<0,001	0,989								
	CL 7	1,000	0,676	<0,001	0,965	<0,001	<0,001							
	CL 8	0,933	0,905	<0,001	0,997	<0,001	<0,001	1,000						
	CL 9	- x -	- x -	- x -	- x -	- x -	- x -	- x -	- x -					
	CL 10	0,052	1,000	<0,001	1,000	<0,001	<0,001	0,833	0,963	- x -				
	CL 11	<0,001	<0,001	0,963	<0,001	0,986	1,000	<0,001	<0,001	- x -	<0,001			
	CL 12	0,462	1,000	<0,001	1,000	<0,001	<0,001	0,996	1,000	- x -	1,000	<0,001		
	CL 13	0,266	0,001	0,994	0,014	0,964	0,602	0,267	0,088	- x -	0,003	0,630	0,023	
	CL 14	<0,001	<0,001	0,737	<0,001	0,824	1,000	<0,001	<0,001	- x -	<0,001	1,000	<0,001	0,323
Sul	CL 2	<0,001												
	CL 3	1,000	0,347											
	CL 4	<0,001	<0,001	<0,001										
	CL 5	1,000	0,003	0,997	<0,001									
	CL 6	<0,001	<0,001	<0,001	1,000	<0,001								
	CL 7	1,000	0,732	1,000	<0,001	0,995	<0,001							
	CL 8	<0,001	<0,001	<0,001	1,000	<0,001	1,000	<0,001						

	CL 9	- x -	- x -	- x -	- x -	- x -	- x -	- x -	- x -					
	CL 10	0,983	0,008	0,946	0,010	1,000	0,001	0,938	0,001	- x -				
	CL 11	1,000	0,192	0,996	0,054	1,000	0,018	0,994	0,021	- x -	1,000			
	CL 12	<0,001	<0,001	<0,001	0,999	0,001	0,990	<0,001	0,997	- x -	0,089	0,274		
	CL 13	<0,001	<0,001	<0,001	0,987	<0,001	0,994	<0,001	0,974	- x -	<0,001	0,003	0,599	
	CL 14	<0,001	<0,001	<0,001	1,000	<0,001	1,000	<0,001	1,000	- x -	0,027	0,109	1,000	0,945
Leste	CL 2	<0,001												
	CL 3	0,003	0,911											
	CL 4	0,008	1,000	1,000										
	CL 5	0,877	<0,001	0,001	0,002									
	CL 6	1,000	0,001	0,236	0,126	0,999								
	CL 7	<0,001	0,147	0,009	0,329	<0,001	<0,001							
	CL 8	0,844	<0,001	0,002	0,002	1,000	0,993	<0,001						
	CL 9	- x -	- x -	- x -	- x -	- x -	- x -	- x -	- x -					
	CL 10	0,105	<0,001	<0,001	<0,001	0,922	0,599	<0,001	0,996	- x -				
	CL 11	<0,001	0,638	0,139	0,675	<0,001	<0,001	1,000	<0,001	- x -	<0,001			
	CL 12	<0,001	0,043	0,002	0,160	<0,001	<0,001	1,000	<0,001	- x -	<0,001	1,000		
	CL 13	<0,001	0,988	0,611	0,979	<0,001	0,004	1,000	<0,001	- x -	<0,001	1,000	0,995	
	CL 14	<0,001	0,384	0,043	0,519	<0,001	<0,001	1,000	<0,001	- x -	<0,001	1,000	1,000	1,000
Oeste	CL 2	1,000												
	CL 3	<0,001	0,002											
	CL 4	0,232	0,413	1,000										
	CL 5	0,310	0,606	<0,001	0,013									
	CL 6	1,000	1,000	0,119	0,832	0,814								
	CL 7	<0,001	0,003	1,000	0,997	<0,001	0,093							
	CL 8	0,797	0,883	<0,001	0,046	1,000	0,925	<0,001						
	CL 9	- x -	- x -	- x -	- x -	- x -	- x -	- x -	- x -					
	CL 10	<0,001	<0,001	0,997	0,904	<0,001	0,013	1,000	<0,001	- x -				
	CL 11	0,954	0,962	0,006	0,154	1,000	0,957	0,005	1,000	- x -	0,001			
	CL 12	0,424	0,565	<0,001	0,016	1,000	0,694	<0,001	1,000	- x -	<0,001	1,000		
	CL 13	0,230	0,357	1,000	1,000	0,019	0,715	1,000	0,046	- x -	0,998	0,120	0,017	
	CL 14	<0,001	<0,001	0,023	0,012	<0,001	<0,001	0,132	<0,001	- x -	0,440	<0,001	<0,001	0,125

APÊNDICE H – CONSUMO DE ENERGIA SIMULADO PARA OS QUATRO MODELOS.

(a) Consumo de energia simulado para o modelo quadrado pequeno.

Consumo de energia (kWh) de acordo com a altura do edifício para o modelo Qp (15m x15m)											
Uso Final (KWh)	2pav	3pav	4pav	5pav	6pav	7pav	8pav	9pav	10pav	11pav	12pav
Aquecimento	30	30	43	46	49	52	55	59	62	66	70
Resfriamento	20.965	34.156	48.386	61.485	74.515	87.485	100.403	113.275	126.099	138.883	151.629
Iluminação	18.036	27.054	36.072	45.090	54.108	63.126	72.144	81.162	90.180	99.198	108.216
Equipamentos	27.950	41.926	55.901	69.876	83.851	97.826	111.802	125.777	139.752	153.727	167.702
Ventilação	2.801	4.391	5.997	7.576	9.151	10.722	12.289	13.854	15.415	16.975	18.531
TOTAL	69.792	107.557	146.399	184.073	221.673	259.211	296.694	334.127	371.509	408.849	446.149
Ar-condicionado	23.795	38.577	54.426	69.107	83.714	98.259	112.748	127.188	141.577	155.924	170.231
Iluminação	18.036	27.054	36.072	45.090	54.108	63.126	72.144	81.162	90.180	99.198	108.216
Outros	27.950	41.926	55.901	69.876	83.851	97.826	111.802	125.777	139.752	153.727	167.702
Capacidade (kW)	45	69	94	118	142	166	190	214	238	263	287
TR	13	20	27	34	40	47	54	61	68	75	82
Área Total (m²)	450	675	900	1125	1350	1575	1800	2025	2250	2475	2700
Área Cond (m²)	450	675	900	1125	1350	1575	1800	2025	2250	2475	2700
kWh/m² total	155	159	163	164	164	165	165	165	165	165	165

(b) Consumo de energia simulado para o modelo quadrado grande.

Consumo de energia (kWh) de acordo com a altura do edifício para o modelo Qg (23m x23m)											
Uso Final (kWh)	2pav	3pav	4pav	5pav	6pav	7pav	8pav	9pav	10pav	11pav	12pav
Aquecimento	45	41	72	73	75	77	79	81	83	86	89
Resfriamento	44.574	73.511	105.695	134.642	163.473	192.202	220.832	249.380	277.855	306.264	334.603
Iluminação	42.405	63.607	84.809	106.012	127.214	148.416	169.619	190.821	212.023	233.226	254.428
Equipamentos	65.715	98.572	131.429	164.286	197.143	230.001	262.858	295.715	328.572	361.430	394.287
Ventilação	5.256	8.273	11.335	14.337	17.332	20.321	23.306	26.286	29.261	32.233	35.202
TOTAL	126.395	244.004	333.340	419.350	505.237	591.017	676.694	762.283	847.795	933.238	1.018.608
Ar-condicionado	49.874	81.826	117.102	149.052	180.879	212.600	244.217	275.747	307.200	338.583	369.893
Iluminação	42.405	63.607	84.809	106.012	127.214	148.416	169.619	190.821	212.023	233.226	254.428
Outros	65.715	98.572	131.429	164.286	197.143	230.001	262.858	295.715	328.572	361.430	394.287
Capacidade (kW)	90	139	189	238	287	336	385	434	483	532	580
TR	26	40	54	68	82	96	109	123	137	151	165
Área Total (m²)	1058	1587	2116	2645	3174	3703	4232	4761	5290	5819	6348
Área Cond (m²)	1058	1587	2116	2645	3174	3703	4232	4761	5290	5819	6348
kWh/m² total	149	154	157	158	159	160	160	160	160	160	160

(c) Consumo de energia simulado para o modelo retângulo pequeno.

Consumo de energia (kWh) de acordo com a altura do edifício para o modelo Rp (15m x 24m)											
Uso Final (KWh)	2pav	3pav	4pav	5pav	6pav	7pav	8pav	9pav	10pav	11pav	12pav
Aquecimento	37	36	57	60	63	66	69	72	76	79	82
Resfriamento	32.207	52.841	75.443	95.996	116.454	136.827	157.121	177.355	197.513	217.629	237.689
Iluminação	28.858	43.286	57.715	72.144	86.573	101.002	115.430	129.859	144.288	158.717	173.146
Equipamentos	44.721	67.081	89.441	111.802	134.162	156.522	178.883	201.243	223.603	245.964	268.324
Ventilação	4.168	6.554	8.970	11.341	13.706	16.085	18.420	20.771	23.117	25.460	27.800
TOTAL	109.990	169.798	231.626	291.343	350.957	410.482	469.923	529.300	588.597	647.849	707.041
Ar-condicionado	36.411	59.430	84.470	107.397	130.222	152.958	175.610	198.198	220.706	243.168	265.571
Iluminação	28.858	43.286	57.715	72.144	86.573	101.002	115.430	129.859	144.288	158.717	173.146
Outros	44.721	67.081	89.441	111.802	134.162	156.522	178.883	201.243	223.603	245.964	268.324
Capacidade(kW)	68	105	143	180	217	254	291	328	364	401	438
TR	19	30	41	51	62	72	83	93	103	114	125
Área Total (m²)	720	1080	1440	1800	2160	2520	2880	3240	3600	3960	4320
Área Cond (m²)	720	1080	1440	1800	2160	2520	2880	3240	3600	3960	4320
kWh/m² total	153	157	161	162	162	163	163	163	163	164	164

(d) Consumo de energia simulado para o modelo retângulo grande.

Consumo de energia (kWh) de acordo com a altura do edifício para o modelo Rg (15m x 34m)											
Uso Final (KWh)	2pav	3pav	4pav	5pav	6pav	7pav	8pav	9pav	10pav	11pav	12pav
Aquecimento	47	44	74	76	79	82	85	89	92	96	99
Resfriamento	44.690	73.563	105.420	134.238	162.953	191.526	220.011	248.404	276.725	304.956	333.114
Iluminação	40.882	61.322	81.763	102.204	122.645	143.086	163.526	183.967	204.408	224.849	245.290
Equipamentos	63.354	95.031	126.708	158.386	190.063	221.740	253.417	285.094	316.771	348.448	380.125
Ventilação	5,686	8.957	12.274	15.525	18.767	22.003	25.232	28.456	31.674	34.888	38.097
TOTAL	123.727	238.918	326.239	410.429	494.507	578.436	662.272	746.010	829.670	913.237	996.725
Ar-condicionado	50.423	82.564	117.767	149.839	181.800	213.611	245.329	276.949	308.491	339.940	371.310
Iluminação	40.882	61.322	81.763	102.204	122.645	143.086	163.526	183.967	204.408	224.849	245.290
Outros	63.354	95.031	126.708	158.386	190.063	221.740	253.417	285.094	316.771	348.448	380.125
Capacidade (kW)	94	145	197	248	299	350	401	452	503	554	604
TR	27	41	56	71	85	100	114	129	143	158	172
Área Total (m²)	1.020	1.530	2.040	2.550	3.060	3.570	4.080	4.590	5.100	5.610	6.120
Área Cond (m²)	1.020	1.530	2.040	2.550	3.060	3.570	4.080	4.590	5.100	5.610	6.120
kWh/m² total	152	156	160	161	162	162	162	162	163	163	163

APÊNDICE I – CONSUMO DE ENERGIA CALCULADO VERSUS CONSUMO DE ENERGIA SIMULADO PARA OS QUATRO MODELOS.

(a) Consumos calculados versus consumos simulados do modelo quadrado pequeno (Qp) para os sistemas de iluminação, equipamentos e climatização.

Consumo iluminação				Consumo equipamentos			Consumo climatização		
Gabarito do edifício	C_{il} calculado (kWh)	C_{il} simulado (kWh)	fator de correção	C_{eq} calculado (kWh)	C_{eq} simulado (kWh)	fator de correção	C_{ac} calculado (kWh)	C_{ac} simulado (kWh)	fator de correção
2	17971	18036	1,0036	23961	27950	1,1665	27188	23795	0,8752
3	26956	27054	1,0036	35942	41925	1,1665	41680	38577	0,9256
4	35942	36072	1,0036	47923	55900	1,1665	56769	54426	0,9587
5	44928	45090	1,0036	59904	69876	1,1665	71301	69107	0,9692
6	53913	54108	1,0036	71884	83851	1,1665	85806	83714	0,9756
7	62899	63126	1,0036	83865	97826	1,1665	100298	98259	0,9797
8	71884	72144	1,0036	95846	111801	1,1665	114844	112748	0,9818
9	80870	81162	1,0036	107827	125776	1,1665	129321	127188	0,9835
10	89856	90180	1,0036	119808	139752	1,1665	143826	141577	0,9844
11	98841	99198	1,0036	131788	153727	1,1665	158957	155924	0,9809
12	107827	108216	1,0036	143769	167702	1,1665	173407	170231	0,9817

(b) Consumos calculados versus consumos simulados do modelo quadrado grande (Qg) para os sistemas de iluminação, equipamentos e climatização.

Consumo com iluminação				Consumo com outros sistemas			Consumo com sistema de climatização		
Gabarito do edifício	C_{il} calculado (kWh)	C_{il} simulado (kWh)	fator de correção	C_{eq} calculado (kWh)	C_{eq} simulado (kWh)	fator de correção	C_{ac} calculado (kWh)	C_{ac} simulado (kWh)	fator de correção
2	42252	42404	1,0036	56336	65714	1,1665	54398	49874	0,9168
3	63378	63606	1,0036	84504	98571	1,1665	83995	81826	0,9742
4	84504	84809	1,0036	112672	131428	1,1665	114166	117102	1,0257
5	105630	106011	1,0036	140840	164286	1,1665	143826	149052	1,0363
6	126756	127213	1,0036	169009	197143	1,1665	173359	180879	1,0434
7	147883	148416	1,0036	197177	230000	1,1665	202923	212600	1,0477
8	169009	169618	1,0036	225345	262857	1,1665	232679	244217	1,0496
9	190135	190820	1,0036	253513	295715	1,1665	262339	275747	1,0511
10	211261	212023	1,0036	281681	328572	1,1665	291808	307200	1,0527
11	232387	233225	1,0036	309850	361429	1,1665	321340	338583	1,0537
12	253513	254427	1,0036	338018	394286	1,1665	350553	369893	1,0552

(c) Consumos calculados versus consumos simulados do modelo retângulo pequeno (Rp) para os sistemas de iluminação, equipamentos e climatização.

Consumo com iluminação				Consumo com outros sistemas			Consumo com sistema de climatização		
Gabarito do edifício	C_{il} calculado (kWh)	C_{il} simulado (kWh)	fator de correção	C_{eq} calculado (kWh)	C_{eq} simulado (kWh)	fator de correção	C_{ac} calculado (kWh)	C_{ac} simulado (kWh)	fator de correção
2	28753	28857	1,0036	38338	44720	1,1665	42204	36411	0,8627
3	43130	43286	1,0036	57507	67080	1,1665	65184	59430	0,9117
4	57507	57715	1,0036	76677	89441	1,1665	88790	84470	0,9513
5	71884	72144	1,0036	95846	111801	1,1665	111770	107397	0,9609
6	86261	86572	1,0036	115015	134161	1,1665	134795	130222	0,9661
7	100638	101001	1,0036	134184	156522	1,1665	157730	152958	0,9697
8	115015	115430	1,0036	153354	178882	1,1665	180621	175610	0,9723
9	129392	129859	1,0036	172523	201242	1,1665	203601	198198	0,9735
10	143769	144288	1,0036	191692	223603	1,1665	225999	220706	0,9766
11	158146	158716	1,0036	210862	245963	1,1665	249091	243168	0,9762
12	172523	173145	1,0036	230031	268323	1,1665	272004	265571	0,9763

(d) Consumos calculados versus consumos simulados do modelo retângulo grande (Rg) para os sistemas de iluminação, outros sistemas e climatização.

Consumo com iluminação				Consumo com outros sistemas			Consumo com sistema de climatização		
Gabarito do edifício	C_{il} calculado (kWh)	C_{il} simulado (kWh)	fator de correção	C_{eq} calculado (kWh)	C_{eq} simulado (kWh)	fator de correção	C_{ac} calculado (kWh)	C_{ac} simulado (kWh)	fator de correção
2	40734	40881	1,0036	54312	63354	1,1665	61643	50423	0,8180
3	61102	61322	1,0036	81469	95031	1,1665	95072	82564	0,8684
4	81469	81763	1,0036	108625	126708	1,1665	129169	117767	0,9117
5	101836	102204	1,0036	135782	158385	1,1665	162631	149839	0,9213
6	122204	122644	1,0036	162938	190062	1,1665	195960	181800	0,9277
7	142571	143085	1,0036	190095	221739	1,1665	229322	213611	0,9315
8	162938	163526	1,0036	217251	253416	1,1665	262884	245329	0,9332
9	183306	183967	1,0036	244408	285094	1,1665	296347	276949	0,9345
10	203673	204408	1,0036	271564	316771	1,1665	329608	308491	0,9359
11	224040	224848	1,0036	298721	348448	1,1665	363305	339940	0,9357
12	244408	245289	1,0036	325877	380125	1,1665	395931	371310	0,9378

APÊNDICE J – VALORES DE CONSUMO DE ENERGIA OBTIDOS POR SIMULAÇÃO DE CADA MODELO, PARA DIFERENTES AZIMUTES, NOS CENÁRIOS COM E SEM SOMBRA

(a) Diferença de consumo de energia no modelo quadrado pequeno, considerando os cenários sem e com sombra para oito azimutes.

Azimute	Consumo de energia (kWh) Qp 12 pavimentos			Consumo de energia (kWh) Qp 6 pavimentos		
	s/sombra	c/sombra	diferença	s/sombra	c/sombra	diferença
0°	451509	434523	4%	222711	217927	2%
45°	452584	439534	3%	223209	219585	2%
90°	450860	437823	3%	222422	219120	1%
135°	452603	441277	3%	223215	220040	1%
180°	451509	435718	3%	222711	217976	2%
225°	452584	441371	2%	223209	220048	1%
270°	450860	438117	3%	222422	219222	1%
315°	452603	439578	3%	223215	219614	2%
		média	3%		média	2%

(b) Diferença de consumo de energia no modelo quadrado grande, considerando os cenários sem e com sombra para oito azimutes.

Azimute	Consumo de energia (kWh) Qg 12 pavimentos			Consumo de energia (kWh) Qg 6 pavimentos		
	s/sombra	c/sombra	diferença	s/sombra	c/sombra	diferença
0°	978104	924609	5%	480639	462701	4%
45°	980272	930553	5%	481636	465404	3%
90°	978104	931419	5%	480639	465829	3%
135°	980272	934978	5%	481636	466862	3%
180°	978104	930817	5%	480639	464123	3%
225°	980272	935567	5%	481636	467067	3%
270°	978104	932186	5%	480639	466139	3%
315°	980272	930635	5%	481636	465360	3%
		média	5%		média	3%

(c) Diferença de consumo de energia no modelo retângulo pequeno, considerando os cenários sem e com sombra para oito azimutes.

Azimute	Consumo de energia (kWh) Rp 12 pavimentos			Consumo de energia (kWh) Rp 6 pavimentos		
	s/sombra	c/sombra	diferença	s/sombra	c/sombra	diferença
0°	674264	641217	5%	331926	322317	3%
45°	672974	646283	4%	331324	323516	2%
90°	668129	643352	4%	329164	322353	2%
135°	673091	649353	4%	331397	324632	2%
180°	674264	644368	4%	331926	323110	3%
225°	672974	649549	3%	331324	324630	2%
270°	668129	643836	4%	329164	322538	2%
315°	673091	646558	4%	331397	323642	2%
		média	4%		média	2%

(d) Diferença de consumo de energia no modelo retângulo grande, considerando os cenários sem e com sombra para oito azimutes.

Azimute	Consumo de energia (kWh) Rg 12 pavimentos			Consumo de energia (kWh) Rg 6 pavimentos		
	s/sombra	c/sombra	diferença	s/sombra	c/sombra	diferença
0°	841425	804244	4%	413837	402967	3%
45°	838307	810996	3%	412389	404906	2%
90°	831016	810077	3%	409174	404241	1%
135°	838428	811651	3%	412481	405095	2%
180°	841425	804339	4%	413837	402967	3%
225°	838307	811616	3%	412389	404976	2%
270°	831016	810142	3%	409174	404237	1%
315°	838428	811011	3%	412481	405024	2%
		média	3%		média	2%