



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

Taylana Piccinini Scolari

**Método multicritério integrado ao ciclo de vida com foco no desempenho
termoenergético para avaliação ambiental, econômica e social de coberturas verdes,
frias e convencionais**

Florianópolis - SC
2025

Taylana Piccinini Scolaro

**Método multicritério integrado ao ciclo de vida com foco no desempenho
termoenergético para avaliação ambiental, econômica e social de coberturas verdes,
frias e convencionais**

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

Orientador: Prof. Enedir Ghisi, PhD

Coorientadora: Prof^ª. Cristina Matos Silva

Florianópolis - SC

2025

Ficha de identificação da obra

Scolaro, Taylana Piccinini

Método multicritério integrado ao ciclo de vida com foco no desempenho termoenergético para avaliação ambiental, econômica e social de coberturas verdes, frias e convencionais / Taylana Piccinini Scolaro ; orientador, Eneir Ghisi, coorientadora, Cristina Matos Silva, 2025.
219 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Desempenho termoenergético. 3. Análise multicritério. 4. Coberturas. 5. Sustentabilidade. I. Ghisi, Eneir. II. Silva, Cristina Matos. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Taylana Piccinini Scolari

Método multicritério integrado ao ciclo de vida com foco no desempenho termoenergético para avaliação ambiental, econômica e social de coberturas verdes, frias e convencionais

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

Prof. Nuno Albino Vieira Simões, Dr.
Universidade de Coimbra

Prof.^a Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira, Dr.^a.
Universidade Federal de Mato Grosso

Prof. Deivis Luís Marinoski, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de doutor em Engenharia Civil no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Eneir Ghisi, PhD
Orientador

Florianópolis, 2025.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Márcia e César, e ao meu irmão, Ricardo, pelo apoio incondicional ao longo destes anos de estudo e dedicação à pesquisa. Ao meu namorado, João Gabriel, pelo inventivo e pelo acolhimento diário, que foram essenciais em cada etapa do desenvolvimento desta tese.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Enedir Ghisi, pelo exemplo de profissionalismo, pelas correções rápidas e precisas, e pelas reuniões claras e objetivas. A minha coorientadora e supervisora do doutorado-sanduiche, Prof^a. Cristina Matos Silva, agradeço pela forma como me recebeu em Lisboa e por transmitir seu conhecimento e entusiasmo pelas coberturas verdes.

Aos meus colegas da UFSC, agradeço pelo suporte técnico, pelas conversas e pelas reuniões produtivas e descontraídas. Aos amigos que fiz no IST, em Lisboa, agradeço por terem transformado os quase sete meses do doutorado-sanduiche em uma experiência incrível.

À CAPES, agradeço pela concessão da bolsa de doutorado e de doutorado-sanduiche no exterior. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta etapa.

Resumo

Coberturas verdes e frias podem mitigar os impactos ambientais das edificações. No entanto, uma comparação robusta entre essas coberturas requer uma análise multidisciplinar, considerando os três pilares da sustentabilidade. O objetivo desta tese é propor um método de avaliação de coberturas integrada ao ciclo de vida, considerando parâmetros ambientais, econômicos e sociais, com foco no desempenho termoenergético. O método proposto baseou-se na avaliação das coberturas convencional, fria e verde, com e sem isolamento térmico, por meio de quatro parâmetros: energia consumida no ciclo de vida (ACVE), temperatura de pico da superfície externa, custo do ciclo de vida (ACCV) e horas de conforto térmico dos usuários. As coberturas foram avaliadas em uma edificação residencial multifamiliar representativa de habitações sociais brasileiras. Foram considerados os contextos climáticos de Florianópolis, Curitiba e Brasília. Além disso, a influência da configuração da ventilação natural no conforto térmico foi avaliada em Florianópolis. A energia operacional, a temperatura da superfície externa e as horas de conforto térmico foram determinadas por meio de simulações computacionais realizadas no programa EnergyPlus. O consumo de energia nas demais fases do ciclo de vida foi calculado a partir de bases de dados nacionais e internacionais, e o custo do ciclo de vida, com base em tabelas de composições de preços e mercado. Para a escolha da tipologia ideal de cobertura para cada clima, foi utilizado o processo de tomada de decisão com múltiplos critérios. Um questionário foi aplicado a um painel de especialistas a fim de definir a importância relativa dos parâmetros. A ponderação dos parâmetros foi realizada por meio do método AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Para selecionar a cobertura mais adequada com base no desempenho das tipologias em cada parâmetro e no peso de cada parâmetro, foi utilizado o método TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*). Adicionalmente, durante o doutorado-sanduíche, foi conduzida uma pesquisa sobre a evapotranspiração em coberturas verdes e sua relação com a redução da temperatura superficial nos climas de Florianópolis e Lisboa. Os resultados deste estudo foram publicados em artigo científico. A ACVE mostrou que a cobertura fria sem isolamento foi a mais eficiente em Florianópolis e Brasília, reduzindo o consumo energético em 14,0% e 21,3%, respectivamente, em comparação à cobertura convencional. A cobertura verde sem isolamento foi a mais adequada em Curitiba, com redução de 22,1%. A cobertura convencional registrou as maiores temperaturas de pico na superfície externa (61,9°C a 65,5°C), enquanto a cobertura verde apresentou os menores valores (39,1°C a 41,4°C). O isolamento térmico elevou as temperaturas nas coberturas convencional e fria. Com relação ao custo do ciclo de vida, a cobertura fria sem isolamento foi a que apresentou melhor desempenho, com reduções no custo total do ciclo de vida entre 7,4% e 15,9% em comparação com a cobertura convencional e entre 27,5% e 32,8% em comparação com a verde. Quanto ao número de horas de conforto térmico, a cobertura verde apresentou o melhor desempenho em todos os climas e configurações de ventilação. Os resultados isolados em cada parâmetro não permitiram definir a cobertura mais adequada, sendo necessário um método multicritério para ponderar os parâmetros e identificar a alternativa mais sustentável. A cobertura fria sem isolamento foi considerada a mais sustentável em Florianópolis e Brasília, e a cobertura verde sem isolamento, em Curitiba. O método proposto viabilizou uma análise abrangente das tipologias de cobertura em contextos brasileiros, orientando sua escolha. Além disso, permite adaptações a outros contextos climáticos e edificações, com modelos de cobertura e pesos dos parâmetros ajustáveis às condições locais.

Palavras-chave: Cobertura verde. Cobertura fria. Desempenho termoenergético. Análise multicritério. Tomada de decisão. Sustentabilidade.

Abstract

Green and cool roofs can mitigate the environmental impacts of buildings. However, a robust comparison between these roofs requires a multidisciplinary analysis, considering the three pillars of sustainability. This thesis aims to propose an integrated life cycle assessment method for roofs, considering environmental, economic and social parameters, focusing on thermal and energy performance. The method proposed was based on the evaluation of conventional, cool and green roofs, with and without thermal insulation, using four parameters: energy consumed in the life cycle (LCEA), peak outside surface temperature, life cycle cost (LCC) and thermal comfort hours. The roofs were evaluated in a multi-family residential building representative of Brazilian social housing. The climatic contexts of Florianópolis, Curitiba and Brasília were considered. Furthermore, the influence of the natural ventilation configuration on thermal comfort was assessed in Florianópolis. Operative energy, outside surface temperature and thermal comfort hours were determined using computer simulations in the EnergyPlus programme. Energy consumption in the other life cycle phases was calculated using national and international databases, and the life cycle cost was based on tables of price compositions and market. A multi-criteria decision-making process was used to select the ideal roof typology for each climate. A questionnaire was applied to a panel of experts to define the relative importance of the parameters. The parameters were weighted using the AHP (Analytic Hierarchy Process) method. The TOPSIS method (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) was used to select the most suitable roof based on the performance of the typologies in each parameter and the weight of each parameter. Furthermore, during the doctoral sandwich programme, research was conducted into evapotranspiration in green roofs and its relationship with the reduction in surface temperature in the climates of Florianópolis and Lisbon. The results of this study were published in a scientific article. LCEA showed that the cool roof without insulation was the most efficient in Florianópolis and Brasília, reducing energy consumption by 14.0% and 21.3%, respectively, compared to the conventional roof. The green roof without insulation was the most suitable in Curitiba, with a reduction of 22.1%. The conventional roof recorded the highest peak outside-surface temperatures (61.9°C to 65.5°C), while the green roof showed the lowest temperatures (39.1°C to 41.4°C). Thermal insulation raised temperatures on both conventional and cool roofs. Concerning life cycle costs, the cool roof without insulation showed the best performance, with reductions in total life cycle costs between 7.4% and 15.9% compared to the conventional roof and between 27.5% and 32.8% compared to the green roof. Regarding the number of hours of thermal comfort, the green roof demonstrated superior performance across all climates and natural ventilation configurations. However, the individual parameters alone were insufficient to determine the most suitable roof typology. A multi-criteria approach was required to weight the parameters and identify the most sustainable alternative. The cool roof without insulation was considered the most sustainable in Florianópolis and Brasília, and the green roof without insulation, in Curitiba. It should be emphasised that these results are influenced by the weights assigned to the parameters, which were defined based on the opinion of a limited group of experts. The method proposed enabled a comprehensive analysis of roof typologies in Brazilian contexts, and can be used to select more appropriate roofs. In addition, it can be adapted to other climatic contexts and buildings, with roof models and parameter weights adjustable to local conditions.

Keywords: Green roof. Cool roof. Thermal and energy performance. Multi-criteria analysis. Decision-making. Sustainability.

Lista de figuras

Figura 1 - Camadas básicas de uma cobertura verde.....	27
Figura 2 - Balanço de energia da cobertura verde	33
Figura 3 - Fluxos de energia em coberturas frias	35
Figura 4 - Refletância espectral de um revestimento preto convencional e um preto frio	36
Figura 5 - Relação existente entre os tópicos centrais abordados na revisão de literatura.....	69
Figura 6 - Etapas da pesquisa	71
Figura 7 - Modelo de edificação multifamiliar considerado neste estudo.....	73
Figura 8 - Cronograma de ocupação.....	75
Figura 9 - Tipologias de cobertura consideradas no estudo	76
Figura 10 - Materiais das camadas da cobertura convencional (fibrocimento).....	77
Figura 11 - Materiais utilizados na cobertura fria (fibrocimento branco)	78
Figura 12 - Materiais utilizados nas camadas da cobertura verde	81
Figura 13 - Matriz utilizada no método AHP para ponderar os parâmetros de avaliação.....	98
Figura 14 - Matriz utilizada no método TOPSIS para selecionar a melhor alternativa com base em múltiplos critérios	100
Figura 15 - Consumo de energia elétrica com climatização por área dos ambientes climatizados do apartamento com a utilização das coberturas convencional, fria e verde em (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília.....	104
Figura 16 - Temperatura de pico da superfície externa das coberturas convencional, fria e verde no contexto climático de Florianópolis, Curitiba e Brasília	108
Figura 17 - Horas anuais de conforto térmico nos ambientes de permanência prolongada com a utilização das coberturas convencional, fria e verde em (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília.....	110
Figura 18 - Temperatura operativa da sala em três dias de verão com as configurações de ventilação natural durante o período ocupado e de manhã à noite para o caso da cobertura convencional sem isolamento em Florianópolis.....	115
Figura 19 - Temperatura operativa dos dormitórios em três dias de verão com as configurações de ventilação natural durante o período ocupado e de manhã à noite para o caso da cobertura convencional sem isolamento em Florianópolis.....	116

Figura 20 - Temperatura operativa da sala em três dias de verão com as configurações de ventilação natural durante o período ocupado e noturna para o caso da cobertura convencional sem isolamento em Florianópolis.....	117
Figura 21 - Temperatura operativa dos dormitórios em três dias de verão com as configurações de ventilação natural durante o período ocupado e noturna para o caso da cobertura convencional sem isolamento em Florianópolis.....	117
Figura 22 - Proporção da energia consumida em cada fase do ciclo de vida das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília (período de análise de 40 anos)	125
Figura 23 - Proporção dos custos em cada fase do ciclo de vida das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília (período de análise de 40 anos).....	134
Figura 24 - Valor presente líquido das coberturas convencional, fria e verde, com e sem isolamento, por área de apartamento em Florianópolis, Curitiba e Brasília ao final do período de análise (40 anos)	136
Figura 25 - Variação dos valores de entrada que influenciam o VPL das coberturas (a) convencional, (b) fria e (c) verde em Florianópolis	137
Figura 26 - Desempenho normalizado das coberturas convencional, fria e verde com base nos parâmetros de avaliação em (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília	141
Figura 27 - Proximidade das coberturas convencional, fria e verde com a solução ideal em Florianópolis, Curitiba e Brasília	143
Figura 28 - Proximidade das coberturas convencional, fria e verde com a solução ideal sob os cenários de ponderação alternativos em Florianópolis, Curitiba e Brasília	145
Figura 29 - Temperatura do ar ao longo do ano nas cidades de (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília	174
Figura 30 - Umidade relativa ao longo do ano nas cidades de (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília	175
Figura 31 - Precipitação anual nas cidades de (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília..	176
Figura 32 - Temperatura horária da superfície externa das coberturas convencional, fria e verde, sem isolamento, em (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília	183
Figura 33 - Fluxo de calor por convecção entre a superfície externa das coberturas e o ambiente externo em três dias de verão nos climas de (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília	184
Figura 34 - Representatividade dos custos das coberturas na fase inicial em Florianópolis..	208

Figura 35 - Representatividade dos custos das coberturas na fase inicial em Curitiba.....	209
Figura 36 - Representatividade dos custos das coberturas na fase inicial em Brasília.....	210
Figura 37 - Representatividade dos custos das coberturas na fase operacional em Florianópolis	211
Figura 38 - Representatividade dos custos das coberturas na fase operacional em Curitiba ..	212
Figura 39 - Representatividade dos custos das coberturas na fase operacional em Brasília ..	213
Figura 40 - Representatividade dos custos das coberturas na fase de desconstrução em Florianópolis.....	214
Figura 41 - Representatividade dos custos das coberturas na fase de desconstrução em Curitiba	215
Figura 42 - Representatividade dos custos das coberturas na fase de desconstrução em Brasília	216
Figura 43 - Variação dos valores de entrada que influenciam o VPL das coberturas (a) convencional, (b) fria e (c) verde em Curitiba.....	217
Figura 44 - Variação dos valores de entrada que influenciam o VPL das coberturas (a) convencional, (b) fria e (c) verde em Brasília	218

Lista de quadros

Quadro 1 - Escala fundamental do método AHP	63
Quadro 2 - Atividades de manutenção das coberturas convencional, fria e verde	89
Quadro 3 - Síntese dos resultados da pesquisa	146
Quadro 4 - Trabalhos que utilizaram método de tomada de decisão multicritério para escolha de coberturas	167

Lista de tabelas

Tabela 1 - Parâmetros da vegetação de coberturas verdes reportados na literatura	28
Tabela 2 - Classificação climática das cidades de Florianópolis, Curitiba e Brasília	72
Tabela 3 - Área útil dos ambientes do modelo de edificação multifamiliar	74
Tabela 4 - Cargas internas referentes às pessoas consideradas no modelo de edificação	75
Tabela 5 - Cargas internas referentes à iluminação consideradas no modelo de edificação	75
Tabela 6 - Cargas internas referentes aos equipamentos consideradas no modelo de edificação	75
Tabela 7 - Dados físicos da cobertura convencional (fibrocimento)	77
Tabela 8 - Dados físicos das camadas de vegetação e substrato das coberturas verdes	79
Tabela 9 - Dados físicos das camadas de filtro, drenagem, isolamento térmico, anti-raiz e impermeabilização da cobertura verde	80
Tabela 10 - Índice de consistência randômico (RI) em função da ordem da matriz	99
Tabela 11 - Percentual de horas anuais de conforto e desconforto térmico nos ambientes de permanência prolongada em função da configuração de ventilação natural com a utilização das coberturas convencional, fria e verde em Florianópolis	114
Tabela 12 - Energia embutida inicial das coberturas convencional, fria e verde do apartamento	119
Tabela 13 - Energia operacional das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Florianópolis, Curitiba e Brasília (período de análise de 40 anos)	122
Tabela 14 - Energia embutida na manutenção das coberturas convencional, fria e verde do apartamento (período de análise de 40 anos)	122
Tabela 15 - Energia de desconstrução das coberturas convencional, fria e verde do apartamento	123
Tabela 16 - Energia total consumida no ciclo de vida das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Florianópolis, Curitiba e Brasília (período de análise de 40 anos)	124
Tabela 17 - Custo inicial das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Florianópolis	127
Tabela 18 - Tarifas de energia elétrica e reajuste anual das tarifas para o subgrupo residencial normal (B1) em Florianópolis, Curitiba e Brasília	129

Tabela 19 - Custo operacional com energia elétrica nos ambientes de permanência prolongada do apartamento com as coberturas convencional, fria e verde em Florianópolis (período de análise de 40 anos).....	129
Tabela 20 - Inflação e taxa de reajuste anual do salário mínimo no Brasil	130
Tabela 21 - Custo de manutenção das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Florianópolis (período de análise de 40 anos)	131
Tabela 22 - Custo de desconstrução das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Florianópolis	132
Tabela 23 - Custo total do ciclo de vida das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Florianópolis (período de análise de 40 anos)	133
Tabela 24 - Valor de ponderação dos parâmetros de avaliação das alternativas de cobertura	139
Tabela 25 - Energia embutida inicial necessária para a construção das coberturas convencional e fria com isolamento térmico	185
Tabela 26 - Energia consumida no transporte de materiais até a obra das coberturas convencional e fria com isolamento térmico	185
Tabela 27 - Energia consumida por equipamentos na obra das coberturas convencional e fria com isolamento térmico.....	186
Tabela 28 - Energia embutida inicial necessária para a construção da cobertura verde com isolamento térmico	186
Tabela 29 - Energia consumida no transporte de materiais até a obra da cobertura verde com isolamento térmico	187
Tabela 30 - Energia consumida por equipamentos na atividade de manutenção das coberturas convencional e fria (período de análise de 40 anos).....	187
Tabela 31 - Energia embutida nos materiais utilizados na manutenção da cobertura verde (período de análise de 40 anos)	187
Tabela 32 - Energia consumida no transporte de materiais para as atividades de manutenção da cobertura verde	188
Tabela 33 - Energia consumida no transporte de materiais das coberturas convencional e fria com isolamento térmico até o aterro.....	188
Tabela 34 - Energia consumida por equipamentos para a desconstrução das coberturas convencional e fria com isolamento	188

Tabela 35 - Energia consumida no transporte de materiais da cobertura verde com isolamento térmico até o aterro	189
Tabela 36 - Custo inicial das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Curitiba e Brasília	190
Tabela 37 - Custo operacional com energia elétrica no apartamento com as coberturas convencional, fria e verde em Curitiba e Brasília	190
Tabela 38 - Custo de manutenção das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Curitiba e Brasília.....	191
Tabela 39 - Custo de desconstrução das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Curitiba e Brasília.....	191
Tabela 40 - Custo total do ciclo de vida das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Curitiba e Brasília	192
Tabela 41 - Custos iniciais das coberturas convencional e fria em Florianópolis.....	193
Tabela 42 - Custos iniciais da cobertura convencional em Curitiba	194
Tabela 43 - Custos iniciais da cobertura convencional em Brasília	196
Tabela 44 - Custos iniciais da cobertura verde em Florianópolis.....	198
Tabela 45 - Custos iniciais da cobertura verde em Curitiba.....	199
Tabela 46 - Custos iniciais da cobertura verde em Brasília	200
Tabela 47 - Custos atuais de manutenção das coberturas convencional e fria em Florianópolis	201
Tabela 48 - Custos atuais de manutenção das coberturas convencional e fria em Curitiba ...	201
Tabela 49 - Custos atuais de manutenção das coberturas convencional e fria em Brasília....	201
Tabela 50 - Custos atuais de manutenção da cobertura verde em Florianópolis.....	201
Tabela 51 - Custos atuais de manutenção da cobertura verde em Curitiba.....	202
Tabela 52 - Custos atuais de manutenção da cobertura verde em Brasília.....	202
Tabela 53 - Custos atuais de desconstrução das coberturas convencional e fria em Florianópolis	203
Tabela 54 - Custos atuais de desconstrução das coberturas convencional e fria em Curitiba	204
Tabela 55 - Custos atuais de desconstrução das coberturas convencional e fria em Brasília	204
Tabela 56 - Custos atuais de desconstrução da cobertura verde em Florianópolis	205
Tabela 57 - Custos atuais de desconstrução da cobertura verde em Curitiba.....	206
Tabela 58 - Custos atuais de desconstrução da cobertura verde em Brasília	207

Sumário

1. Introdução	17
1.1. Justificativa	20
1.2. Ineditismo e relevância do tema	22
1.3. Objetivos	23
1.3.1. Objetivo geral.....	23
1.3.2. Objetivos específicos	23
1.4. Estrutura do trabalho.....	24
2. Revisão de literatura	26
2.1. Tipologias de cobertura para edificações.....	26
2.1.1. Cobertura verde	26
2.1.1.1. Energia de resfriamento e aquecimento	29
2.1.1.2. Ilhas de calor urbano	31
2.1.1.3. Cobertura verde no EnergyPlus.....	32
2.1.2. Cobertura fria	34
2.1.2.1. Energia de resfriamento e aquecimento	37
2.1.2.2. Ilhas de calor urbano	39
2.1.3. Comparações entre coberturas verdes e frias em diferentes climas	40
2.1.3.1. Energia de resfriamento e aquecimento	40
2.1.3.2. Ilhas de calor urbano	41
2.2. Desempenho termoenergético de edificações considerando os padrões de uso	43
2.3. Conforto térmico em edificações	47
2.4. Avaliação do ciclo de vida energético	50
2.4.1. Avaliação do ciclo de vida energético em edificações.....	52
2.4.2. Avaliação do ciclo de vida energético em coberturas	55
2.5. Análise do custo do ciclo de vida	57
2.5.1. Análise do custo do ciclo de vida em edificações.....	58
2.5.2. Análise do custo do ciclo de vida em coberturas	59
2.6. Tomada de decisão com múltiplos critérios	62
2.6.1. Tomada de decisão com múltiplos critérios para a escolha de edificações	64
2.6.2. Tomada de decisão com múltiplos critérios para a escolha de coberturas.....	66
2.7. Síntese da revisão de literatura	66
3. Método	70
3.1. Modelagem da edificação e simulação computacional.....	71

3.1.1. Contextos climáticos	72
3.1.2. Modelo de edificação	72
3.1.3. Tipologias de cobertura do modelo de edificação.....	76
3.1.3.1. Cobertura convencional.....	77
3.1.3.2. Cobertura fria	78
3.1.3.3. Cobertura verde	78
3.1.4. Configurações de controle da ventilação natural	81
3.1.5. Configurações de controle do ar-condicionado.....	82
3.1.6. Análise dos resultados da simulação computacional	83
3.1.6.1. Energia de resfriamento e aquecimento.....	83
3.1.6.2. Temperatura da superfície externa	83
3.1.6.3. Conforto térmico	84
3.2. Definição de objetivo e escopo da análise do ciclo de vida.....	85
3.2.1. ACVE das diferentes tipologias de cobertura	86
3.2.1.1. Energia embutida inicial.....	86
3.2.1.2. Energia operacional	87
3.2.1.3. Energia embutida na manutenção.....	88
3.2.1.4. Energia de desconstrução	90
3.2.2. ACCV das diferentes tipologias de cobertura.....	90
3.2.2.1. Custo inicial.....	91
3.2.2.2. Custo operacional	92
3.2.2.3. Custo de manutenção.....	93
3.2.2.4. Custo de desconstrução	94
3.2.2.5. Valor presente líquido	95
3.3. Definição da tipologia de cobertura mais adequada em cada contexto climático	96
3.3.1. Questionário	97
3.3.2. Ponderação dos parâmetros de avaliação	97
3.3.3. Seleção da alternativa mais sustentável em termos energéticos	99
4. Resultados e discussões	103
4.1. Simulação computacional	103
4.1.1. Energia de resfriamento e aquecimento	103
4.1.2. Temperatura da superfície externa	107
4.1.3. Conforto térmico	109
4.2. ACVE das diferentes tipologias de cobertura.....	118
4.2.1. Energia embutida inicial	119

4.2.2. Energia operacional.....	121
4.2.3. Energia embutida na manutenção	122
4.2.4. Energia de desconstrução	123
4.2.5. Energia do ciclo de vida.....	124
4.3. ACCV das diferentes tipologias de cobertura.....	126
4.3.1. Custo inicial	126
4.3.2. Custo operacional.....	128
4.3.3. Custo de manutenção	130
4.3.4. Custo de desconstrução	131
4.3.5. Custo do ciclo de vida.....	132
4.3.6. Valor presente líquido	135
4.4. Definição da tipologia de cobertura mais sustentável em termos energéticos	138
4.4.1. Ponderação dos parâmetros de avaliação por meio do método AHP.....	139
4.4.2. Seleção da alternativa mais adequada por meio do TOPSIS	140
4.5. Síntese dos resultados	145
5. Conclusões	147
5.1. Limitações do trabalho.....	149
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	150
Referências	152
Apêndice A - Trabalhos que utilizaram MCDM para escolha de coberturas.....	167
Apêndice B - Temperatura do ar, umidade relativa e precipitação das cidades avaliadas	174
Apêndice C - Questionário aplicado aos profissionais da construção civil.....	177
Apêndice D - Perfis horários da temperatura da superfície externa das coberturas	183
Apêndice E - Fluxo de calor por convecção entre a superfície externa das coberturas e o ambiente externo.....	184
Apêndice F - Avaliação do ciclo de vida energético (ACVE)	185
Apêndice G - Análise do custo do ciclo de vida (ACCV).....	190
Apêndice H - Quantitativo e custo dos insumos das coberturas.....	193
Apêndice I - Representatividade dos custos em cada fase do ciclo de vida	208
Apêndice J - Variação do VPL das coberturas conforme a variação dos valores de entrada.....	217

1. Introdução

O setor da construção civil é um dos principais contribuintes para os impactos ambientais devido ao alto consumo de energia, emissão de gases poluentes e uso de materiais não renováveis. De acordo com a Agência Internacional de Energia, a operação de edificações é responsável por 30% do consumo global final de energia e 26% das emissões de CO₂ relacionadas com a energia (IEA, 2024). No Brasil, as residências respondem por 27,5% do consumo de eletricidade (EPE, 2024). A expectativa é de que a demanda de energia em edifícios continue a aumentar, impulsionada pelo melhor acesso à energia nos países em desenvolvimento, maior uso de dispositivos que consomem energia e crescimento da área útil dos edifícios ao redor do mundo (IEA, 2020). De acordo com dados da Empresa de Pesquisa Energética, no ano de 2017 o ar-condicionado foi o quarto equipamento com maior participação no consumo de eletricidade no setor residencial, atrás apenas da geladeira, televisão e chuveiro elétrico. Além disso, estima-se que a posse de ar-condicionado em residências brasileiras tenha aumentado mais de duas vezes entre 2005 e 2017; e que ainda haverá demanda por estes aparelhos no futuro (EPE, 2018).

A Agência Internacional de Energia também avaliou os principais fatores que influenciam o consumo energético e destacou: clima, envoltória da edificação, sistemas instalados, operação e manutenção da edificação, atividades e comportamento dos usuários e qualidade do ambiente interno. Concluiu-se ainda que a avaliação conjunta dos fatores citados é fundamental para entender o consumo energético dos edifícios (Yoshino; Hong; Nord, 2017). Embora vários pesquisadores tenham explorado a maioria desses parâmetros, os estudos sobre o comportamento dos ocupantes são mais recentes (Balvedi; Ghisi; Lamberts, 2018). Portanto, é evidente a necessidade de melhorar o desempenho dos componentes da envoltória dos edifícios em diferentes contextos climáticos e avaliá-lo associado aos padrões de uso da edificação, a fim de reduzir o consumo de energia, reduzindo as demandas de aquecimento e resfriamento.

Além disso, devido à alta concentração de edificações no meio urbano, as características da envoltória dessas edificações desempenham papel fundamental no equilíbrio térmico urbano, uma vez que absorvem a radiação solar e infravermelha e dissipam parte do calor acumulado, aumentando a temperatura ambiente (Santamouris; Synnefa; Karlessi, 2011). Esses impactos podem ser mitigados pela implementação de estratégias passivas. Em particular, a superfície das coberturas desempenha papel relevante – representa cerca de 20 a 25% das

superfícies urbanas e também é caracterizada por maior fator de visão para a radiação solar incidente (Piselli *et al.*, 2017; Besir; Cuce, 2018). Com o objetivo de reduzir o consumo de energia em escala de edificação e minimizar a contribuição com os efeitos das ilhas de calor em escala urbana, soluções passivas têm sido investigadas ao longo do seu ciclo de vida, como as coberturas verdes e as coberturas frias.

As coberturas verdes são telhados vegetados, cuja estrutura pode ser composta por algumas ou várias camadas, conforme a necessidade ou função: vegetação, substrato, filtro, drenagem/ retenção, proteção anti-raiz e impermeabilização. Diversos estudos destacam seus benefícios ambientais, como redução da energia de resfriamento e aquecimento (Bevilacqua, 2021), redução do efeito das ilhas de calor (Gagliano *et al.*, 2015), redução do escoamento superficial (Yao *et al.*, 2020), melhoria da qualidade do ar (Yao *et al.*, 2020), manutenção da biodiversidade (Domínguez *et al.*, 2020), além da redução do estresse térmico, aumentando a durabilidade da membrana (Teemusk; Mander, 2009). O desempenho térmico das coberturas verdes é associado a processos físicos que ocorrem nas camadas de vegetação e substrato (Saadatian *et al.*, 2013).

As coberturas frias são caracterizadas pela alta refletância solar, o que reduz a radiação solar absorvida pela superfície do telhado e pela alta emitância térmica, o que auxilia na dissipação do calor absorvido (Santamouris; Synnefa; Karlessi, 2011). Na escala da edificação, essa tipologia de cobertura reduz a demanda de energia para resfriamento, melhora o conforto térmico interno, aumenta a vida útil da estrutura do telhado devido ao menor estresse térmico e diminui as emissões de CO₂ devido à redução do uso de ar-condicionado (Pisello, 2017). Em escala urbana, contribui com a melhoria do microclima urbano, diminuindo a temperatura da superfície da cobertura e minimizando os efeitos das ilhas de calor (Roman *et al.*, 2016).

Apesar dos diversos benefícios apresentados pelas coberturas verdes e frias durante a fase operacional, é necessário avaliar essas estratégias durante todo o seu ciclo de vida. Assim, é possível comparar os benefícios apresentados durante a fase de uso com os recursos necessários nas fases de fabricação dos materiais, construção e fim da vida da edificação e verificar se esses sistemas são de fato mais sustentáveis comparados com coberturas convencionais. Nesse sentido, a avaliação do ciclo de vida (ACV) se apresenta com uma técnica viável para obtenção dos impactos associados a produtos ou sistemas ao longo do seu ciclo de vida, da extração da matéria prima até a disposição final dos materiais (ISO, 2006a). Além do conceito de ACV, outras abordagens podem ser utilizadas para investigar os impactos

ambientais de edificações, como a avaliação do ciclo de vida energético (ACVE). A ACVE é uma ferramenta que permite contabilizar todos os insumos de energia de um edifício em seu ciclo de vida (Cabeza *et al.*, 2014).

Além da avaliação ambiental, o desenvolvimento de coberturas para edificações sustentáveis deve considerar também parâmetros econômicos e sociais. No âmbito econômico, a análise do custo do ciclo de vida (ACCV) tem sido utilizada por diversos estudos para avaliar o custo total de um produto ou sistema durante seu ciclo de vida – custos de aquisição, posse, operação, manutenção e descarte (Cabeza *et al.*, 2014). O aspecto social representa a temática mais complexa, uma vez que avaliação do ciclo de vida das edificações do ponto de vista social ainda não está no mesmo estágio de nível científico que a ACV ou ACCV. Embora a avaliação social ainda careça de consenso na literatura, uma das abordagens consiste em avaliar os impactos sobre os usuários, incluindo conforto térmico, redução de ruído e criação de áreas de lazer. Estudos focados no desempenho térmico e energético das edificações frequentemente empregam parâmetros de conforto térmico como referência (Gagliano *et al.*, 2015; Invidiata; Lavagna; Ghisi, 2018; Triana; Lamberts; Sassi, 2021).

Diante do exposto, essa pesquisa se propôs a desenvolver um método para analisar a sustentabilidade de diferentes tipologias de cobertura – verde, fria (fibrocimento branco) e convencional (fibrocimento) – com foco no desempenho termoenergético nos climas brasileiros de Florianópolis, Curitiba e Brasília. Simulações foram realizadas em uma edificação residencial para avaliar o desempenho de cada cenário de cobertura. A análise multicritério teve como base o consumo energético e o custo durante o ciclo de vida, a temperatura de pico da superfície externa das coberturas e o conforto térmico dos usuários. Buscou-se responder às seguintes questões: Qual tipologia de cobertura apresenta melhor desempenho durante o ciclo de vida energético em climas brasileiros? Qual a influência da tipologia de cobertura e do padrão de uso da ventilação natural no conforto térmico? Qual o custo destas coberturas ao longo de sua vida útil? Como associar diferentes abordagens – ambiental, econômica e social – com o intuito de desenvolver um método indicativo da sustentabilidade destas tipologias de cobertura focado no desempenho termoenergético?

Assim, esta tese de doutorado apresenta uma contribuição significativa ao fornecer uma ferramenta de apoio à tomada de decisão em contextos nacionais. Adicionalmente, durante o período de doutorado-sanduiche, buscou-se avançar em uma temática ainda pouco explorada na literatura: a evapotranspiração em coberturas verdes e sua relação com a redução da

temperatura superficial destas coberturas, uma questão central para a mitigação dos efeitos das ilhas de calor urbano. O estudo teve como objetivo avaliar a resposta da evapotranspiração frente a diferentes taxas de irrigação e parâmetros de vegetação, considerando os contextos climáticos de Florianópolis (Brasil) e Lisboa (Portugal). Além disso, foram analisados e comparados os fluxos do balanço de energia das coberturas verde, fria e convencional. A contextualização desta lacuna da literatura, o detalhamento metodológico, os resultados obtidos e as principais conclusões estão documentados em Scolaro, Ghisi e Silva (2024).

1.1 . Justificativa

Segundo Ascione *et al.* (2016), ao mesmo tempo em que o setor das edificações é responsável pela geração de significativo impacto ambiental, é um dos segmentos com maior potencial para melhorar a eficiência energética global e o desenvolvimento sustentável por meio da adoção de estratégias passivas e ativas. Nesse contexto, a literatura mostra que soluções passivas como coberturas verdes e frias podem ser efetivas como resposta ao aumento da urbanização e à mudança do clima e consistem em meios para reduzir o consumo de energia das edificações e o efeito das ilhas de calor urbano, além de aumentar o bem-estar humano.

Parizotto e Lamberts (2011) monitoraram o desempenho térmico de uma cobertura verde instalada em uma residência unifamiliar em Florianópolis, Santa Catarina, em comparação com coberturas convencionais (cerâmica e metálica). Os autores verificaram que durante o período quente a cobertura verde reduziu o ganho de calor em mais de 92 e 97% e aumentou a perda de calor em 49 e 20% com relação às coberturas cerâmica e metálica, respectivamente. No período frio, a cobertura verde reduziu o ganho de calor em 70 e 84%, no entanto, também reduziu a perda de calor em 44 e 52% comparada com a cobertura cerâmica e metálica, respectivamente. Rosado *et al.* (2014) realizaram monitoramento contínuo de duas residências unifamiliares térreas semelhantes construídas lado a lado em Fresno, Califórnia, durante um ano para avaliar temperatura, fluxo de calor e usos de energia de uma cobertura fria (refletância 0,51) em comparação com uma cobertura convencional (refletância 0,15). A economia anual de energia de resfriamento atribuída à utilização da cobertura fria foi igual a 2,82 kWh/m² (26%) e a redução da demanda de energia de resfriamento no horário de pico foi de 0,88 W/m² (37%). Em um estudo comparativo em três diferentes contextos climáticos italianos, Costanzo, Evola e Marletta (2016) mostraram que as coberturas frias são mais adequadas para reduzir a temperatura externa da cobertura e mitigar os efeitos das ilhas de calor.

Por outro lado, quando considerada a demanda anual de energia primária dos edifícios, as coberturas verdes apresentam melhor desempenho devido às suas propriedades de sombreamento e isolamento.

No entanto, ressalta-se que o desempenho térmico de estratégias implementadas na envoltória é significativamente afetado pelo clima, pela consideração dos padrões de uso e ocupação e pela arquitetura das edificações. De acordo com Coma *et al.* (2020), a consideração das cargas internas é essencial ao avaliar o desempenho térmico de edificações. Em um estudo acerca da eficácia de sistemas de vegetação vertical, os autores verificaram que a economia de energia foi reduzida em até 27% para refrigeração e aumentou cerca de 3% para aquecimento quando consideradas as cargas internas. Segundo Piselli *et al.* (2017), a configuração do uso do edifício, da ocupação e das atividades dos usuários exerce influência nos requisitos de energia da edificação e, portanto, afeta a refletância solar mais adequada para a cobertura.

O desempenho das coberturas verdes e frias depende de diversas variáveis. Portanto, uma comparação ampla entre as tipologias exige uma análise aprofundada, considerando também questões importantes, como análise do ciclo de vida, custos e impacto no conforto urbano (Gagliano *et al.*, 2015). De fato, autores apontam que a literatura atual ainda carece de análises de ciclo de vida, custo do ciclo de vida e custo-benefício capazes de destacar os benefícios ambientais e econômicos de aplicação de coberturas verdes e frias (Pisello, 2017; Shafique *et al.*, 2020; Scolaro; Ghisi, 2022). No entanto, o processo de vincular os impactos ambientais às preferências socioeconômicas envolve certa complexidade. Nesse contexto, a aplicação de um método multicritério de apoio à decisão pode complementar a ACV e auxiliar na seleção de coberturas mais adequadas em função do clima e do padrão de uso da edificação (Dabbaghian *et al.*, 2014).

Esta pesquisa partiu da hipótese de que a seleção da tipologia de cobertura realizada avaliando exclusivamente o desempenho térmico ou tão somente a geração potencial de impactos ambientais não é o método mais adequado para avaliar a sustentabilidade desses sistemas. Assim, o trabalho buscou avaliar comparativamente uma edificação residencial a partir de diferentes alternativas de coberturas e selecionar a tipologia mais adequada, por meio de uma abordagem multidisciplinar que combine parâmetros definidos em cada um dos pilares da sustentabilidade (ambiental, econômico e social). A pesquisa proposta justifica-se pela necessidade de avaliar os benefícios proporcionados pelas coberturas verdes e frias como mecanismos de redução da demanda de energia, juntamente com os impactos ambientais

potencialmente gerados e com aspectos socioeconômicos, além de fornecer subsídios para a escolha de sistemas de coberturas mais sustentáveis em termos energéticos. Além disso, de acordo com relatório recente da Organização das Nações Unidas (ONU), a população urbana global deve crescer em mais 2,2 bilhões de pessoas até 2050 e, portanto, é fundamental que as cidades se reconstruam de forma inclusiva e sustentável (UN-HABITAT, 2022).

1.2. Ineditismo e relevância do tema

Estudos relacionados à escolha da tipologia de cobertura para edificações com base em avaliações que considerem múltiplos critérios vêm sendo desenvolvidos recentemente utilizando diversos parâmetros e metodologias. Na literatura são encontrados estudos que desenvolvem: comparação do desempenho energético e ambiental de uma cobertura padrão, uma verde e uma fria por meio da soma das pontuações atribuídas a cada parâmetro estabelecido (Gagliano *et al.*, 2015); seleção entre quatro tipos de coberturas planas baseada em uma lista de indicadores alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas combinando a técnica do Processo Analítico Hierárquico (AHP) com a Técnica de Ordem de Preferência por Similaridade para a Solução Ideal (TOPSIS) (Guzmán-Sánchez *et al.*, 2018); investigação dos fatores que influenciam os projetistas na escolha entre uma cobertura convencional e outra verde com base em parâmetros ambientais, econômicos e sociais utilizando a técnica AHP (Rosasco; Perini, 2019); determinação da cobertura verde com a melhor relação custo-benefício por meio do método MACBETH (Teotónio *et al.*, 2020); escolha do tipo de cobertura verde em termos de redução da poluição do ar com base em análise SWOT, utilizando a abordagem multicritério MIVES (Motlagh; Pons; Hosseini, 2021); determinação da melhor composição de cobertura verde considerando avaliação do ciclo de vida e custo do ciclo de vida por meio de diferentes métodos estatísticos na ferramenta MCA7 (Vilčeková *et al.*, 2024).

A principal inovação dessa pesquisa consistiu em propor um método de análise amplo incluindo parâmetros não considerados concomitantemente em estudos anteriores como desempenho termoenergético e análise do ciclo de vida energético, além de parâmetros socioeconômicos, para a escolha da tipologia de cobertura de edificações incluindo cobertura verde, fria e convencional. As pontuações atribuídas aos parâmetros escolhidos resultaram de simulações baseadas em dados climáticos específicos, além de considerar o padrão de uso da edificação, visto a importância dessas variáveis para a aplicabilidade dos resultados. A análise

de decisão multicritério (MCDA) é um dos métodos mais comuns em análise de decisão, amplamente utilizado para avaliar e comparar opções que envolvem o alcance de múltiplos objetivos (Franco; Montibeller, 2011).

Além disso, apesar de diversos estudos avaliarem o desempenho térmico e parâmetros de conforto térmico proporcionados por coberturas verdes e frias, poucos estudos comparativos relativos ao ciclo de vida energético destas tipologias de cobertura foram encontrados (Carpenter; Zhou, 2013). A ACVE é uma metodologia de avaliação do ciclo de vida simplificada, porém significativa, para a análise dos impactos ambientais priorizando os dados de consumo energético. Por ter estrutura mais simples, demanda menor custo e tempo para sua execução e, embora não substitua uma análise mais ampla como a ACV, facilita a tomada de decisão acerca da eficiência energética e dos impactos associados (Tavares, 2006).

A relevância do tema está em avaliar de forma integrada a implantação de estratégias passivas em coberturas (verde e fria) em comparação com um sistema convencional (fibrocimento), a fim de fornecer um único indicador para a escolha de cobertura em climas brasileiros. Além disso, existe uma lacuna na literatura nacional acerca de estudos que considerem a influência dos padrões de uso da edificação para obtenção do desempenho térmico de coberturas, que realizem a análise da energia e do custo durante o ciclo de vida das coberturas (Silva, 2019) e que comparem a eficiência de coberturas verdes e frias (Dias, 2016; Tonietto, 2021; Balvedi; Giglio, 2023). Assim, este trabalho fornece subsídios aos gestores e projetistas para a escolha de tipologias de coberturas mais sustentáveis em termos energéticos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é propor um método de avaliação de coberturas integrada ao ciclo de vida, considerando parâmetros ambientais, econômicos e sociais, com foco no desempenho termoenergético de uma edificação residencial multifamiliar.

1.3.2. Objetivos específicos

São objetivos específicos:

- Avaliar o desempenho termoenergético de modelos representativos de coberturas convencional, fria e verde em uma edificação residencial multifamiliar brasileira;

- Avaliar o conforto térmico dos usuários a partir da implantação das diferentes tipologias de cobertura;
- Investigar a influência da configuração de controle da ventilação natural da edificação no conforto térmico do usuário;
- Quantificar os impactos ambientais potencialmente gerados pelas coberturas durante seu ciclo de vida em termos energéticos;
- Avaliar os custos associados à cada tipologia de cobertura durante seu ciclo de vida;
- Indicar a cobertura mais adequada em cada um dos diferentes climas brasileiros selecionados por meio da aplicação de um método multicritério de apoio à decisão.

1.4. Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo foi apresentado o assunto da pesquisa, a justificativa, o ineditismo e a relevância do tema, e também os objetivos geral e específicos que foram atingidos com a elaboração da pesquisa.

No segundo capítulo é apresentada a revisão de literatura, dividida em sete subseções: tipologias de cobertura para edificações, desempenho termoenergético de edificações considerando os padrões de uso, conforto térmico em edificações, avaliação do ciclo de vida energético, análise do custo do ciclo de vida, tomada de decisão com múltiplos critérios e síntese da revisão da literatura.

No terceiro capítulo é apresentado o método proposto, dividido em três grandes etapas. A primeira etapa detalha a modelagem da edificação e a simulação computacional, descrevendo os contextos climáticos, o modelo da edificação e as tipologias de cobertura consideradas, além de especificar as configurações de ventilação natural e ar-condicionado adotadas e os parâmetros utilizados para a análise dos resultados. Na segunda etapa são definidos o objetivo e o escopo da análise do ciclo de vida e os procedimentos de cálculo utilizados na avaliação do ciclo de vida energético e do custo do ciclo de vida. A terceira etapa apresenta os procedimentos adotados para a definição da tipologia de cobertura mais adequada em cada contexto climático: aplicação de questionário e metodologia multicritério para a ponderação dos parâmetros de avaliação e seleção da alternativa de cobertura.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do método proposto. Primeiramente, são descritos os resultados da simulação computacional, divididos em: energia de aquecimento e resfriamento, temperatura da superfície externa e conforto térmico. Em seguida, são apresentados os desempenhos das tipologias de cobertura em cada fase do ciclo de vida energético e do custo do ciclo de vida. Na sequência, apresentam-se os pesos dos parâmetros de avaliação encontrados e as tipologias de cobertura mais adequadas em termos energéticos em cada clima. Por fim, é apresentada a síntese dos resultados.

O quinto capítulo apresenta as principais conclusões do estudo quanto ao desempenho das coberturas isoladamente em cada parâmetro e à escolha da tipologia mais adequada com base em um único indicador (definido por meio do método multicritério de tomada de decisão). Além disso, são descritas as limitações encontradas e sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão de literatura

Neste capítulo é apresentada a revisão de literatura, que aborda estratégias passivas para a cobertura de edificações, desempenho termoenergético de edificações, conforto térmico dos usuários em edificações, avaliação do ciclo de vida energético, análise do custo do ciclo de vida e tomada de decisão com múltiplos critérios. Visou-se estabelecer um contexto sobre as coberturas verdes e frias, e sobre parâmetros de avaliação dessas estratégias no âmbito da construção sustentável.

2.1. Tipologias de cobertura para edificações

Nesta seção são elucidadas as definições, os componentes e os fatores que afetam o desempenho térmico das coberturas verdes e frias. Também são apresentadas pesquisas sobre a influência destas coberturas na demanda de energia de resfriamento e aquecimento em edificações e nos efeitos das ilhas de calor em diferentes localizações.

2.1.1. Cobertura verde

As coberturas verdes têm atraído a atenção mundial devido aos benefícios multidisciplinares, fornecidos por uma estrutura composta por algumas ou várias camadas. De acordo com Bliss, Neufeld e Ries (2009) e Vila *et al.* (2012), as camadas básicas de uma cobertura verde são: a) camada impermeabilizante, que tem a função de impedir que a umidade penetre na edificação; b) camada anti-raiz, uma membrana que impede a penetração das raízes nas camadas subjacentes; c) drenagem, que deve permitir o escoamento do excesso da água e pode também permitir o armazenamento de água; d) filtragem, que tem a função de evitar que os sedimentos sejam infiltrados na camada de drenagem e obstruam o fluxo da água; e) substrato, uma camada geralmente composta por um solo sintético, leve e poroso, com os nutrientes necessários para o crescimento da vegetação e f) vegetação, conforme a Figura 1. Entretanto, outras camadas podem ser adicionadas conforme a necessidade ou função, como retenção de água e isolamento.

Essas coberturas são comumente classificadas em extensivas e intensivas. Coberturas verdes extensivas são caracterizadas por uma camada de substrato mais fina (cerca de 6 a 25 cm) e vegetação rasteira, com consequente baixo custo de operação e manutenção, em contraste com os tipos intensivos que exigem maior profundidade de substrato (geralmente maior que 15 cm) e plantas e árvores de maior porte. Existe ainda uma terceira classificação, as coberturas verdes semi-intensivas. Estas são vegetadas com gramados e plantas e necessitam de

manutenção, no entanto, não na mesma intensidade de manutenção das coberturas verdes intensivas (FLL, 2018). Recentemente, também foram propostas coberturas verdes modulares (Korol; Shushunova, 2016).

Figura 1 - Camadas básicas de uma cobertura verde



A implementação de coberturas verdes auxilia na mitigação dos efeitos da urbanização. A alta densidade de edificações resulta na diminuição de áreas verdes, contribuindo com o aumento da temperatura das regiões urbanas (ilhas de calor) (Santamouris; Synnefa; Karlessi, 2011) e modifica o ciclo hidrológico, resultando em aumento do escoamento superficial, dos volumes e vazões de pico na rede de drenagem (Bevilacqua, 2021). As coberturas verdes têm potencial de reduzir os volumes de escoamento superficial (Yao *et al.*, 2020), melhorar a gestão de água pluvial (Carpenter *et al.*, 2016), mitigar os efeitos das ilhas de calor (Gagliano *et al.*, 2015) e promover significativa economia de energia (Bevilacqua, 2021). Além disso, apresenta outros benefícios como melhoria da qualidade do ar (Yao *et al.*, 2020), manutenção da biodiversidade (Domínguez *et al.*, 2020), além da redução do estresse térmico, aumentando a durabilidade da membrana (Teemusk; Mander, 2009).

Do ponto de vista térmico, os benefícios que podem ser obtidos com a utilização de coberturas verdes associam-se principalmente a processos físicos. O sombreamento proporcionado pela vegetação e a evapotranspiração (vegetação e substrato) desempenham papel fundamental, contribuindo para a redução do ganho de calor. A evapotranspiração transforma parte do calor que incide sobre a superfície em calor latente e libera para o ambiente

externo. Outro fator consiste na massa térmica, proporcionada principalmente pelo substrato, que faz com que a estrutura absorva significativa quantidade de calor e retarde a transferência de calor do exterior para o interior, diminuindo as variações diárias da temperatura. O melhor isolamento reduz a perda de calor no período de inverno (Parizotto; Lamberts, 2011; Bevilacqua, 2021).

Estudos indicam que, além das condições ambientais, diversas características de projeto afetam o desempenho térmico de coberturas verdes. Valores elevados de índice de área foliar (IAF), por exemplo, aumentam a taxa de evapotranspiração e sombreamento, auxiliando na redução de ganho solar no verão. Por outro lado, podem aumentar a demanda de aquecimento conforme o contexto climático (Vera *et al.*, 2017; Scolaro; Ghisi, 2021). O IAF é um índice que representa a área de cobertura das folhas com relação a área de substrato e depende da espécie vegetal. Normalmente está na faixa de 0,5 a 5,0 (Sailor, 2008).

Considerando a influência dos parâmetros da cobertura verde no seu desempenho térmico e energético, a Tabela 1 apresenta valores reportados na literatura para os principais parâmetros da camada de vegetação.

Tabela 1 - Parâmetros da vegetação de coberturas verdes reportados na literatura

Tipo de vegetação	Altura (m)	Índice de área foliar	Resistência estomática mínima (s/m)	Referência
Sedum, corte curto	0,10	0,8	300	Ascione <i>et al.</i> (2016)
Sedum, corte alto	0,30	3,0	300	
Gramma	0,18	2,0	80	
Gramínea, corte curto	0,10	2,5	120	
Gramínea, corte alto	0,40	5,0	120	
Extensiva	0,20	2,0	180	Costanzo, Evola e Marletta (2016)
Extensiva	0,10	5,0	180	Gagliano <i>et al.</i> (2016)
Extensiva	0,30	0,1 – 5,0	300	Vera <i>et al.</i> (2017)
<i>Helichrysum Orientale L.</i>	0,15	3,5	125	Ziougou <i>et al.</i> , (2017)
<i>Sedum sediforme</i>	0,25	1,75	300	
<i>Sedum</i>	0,10	3,0	120*	Cascone <i>et al.</i> (2018)
Salvia	0,35	5,5	380*	
<i>Sedum lineare</i>	0,18	2,3	100	Shi <i>et al.</i> (2019)
<i>Halimione Portulacoides</i>	0,30	3,8	-	Cirincione, Marvuglia e Scaccianoce (2021)

* Valor expresso em $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

O substrato é outro parâmetro relevante. De acordo com a revisão de literatura conduzida por Castleton *et al.* (2010), quanto maior a espessura do substrato, maior a redução do ganho/perda de calor para dentro/fora do edifício. No verão, o aumento da espessura do substrato resulta em maior capacidade de retenção de água e aumento da evapotranspiração, diminuindo significativamente a demanda de energia de resfriamento. No inverno, apesar dos maiores níveis de evapotranspiração, o aumento da espessura do substrato garante melhor isolamento térmico (Silva; Gomes; Silva, 2016). Entretanto, aumentar muito a profundidade pode resultar em economias pouco expressivas e em maior custo inicial (Zeng *et al.*, 2017). Outras características do substrato, como a densidade e o teor de umidade também podem afetar o desempenho térmico das coberturas verdes. Substratos menos densos, com mais bolhas de ar, são melhores isolantes. Substratos úmidos apresentam maior capacidade de retirar calor de uma edificação, devido ao maior efeito da evapotranspiração. A condutividade do solo também aumenta com o teor de umidade, ou seja, solos secos oferecem melhor isolamento térmico.

A irrigação da cobertura também afeta o consumo de energia, reduzindo a energia de resfriamento no verão (Vera *et al.*, 2015; Scolari; Ghisi, 2021). Entretanto, pode aumentar consideravelmente o custo com manutenção, especialmente em climas em que a precipitação é escassa (Ascione *et al.*, 2013). De acordo com Jamei *et al.* (2021), sistemas de irrigação são necessários para climas quentes-áridos, mas não são essenciais em climas úmidos e temperados. A influência da irrigação na evapotranspiração e, conseqüentemente na redução da temperatura do telhado, é maior em climas secos. Em regiões com taxas de precipitação mais altas, a irrigação exerce menor influência (Scolari; Ghisi; Silva, 2024).

Além disso, um elemento chave que influencia o desempenho das coberturas verdes é o nível de isolamento do edifício. Uma cobertura verde instalada em edifícios de baixo isolamento é consideravelmente mais eficaz na redução do consumo de energia do edifício (Castleton *et al.*, 2010; Bevilacqua, 2021). Entretanto, de acordo com Vera *et al.* (2017), apesar de reduzirem efetivamente as cargas de resfriamento, coberturas verdes sem isolamento podem não ser capazes de substituir o isolamento térmico em climas dominados por aquecimento.

2.1.1.1. Energia de resfriamento e aquecimento

Apesar de existirem vários estudos que investigaram o desempenho térmico das coberturas verdes na literatura, analisando a influência do clima e das características de projeto, poucos apresentam em termos quantitativos o quanto de energia pode ser efetivamente economizada

com a implantação de coberturas verdes (Bevilacqua, 2021). Para avaliar a necessidade de energia de resfriamento e aquecimento (parcela significativa do consumo de energia de um edifício), as temperaturas confortáveis termicamente devem ser determinadas. Em grande parte dos estudos, essas temperaturas são similares: em torno de 21°C no inverno e 26°C no verão (Castleton *et al.*, 2010).

A economia de energia para aquecimento e resfriamento com a utilização de coberturas verdes apresenta grande variação conforme a localidade do estudo e a configuração da cobertura, e é usualmente obtida por meio do programa EnergyPlus. Santamouris *et al.* (2007) analisaram o potencial de economia de energia em uma creche de dois andares na Grécia. Os autores investigaram a eficiência das coberturas verdes experimentalmente e em seguida criaram um modelo térmico usando o programa de simulação TRNSYS. Verificou-se que a redução na energia de resfriamento variou entre 6 e 49% para todo o edifício e entre 12 e 87% para o último andar. A influência da cobertura verde na energia de aquecimento foi considerada insignificante. Ferrante *et al.* (2016) analisaram o efeito da vegetação no desempenho energético de um escritório localizado em Palermo (Itália) por meio do uso do programa DesignBuilder, interface do EnergyPlus. A presença da cobertura verde proporcionou economia anual de energia de cerca de 23% em comparação com a cobertura não vegetada, principalmente devido à redução da energia de resfriamento.

Em um estudo de caso realizado em Lisboa (Portugal), Silva, Gomes e Silva (2016) monitoraram experimentalmente o comportamento térmico de uma cobertura verde em e utilizaram os resultados para calibrar uma simulação no EnergyPlus. Os autores verificaram que a implantação de uma cobertura verde intensiva apresentou demanda anual de energia entre 60 e 70% menor comparada com uma cobertura convencional escura, enquanto a cobertura semi-intensiva reduziu o consumo de energia entre 45 e 60%. O uso de cobertura verde extensiva sem camada de isolamento resultou em consumo 20% menor, desempenho similar ao de uma cobertura fria. Os efeitos de uma cobertura verde intensiva instalada em um edifício de escritórios localizado em Atenas (Grécia) foi investigada por meio do EnergyPlus no estudo de Karachaliou, Santamouris e Pangalou (2016). A cobertura verde reduziu a energia de resfriamento em 19,1% e a energia de aquecimento em 11,4%.

Gagliano *et al.* (2016) investigaram cenários de *retrofit* para uma casa térrea localizada em Catania (Itália) por meio de simulações conduzidas no Design Builder. Cinco cenários de *retrofit* foram propostos: cobertura verde extensiva sem isolamento térmico, cobertura existente

com isolamento térmico de 4 cm e 8 cm, cobertura verde com isolamento de 4 cm e 8 cm. Os resultados mostraram que para o mesmo nível de isolamento a cobertura verde apresentou melhor desempenho (menor demanda de aquecimento e resfriamento). O aumento na espessura do isolamento de 4 para 8 cm não provocou reduções significativas no fluxo de calor através da cobertura.

Vera *et al.* (2017) avaliaram a influência do isolamento térmico em coberturas verdes no desempenho térmico de uma loja de varejo, considerando os climas de Albuquerque (EUA), Santiago (Chile) e Melbourne (Austrália). Em todas as condições climáticas, o uso de isolamento nas coberturas reduziu a carga térmica anual de aquecimento. Por outro lado, o isolamento aumentou a carga térmica anual de resfriamento, ressaltando que coberturas verdes podem ser uma alternativa importante em climas em que predominam as cargas de resfriamento.

2.1.1.2. Ilhas de calor urbano

O efeito das ilhas de calor está relacionado com as maiores temperaturas nos centros urbanos em comparação com as áreas rurais. O fenômeno ocorre principalmente devido à alta densidade de edificações urbanas e à falta de áreas verdes. Os materiais utilizados na envoltória dos edifícios absorvem a radiação solar e infravermelha e dissipam parte do calor acumulado por meio de processos convectivos e radioativos para a atmosfera. Assim, devido à grande concentração de edificações em áreas urbanas e às características geométricas do meio urbano, observa-se aumento da temperatura do ambiente (Santamouris; Synnefa; Karlessi, 2011). As coberturas verdes são consideradas uma das estratégias para mitigar os efeitos das ilhas de calor devido à redução na temperatura do ar e das superfícies nos níveis do dossel e do telhado. Além disso, reduzem significativamente a energia de resfriamento necessária aos edifícios, o que é crucial no superaquecimento das áreas urbanas (Jamei *et al.*, 2021).

Um estudo realizado em Singapura reportou que a temperatura da superfície de uma cobertura pode ser reduzida em 30°C depois da implantação de uma cobertura verde no edifício (Wong *et al.*, 2003). Heidarinejad e Esmaili (2015) reportaram que uma cobertura verde apresentou 77% de redução na transmissão do fluxo de calor e 13 K de redução na temperatura do ar a um metro acima do telhado comparada com uma cobertura convencional de concreto. Karachaliou, Santamouris e Pangalou (2016) mostraram que a temperatura da superfície da cobertura verde pode ser até 15 K mais baixa do que a de uma cobertura convencional. Jamei *et al.* (2021) analisaram 89 estudos em uma revisão de literatura sobre o papel das coberturas

verdes na mitigação das ilhas de calor em três tipos de clima (quente-úmido, temperado e seco). O trabalho confirmou o efeito de resfriamento das coberturas verdes e sua contribuição para a redução da intensidade da ilha de calor, independentemente da condição climática. As coberturas verdes contribuíram para redução da temperatura da superfície em 24,8°C em média em climas quentes-úmidos, média de 17,4°C em zonas de clima temperado e de 8,5°C em zonas de clima seco.

Gagliano *et al.* (2016) avaliaram os efeitos de diferentes cenários de *retrofit* da cobertura de uma casa térrea em Catania (Itália) no microclima local. Os cenários de cobertura convencional existente e cobertura verde – ambas com e sem isolamento e considerando ou não ventilação natural – foram avaliados por meio da variável temperatura da superfície externa, que foi utilizada como um indicador da contribuição da envoltória da edificação ao fenômeno das ilhas de calor. Em dias típicos de verão, maiores valores de temperatura da superfície externa foram observados nas coberturas convencionais (valor de pico de aproximadamente 53°C), enquanto as coberturas verdes apresentaram temperaturas menores (valor de pico de aproximadamente 34°C). A utilização de isolamento aumentou a temperatura da superfície externa nas coberturas convencionais, entretanto, não influenciou os valores de temperatura em coberturas verdes. Segundo os autores, isso ocorreu, pois as coberturas convencionais apresentam maior coeficiente de absorção solar em comparação com coberturas verdes – que se beneficiam do sombreamento e do maior coeficiente de refletividade da vegetação. Dessa forma, coberturas convencionais estão sujeitas a maiores fluxos de calor entrando no telhado. Além disso, como já mencionado, o aumento da resistência térmica nestas coberturas dificulta a transferência de calor para o interior da edificação, aumentando a temperatura na superfície externa. Os autores verificaram ainda que a ventilação natural não influenciou a temperatura da superfície externa das coberturas.

Verificou-se que a maioria dos estudos avaliou a mitigação dos efeitos das ilhas de calor por meio da temperatura da superfície da cobertura verde, da temperatura do ar próximo à cobertura ou do fluxo de calor através da cobertura.

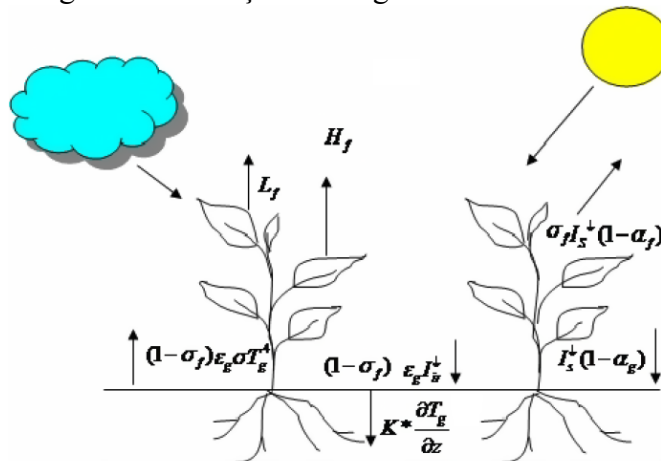
2.1.1.3. Cobertura verde no EnergyPlus

A maioria dos estudos numéricos utiliza o EnergyPlus (ou interface DesignBuilder) para simulações de coberturas verdes. Isto ocorre pois o EnergyPlus implementa um modelo específico que inclui as equações de balanço energético das camadas de vegetação e solo

permitindo acoplar a transferência de calor da cobertura verde com a do edifício (Bevilacqua, 2021).

O modelo de cobertura verde implementado no EnergyPlus foi desenvolvido por Sailor (2008) e permite ao usuário inserir “*ecorooft*” como a camada externa de uma cobertura. Por meio da classe de objetos *Material:RoofVegetation* é possível especificar diversos parâmetros como espessura do substrato, propriedades térmicas, densidade do dossel da vegetação, altura da vegetação, condutância estomática e condições de umidade do solo (incluindo irrigação e precipitação). As camadas de drenagem e membranas de proteção não são consideradas dentro do módulo de cobertura verde, devendo ser modeladas separadamente (Sailor, 2008). O balanço de energia de uma cobertura verde é dominado pela radiação solar, equilibrada pelo fluxo de calor sensível (convecção) e latente (evaporativo) do substrato e da vegetação, combinado com a condução de calor no substrato (Figura 2).

Figura 2 - Balanço de energia da cobertura verde



Fonte: U.S. Department of Energy (2021)

O balanço de energia, dividido entre a vegetação (Ff) e a superfície do solo (Fg), é complexo e é reduzido à solução simultânea das Equações 1 e 2, envolvendo as temperaturas da vegetação e da superfície do solo. Na vegetação, o fluxo de calor sensível entre a superfície foliar e o ar próximo ao dossel é influenciado pela diferença de temperatura entre eles, velocidade do vento e índice de área foliar (IAF). O fluxo de calor latente depende de fatores como intensidade da luz, teor de umidade do solo e diferença de pressão de vapor entre o interior da folha e a atmosfera externa. Na camada de substrato, considera-se que o fluxo de calor sensível entre a superfície do solo e o ar em sua vizinhança depende da diferença de temperatura

entre eles e da velocidade do vento dentro do dossel. O fluxo de calor latente, depende da diferença entre a proporção de mistura da superfície do solo e do ar e a velocidade do vento dentro do dossel (Sailor, 2008).

$$F_f = \sigma_f [I_s(1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir} - \varepsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad (1)$$

$$F_g = (1 - \sigma_f) [I_s(1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir} - \varepsilon_g \sigma T_g^4] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + k \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (2)$$

Onde:

F_f é o fluxo de calor na superfície da vegetação (W/m²);

σ_f é a fração de cobertura vegetal;

I_s é a radiação total recebida por ondas curtas (W/m²);

α_f é a refletância solar do dossel;

ε_f é a emitância do dossel;

I_{ir} é a radiação total recebida por ondas longas (W/m²);

σ é a constante de Stefan-Boltzmann (5,67x10⁻⁸ W/m².K⁴);

T_f é a temperatura da vegetação (K);

ε_g é a emitância da superfície do substrato;

ε_1 é dado por $\varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_f \varepsilon_g$;

T_g é a temperatura da superfície do substrato (K);

H_f é o fluxo de calor sensível na vegetação (W/m²);

L_f é o fluxo de calor latente na vegetação (W/m²);

F_g é o fluxo de calor na superfície do substrato (W/m²);

α_g é a refletância solar da superfície do substrato;

H_g é o fluxo de calor sensível no substrato (W/m²);

L_g é o fluxo de calor latente no substrato (W/m²);

k é a condutividade térmica do solo seco (W/m.K);

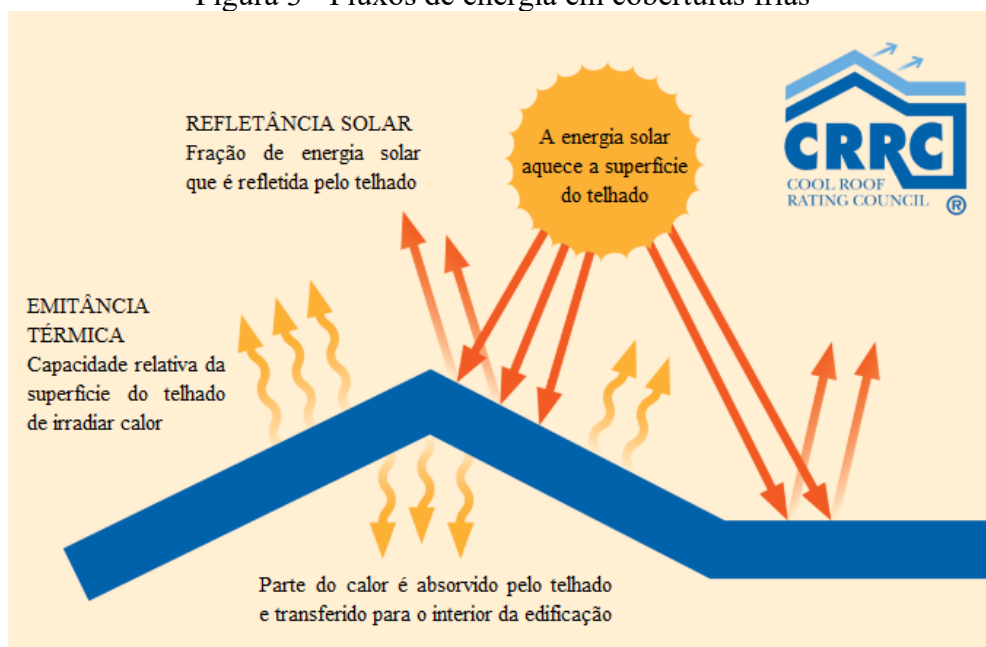
z é a altura ou profundidade (m).

2.1.2. Cobertura fria

Revestimentos frios absorvem menos calor e permanecem mais frios em comparação com um revestimento convencional. Usualmente aplicados em coberturas ou pavimentos, são

caracterizados pela alta refletância solar e alta emitância infravermelha. A refletância solar é a capacidade de uma superfície refletir a radiação solar e a emitância infravermelha é a capacidade de re-irradiar o calor anteriormente absorvido em comparação com um corpo negro em mesma temperatura. Ambas as propriedades são geralmente medidas em escala de 0 a 1 ou 0 a 100%. Portanto, quando um revestimento frio é aplicado sobre a envoltória de um edifício, é capaz de refletir a radiação solar e emitir calor, reduzindo sua temperatura superficial e resultando em menor entrada de calor na edificação e menor superaquecimento do ar (Pisello, 2017). A Figura 3 descreve o fluxo de energia radiante sob forma de calor entre o sol, a superfície da cobertura fria, o interior do edifício e o entorno.

Figura 3 - Fluxos de energia em coberturas frias

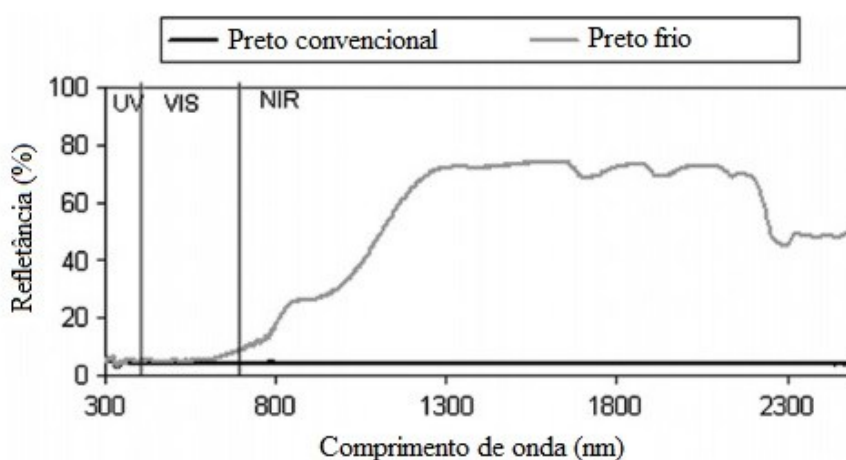


Fonte: Adaptado de CRRC (2022)

Os revestimentos frios de melhor desempenho geralmente apresentam refletância solar em torno de 0,80 ou mais e são caracterizados por valores de emitância térmica em torno de 0,80 a 0,90. Podem ser membranas, revestimentos, pinturas, coberturas metálicas e telhas (Pisello, 2017). Os produtos líquidos típicos incluem tintas brancas, revestimentos elastoméricos, de poliuretano ou acrílico, ou seja, EPDM (etileno-propileno terpolímero), PVC (cloro de polivinila), CPE (polietileno clorado), CPSE (polietileno clorossulfonado) e TPO (poliolefina termoplástica) (Santamouris; Synnefa; Karlessi, 2011).

Os revestimentos frios são geralmente brancos e não metálicos. Entretanto, existem também revestimentos frios de cor escura. Superfícies escuras absorvem energia na parte visível do espectro solar para apresentar tal cor e podem refletir ou absorver energia na parte do infravermelho próximo. Ao refletir no infravermelho próximo (revestimento preto frio), uma superfície escura apresenta refletância solar total maior em comparação com outra superfície escura que absorve nessa parcela do espectro (revestimento preto convencional), conforme a Figura 4 (Santamouris; Synnefa; Karlessi, 2011).

Figura 4 - Refletância espectral de um revestimento preto convencional e um preto frio



Fonte: Adaptado de Santamouris, Synnefa e Karlessi (2011)

Na escala da edificação, a utilização de coberturas frias reduz as cargas de resfriamento das edificações, melhora o conforto interno, aumenta a vida útil da estrutura do telhado (menor tensão térmica), diminui as emissões de CO₂ na atmosfera devido à menor necessidade de climatização, especialmente durante o verão. Por outro lado, podem aumentar a energia necessária ao aquecimento no inverno (Synnefa; Saliari; Santamouris, 2012). Em escala urbana, as coberturas frias ajudam a mitigar os efeitos das ilhas de calor, refletindo a maior parte da energia solar incidente de volta e, portanto, minimizam o calor absorvido e liberado pelas superfícies irradiadas do ambiente construído (Rossi *et al.*, 2016).

As coberturas frias constituem uma técnica barata para reduzir os requisitos de energia para resfriamento de edifícios, e geralmente podem ser facilmente aplicadas sobre telhados existentes. A intensidade da economia de energia com a utilização de coberturas frias varia conforme as características e uso específico do edifício, condições ambientais locais, tipo de sistemas de climatização instalados, etc. (Pisello, 2017). Além disso, o envelhecimento natural

das coberturas expostas ao ambiente pode resultar em significativa redução da refletância solar, chegando a reduzir em 36% a refletância de telhas de fibrocimento pintadas de branco após exposição de três anos (Shirakawa *et al.*, 2022). Em um estudo experimental, Pereira (2014) verificou que amostras de cobertura fria pintadas com tinta de cor branca tiveram sua refletância reduzida em até 15% quando expostas às intempéries por doze meses. A autora verificou também que por meio de limpeza periódica (lavagem mensal com água) é possível manter a refletância próxima do valor original.

Outro parâmetro importante que afeta o desempenho de coberturas frias é o nível de isolamento térmico da cobertura, representado em alguns casos pela transmitância térmica. É evidente que a temperatura da superfície da cobertura muda quando a refletância é alterada. Entretanto, se o valor da transmitância é muito pequeno (cobertura bem isolada) o calor transferido entre a superfície da cobertura e o interior da edificação é pequeno. Nesse caso, o impacto do aumento da refletância na economia de energia não é tão importante (Synnefa; Santamouris; Akbari, 2007).

2.1.2.1. Energia de resfriamento e aquecimento

Como mencionado anteriormente, as coberturas frias são soluções eficazes para o resfriamento passivo de edifícios, entretanto, o desempenho é fortemente influenciado pela localidade de estudo e pelas características da cobertura. Synnefa, Saliari e Santamouris (2012) monitoraram uma edificação escolar em Atenas (Grécia) antes e depois da aplicação de um revestimento elastomérico branco com refletância solar de 0,89 na cobertura do edifício. O monitoramento foi complementado pela simulação da edificação no software TRNSYS. Os resultados mostraram que a temperatura do ar nas salas de aula diminuiu até 2,8°C e a carga anual de resfriamento reduziu em 40%. A penalidade de aquecimento foi de 10%. Zingre *et al.* (2015) propuseram um modelo de transferência de calor em coberturas frias para avaliar o impacto da aplicação de um revestimento frio de cor branca em uma cobertura plana dupla no desempenho termoenergético de edificações residenciais no clima tropical de Singapura. Os resultados mostraram redução de 0,21 kWh/m² (51%) no ganho de calor diário, reduzindo a temperatura máxima do ar interno em 2,4°C em um dia ensolarado.

A revisão de literatura conduzida por Hernández-Pérez *et al.* (2014) mostrou que as coberturas frias podem diminuir o consumo diário de energia de resfriamento entre 1% e 80%, dependendo do clima, isolamento térmico, ganhos internos e condições da cobertura. No

entanto, essas coberturas podem representar desvantagem no inverno, uma vez que refletem a energia solar durante todo o ano, o que pode aumentar a energia necessária para o aquecimento. Apesar disso, a literatura indica que esse aumento é menos importante que a economia de energia de resfriamento proporcionada no verão. Isso se explica pelo fato de que durante o inverno, o sol está muito mais baixo no céu do que no verão e a radiação solar chega a uma superfície horizontal menos intensa. Há maior probabilidade de céu nublado e menos disponibilidade solar. Assim, menos energia chega a uma superfície para ser absorvida ou refletida no mesmo período de tempo que durante o verão. Anualmente, as coberturas frias podem proporcionar economia de energia entre 1 e 20% (considerando a penalidade de aquecimento).

Piselli *et al.* (2019) investigaram a influência da refletância solar e da espessura do isolamento térmico (poliestireno expandido) de coberturas frias em edificações de escritórios sob diferentes condições climáticas, por meio do EnergyPlus. Uma cobertura convencional foi utilizada como referência. Os resultados multidimensionais (que combinam as configurações de refletância e isolamento) mostraram que a refletância solar ótima foi a máxima considerada (0,8) em quase todos os climas avaliados, com exceção dos climas mais frios, onde predomina o aquecimento. Com relação ao isolamento, a espessura máxima considerada (0,25 m) reduziu o consumo de energia com ar-condicionado em regiões mais frias. No entanto, em localidades de clima temperado e ameno, espessuras de até 0,03 m otimizaram o desempenho energético. Em localidades de clima quente, espessuras entre 0,09 e 0,11 m se mostraram adequadas para reduzir o ganho de calor. Os autores também realizaram variações na espessura do isolamento para o cenário de cobertura convencional (refletância solar de 0,3). A configuração ótima foi aquela com 0,25 m de espessura em todos os climas considerados. O efeito da variação da espessura do isolamento (0,00 a 0,25 m) foi mais percebido em climas mais extremos, quentes ou frios.

A partir dos estudos revisados, verificou-se que as análises termoenergéticas devem simular as condições climáticas durante todo o ano, visto que as necessidades energéticas de resfriamento podem ser contrabalanceadas pelas necessidades energéticas de aquecimento. Além disso, outra questão importante é a adoção da camada de isolamento, que pode ser utilizada tanto em climas frios, quanto em climas quentes. Porém, para a utilização ou não desta camada, bem como para a definição de sua espessura, deve ser considerado o contexto climático.

2.1.2.2. Ilhas de calor urbano

Com relação ao desempenho das coberturas frias frente a mitigação das ilhas de calor, apesar de as coberturas representarem quase 25% das áreas impermeáveis na maioria das cidades, a maioria dos trabalhos existentes avalia o impacto do aumento da refletância local combinando as coberturas frias com outras estratégias de mitigação das ilhas de calor urbanas, como pavimentos frios (Pisello, 2017).

Entre os trabalhos que avaliaram isoladamente o efeito de mitigação das ilhas de calor com a implantação de coberturas frias, o estudo de Li e Norford (2016) mostrou que a temperatura do ar próximo à superfície pode ser reduzida em até cerca de 1,8°C às 13:00 (hora local). No entanto, a cobertura fria reduz a temperatura do ar próximo à superfície durante a noite em cerca de apenas 0,2 a 0,3°C, o que é considerado insignificante. Roman *et al.* (2016) mostraram que o fluxo de calor sensível da superfície da cobertura para o ambiente circundante reduz de valores próximos a 400 a cerca de 50 W/m² às 12:00 (hora local) com o aumento da refletância solar de 0,3 para 0,86.

Vahmani *et al.* (2016) quantificaram o potencial das coberturas frias de mitigar o efeito das ilhas de calor urbano em áreas metropolitanas do Sul da Califórnia (EUA) por meio de modelagem numérica. Simulações foram realizadas comparando o cenário atual das cidades com um cenário em que coberturas frias fossem adotadas por todas as edificações. Os autores assumiram valores de refletância de 0,85 para coberturas frias industriais e comerciais (planas) e 0,40 para coberturas frias residenciais (telhas não brancas). Os resultados mostraram que a implantação dessas coberturas reduziria em média 0,9°C a temperatura do ar durante o dia nas áreas metropolitanas do sul da Califórnia durante o mês de julho. As edificações residenciais contribuíram com 67% da redução de temperatura (0,6°C). Apesar da menor refletância considerada para essa tipologia de edificação, as residências encontram-se mais espalhadas, ocupando maior área em comparação com indústrias e comércios e, portanto, contribuem mais com o resfriamento da cidade.

Observou-se que, assim como os estudos sobre coberturas verdes, os estudos sobre coberturas frias avaliaram o efeito de mitigação das ilhas de calor por meio de variáveis como temperatura e fluxo de calor. Além disso, verificou-se a importância de investigar a influência da implantação de coberturas frias em edificações residenciais.

2.1.3. Comparações entre coberturas verdes e frias em diferentes climas

Nesta seção, são apresentados estudos que compararam o desempenho de coberturas verdes e frias na redução da energia com climatização de ar e na mitigação das ilhas de calor em diferentes contextos climáticos. Buscou-se verificar as abordagens utilizadas, os parâmetros adotados e as conclusões encontradas.

2.1.3.1. Energia de resfriamento e aquecimento

Sailor *et al.* (2012) realizaram simulações em duas tipologias de edificações e quatro cidades dos Estados Unidos para analisar o consumo de energia utilizando uma cobertura escura, outra fria e coberturas verdes. O estudo mostrou que em todos os casos, a cobertura verde resultou em maior consumo de eletricidade para resfriamento em comparação com a cobertura fria, mas menor consumo de gás para aquecimento. Assim, a localidade desempenha influência relevante: para edifícios de alojamento em Nova York e Portland, a cobertura verde é preferível em termos de economia de energia sobre a cobertura fria, mas em todos os outros casos, a cobertura fria resulta em menor consumo de energia.

O desempenho térmico e a influência da adição de uma camada de isolamento em coberturas frias e verdes foi investigada no estudo de Gagliano *et al.* (2015). O DesignBuilder foi utilizado para realizar as simulações para casa de férias térrea localizada ao longo da zona costeira do Mediterrâneo. Os resultados mostraram que para mesmos níveis de isolamento, as coberturas verdes apresentaram menor necessidade de energia de aquecimento e resfriamento em comparação às coberturas frias e convencionais. A adição de uma camada de isolamento de 0,04 m em coberturas verdes reduziu em 21% a energia necessária para aquecimento. Reduções menos significativas foram obtidas dobrando a espessura da camada de isolamento (0,08 m). No verão, o desempenho das coberturas verdes foi praticamente insensível à mudança na espessura da camada de isolamento. O efeito de redução da energia de resfriamento foi atribuído ao sombreamento e à evapotranspiração da vegetação e à redução da transmitância térmica fornecida pelo substrato. Com relação às coberturas frias, a adição de uma camada de isolamento de 0,04 m em coberturas frias provocou reduções de 34 e 62% na energia necessária para aquecimento e resfriamento, respectivamente. Entretanto, uma camada de isolamento mais espessa (0,08 m) causou reduções menos significativas. Apesar da redução das necessidades energéticas, um isolamento térmico excessivo pode prejudicar o desempenho relacionado aos efeitos das ilhas de calor (devido ao aumento da temperatura da superfície externa), aumentar

o estresse térmico (devido ao aumento da diferença entre a temperatura da superfície externa e interna) e contribuir com o esgotamento de recursos (devido ao aumento do consumo de material).

Silva, Gomes e Silva (2016) avaliaram o desempenho de um ambiente localizado no último andar de uma edificação com cobertura verde, fria e convencional escura em Lisboa (Portugal), com e sem isolamento térmico (poliestireno extrudado). Os resultados do estudo mostraram que o uso de isolamento térmico em todas as tipologias de cobertura diminuiu a energia necessária para aquecimento. A energia necessária para resfriamento também diminuiu com a utilização de isolamento térmico, com exceção do caso com cobertura verde intensiva. Segundo os autores, coberturas bem isoladas não aproveitam ao máximo os efeitos de resfriamento da evapotranspiração e podem dificultar a perda de calor durante a noite em dias quentes.

Com relação aos aspectos climáticos, observou-se que diferenças nos perfis de temperatura afetam o desempenho térmico de coberturas frias e verdes, e que os níveis de precipitação afetam o desempenho de coberturas verdes. Além disso, as características das coberturas devem ser avaliadas conjuntamente com os aspectos climáticos. Ambos os tipos de cobertura podem ter seu desempenho afetado pela espessura da camada de isolamento. Assim, primeiramente deve ser investigada qual a melhor configuração de cada cobertura (verde e fria) em determinada localidade, para na sequência analisar qual estratégia passiva é a melhor solução.

2.1.3.2. Ilhas de calor urbano

Tanto as coberturas verdes, quanto as frias são capazes de mitigar os efeitos das ilhas de calor diminuindo o fluxo de calor sensível, porém, por meio de mecanismos diferentes. As coberturas verdes reduzem o fluxo de calor sensível por meio do sombreamento e do aumento do fluxo de calor latente via evapotranspiração. As coberturas frias, por sua vez, refletem a radiação solar incidente devido à refletância mais alta e, consequentemente, reduzem o fluxo de calor sensível como resultado da menor radiação líquida (Imran *et al.*, 2018).

Kolokotsa, Santamouris e Zerefos (2013) analisaram o potencial de mitigação das ilhas de calor urbano de coberturas verdes e frias. O impacto da massa térmica, do nível de isolamento térmico e da refletância solar foi avaliado no desempenho das coberturas frias; enquanto o efeito da irrigação e do IAF da vegetação foi investigado no desempenho das

coberturas verdes. Para isso, uma edificação de escritórios foi modelada no EnergyPlus, considerando o clima de diferentes cidades europeias (Creta, Roma e Londres). Por meio da variável de saída fluxo de calor sensível liberado, os autores verificaram que os principais parâmetros que afetam o desempenho das coberturas frias e verdes são a refletância e o IAF, respectivamente. Considerando a quantidade integrada de calor sensível liberado durante todo o verão, verificou-se que, em comparação com coberturas convencionais (refletância de 0,3), a máxima redução proporcionada pelas coberturas frias foi 178 kWh/m² e pelas coberturas verdes, 147 kWh/m².

Dentre outros aspectos, Gagliano *et al.* (2015) investigaram o papel de coberturas frias, verdes e convencionais, com e sem isolamento, na mitigação das ilhas de calor por meio da temperatura de pico da superfície externa. A avaliação foi realizada com base em perfis horários das temperaturas da superfície das coberturas durante três dias de verão em uma residência na zona costeira do Mediterrâneo. Com relação às coberturas sem isolamento, as coberturas convencional e fria apresentaram maiores valores de temperatura de pico da superfície externa, 49°C e 43°C, respectivamente, em comparação com o valor de 34°C da cobertura verde. Com a adição de uma camada de isolamento de 0,04 m, o valor da temperatura de pico da superfície externa aumentou entre 3 e 5°C para as coberturas convencional e fria devido ao aumento da resistência térmica da cobertura, que dificulta a transferência de calor. Ao contrário, a cobertura verde manteve o mesmo comportamento térmico no cenário com e sem isolamento.

Costanzo, Evola e Marletta (2016) investigaram a temperatura da superfície externa das coberturas (verdes e frias) e o fluxo de calor trocado entre coberturas e o ambiente externo, a fim de verificar o potencial de redução da intensidade das ilhas de calor urbano em uma edificação de escritório existente, considerando o clima de três cidades italianas (Catania, Roma e Milão). Os resultados mostraram que utilizar cobertura fria com refletância de 0,8 foi a solução mais eficaz para diminuir a temperatura da cobertura, reduzindo a temperatura de pico em até 25°C em comparação com a cobertura existente na cidade de Catania. Por outro lado, a cobertura fria com refletância de 0,65 apresentou resultados semelhantes aos de uma cobertura verde. Quanto ao fluxo global de calor sensível trocado pela cobertura com o ar exterior durante todo o verão, verificou-se que a cobertura verde sem irrigação foi capaz de reduzir o fluxo em até cerca de 55% e a com irrigação em até aproximadamente 80%, conforme a cidade. Considerando cobertura fria com refletância solar de 0,65, o potencial de redução foi maior que

75% para todas as cidades avaliadas; com refletância de 0,80, os resultados são negativos (ou seja, o fluxo de calor convectivo ocorre do ar externo para a cobertura).

A partir dos resultados encontrados na literatura, verificou-se que características como isolamento térmico da cobertura afetam tanto a necessidade de energia para climatização, quanto o efeito de mitigação das ilhas de calor. Porém, não necessariamente da mesma forma. Por exemplo, a implantação de uma cobertura com isolamento térmico pode reduzir a demanda de energia para climatização em comparação com a mesma cobertura sem isolamento, entretanto, pode proporcionar menor contribuição com a mitigação dos efeitos das ilhas de calor. Dessa forma, ressalta-se a necessidade de uma avaliação ampla das coberturas considerando as condições climáticas de localidades específicas.

2.2. Desempenho termoenergético de edificações considerando os padrões de uso

Um dos principais desafios para melhorar a eficiência energética das edificações é a redução do consumo de energia para sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC) (Castleton *et al.*, 2010; Coma *et al.*, 2020). A fim de reduzir o consumo de energia, as simulações computacionais têm sido amplamente utilizadas para estimativa e otimização do desempenho de edifícios, por meio de programas como EnergyPlus, TRNSYS e DOE-2.

A envoltória da edificação desempenha papel significativo no consumo de energia pelos edifícios, visto que é a interface entre as condições do ambiente externo e interno (Besir; Cuce, 2018). Nesse contexto, estratégias passivas, como as coberturas verdes e as coberturas frias, têm sido avaliadas por meio de simulação computacional em diferentes contextos climáticos e consideradas promissoras para melhoria do desempenho termoenergético dos edifícios, conforme abordado na seção 2.1. No entanto, muitas vezes são observadas grandes discrepâncias entre o consumo de energia estimado por meio de simulações e o consumo real de energia medido nas edificações. Uma das principais razões é o comportamento dos ocupantes, cuja caracterização é frequentemente negligenciada ou subestimada em modelos de simulação (Happle; Fonseca; Schlueter, 2018). O comportamento do ocupante inclui a presença do usuário, movimento e interação com os dispositivos e sistemas de energia do edifício (Yan *et al.*, 2017).

De acordo com Happle, Fonseca e Schlueter (2018), as principais técnicas de modelagem do comportamento dos ocupantes usadas para simular o desempenho de edifícios são os modelos determinísticos e os modelos estocásticos. Os modelos determinísticos incluem

cronogramas (*schedules*) e conjuntos de regras determinísticas. Diferentes configurações de cronogramas podem ser estabelecidas para cada hora, incluindo de presença de ocupantes, uso de iluminação, uso de eletrodomésticos, etc. Esses cronogramas são geralmente baseados em dados monitorados e/ou obtidos a partir de métodos de engenharia. As regras determinísticas assumem ligações causais entre certos direcionadores e uma ação. Um exemplo é a abertura das janelas pelos ocupantes quando a temperatura do ar interno ultrapassa determinado limite. Os modelos determinísticos resultam em comportamento repetível e previsível sem qualquer variação. Os modelos estocásticos normalmente fazem amostragem de distribuições estatísticas para estimar a probabilidade de certas ações ocorrerem, considerando as correlações entre o comportamento observado e os estímulos ambientais ou a ocorrência de eventos específicos, por exemplo, a chegada de um ocupante no ambiente ou a hora do relógio. Suas matrizes de probabilidade são comumente derivadas de dados de pesquisa. Os modelos estocásticos consideram que os ocupantes não repetem estritamente seu comportamento no dia a dia, pois seu comportamento é influenciado por vários fatores.

Geralmente *schedules* determinísticas são incorporadas em programas de simulação de desempenho de edificações. A principal vantagem de utilizar comportamentos determinísticos é sua facilidade de uso e interpretação. No entanto, a principal desvantagem é a periodicidade constante e a deficiência em representar a diversidade de comportamento (Hong *et al.*, 2017).

Com relação a esse tópico, estudos têm considerado os padrões de uso combinados com diferentes sistemas passivos de economia de energia para avaliar o desempenho térmico de edificações de forma mais realista. No estudo de Meester *et al.* (2013) diferentes níveis de isolamento foram analisados considerando o impacto do estilo de vida dos ocupantes com base no tamanho da família, gerenciamento do sistema de aquecimento e gerenciamento da área aquecida. O programa computacional TAS foi utilizado para simular o consumo de energia de aquecimento em uma residência na Bélgica. Os resultados mostraram que quanto maior o nível de isolamento da edificação, maior a influência proporcional do estilo de vida dos ocupantes no consumo de energia de aquecimento.

Pisello, Piselli e Cotana (2015) avaliaram o desempenho de coberturas frias em uma residência na cidade de Perugia (Itália) variando as ações dos ocupantes. Comportamentos humanos (passivos e ativos) considerados significativos para o consumo de energia das edificações foram selecionados. Foram considerados como comportamentos passivos: controle

de ventilação natural (abertura de janelas), ganhos internos devido à utilização de iluminação e de instalações elétricas, controle de sistemas de sombreamento de janelas (venezianas e persianas) e abertura de porta entre dois andares. As atitudes ativas incluíram: ajuste de temperatura, uso do sistema de refrigeração, número de ambientes refrigerados e uso de ventilação mecânica. As análises se deram por meio de simulações dinâmicas realizadas no EnergyPlus e calibradas por meio de monitoramento de temperatura. Os resultados foram comparados em termos de índice de desvio térmico (thermal deviation index, TDI), para comportamentos passivos, e demanda de energia primária para resfriamento, para comportamentos ativos. O TDI consiste em uma quantificação da distância das condições monitoradas (ou simuladas) e do alvo térmico interno (faixas térmicas expressas em termos de temperatura operacional interna). Com relação às ações passivas, os resultados mostraram que as diferentes configurações de controle da ventilação natural produziram a maior variação na percepção da temperatura interna. A ventilação natural diurna prejudicou o desempenho térmico da cobertura fria, enquanto a ventilação natural noturna produziu efeito positivo. A implementação da cobertura fria reduziu o TDI de 0,87 para 0,54. Se os ocupantes forem capazes de implementar programas eficazes de ventilação natural, o TDI diminui para 0,29. Quanto às ações ativas, o controle de temperatura por parte dos usuários produziu a maior variação na demanda de energia primária, tornando o efeito da cobertura fria menos significativo com o aumento do ponto de ajuste (*setpoint*) de temperatura. A cobertura fria reduziu a necessidade de refrigeração do ático no mês mais quente de 782 kWh para 398 kWh. Se a disponibilidade de adaptação dos ocupantes no ajuste das configurações de temperatura for considerada em combinação com o efeito da cobertura fria, a necessidade de energia para resfriamento torna-se inferior a 100 kWh. O estudo mostrou que é necessário avaliar a combinação entre as intervenções físicas e humanas a fim de realizar estimativas confiáveis de demanda de energia.

Além dos efeitos sobre o microclima local, Gagliano *et al.* (2016) compararam diferentes cenários de *retrofit* para uma casa térrea localizada em Catania (Itália) por meio de simulações conduzidas no Design Builder. A contribuição da ventilação natural (entre 00h e 06h) para reduzir o consumo de eletricidade e o tempo de operação de resfriamento necessário para manter o conforto térmico foi avaliada em três cenários: cobertura existente com isolamento térmico de 8 cm, cobertura verde com isolamento térmico de 4 e 8 cm. Os resultados mostraram que a ventilação noturna resultou em redução de eletricidade de 11% no cenário de

cobertura existente com isolamento térmico de 8 cm e 7% nos cenários de cobertura verde com 4 e 8 cm.

Piselli *et al.* (2017) investigaram os efeitos da presença e da intensidade de ganhos de calor internos, dentre outras variáveis, na identificação da refletância solar ótima de uma cobertura fria por meio de simulações no EnergyPlus. Os autores consideraram como refletância solar ótima aquela que reduziu ao máximo a energia anual necessária para climatização (kWh). O impacto dos ganhos de calor internos foi avaliado removendo os ganhos de calor devido aos equipamentos e eletrodomésticos e mantendo apenas a *schedule* de ocupação de cada tipo específico de edificação avaliada (prédio de escritórios de médio porte, prédio de apartamentos de porte médio e residência unifamiliar). Os resultados mostraram que a consideração de ganhos de calor internos em climas frios afeta principalmente o consumo de energia em edifícios de apartamentos ou escritórios – que possuem maiores cargas internas – reduzindo a energia de climatização anual. Nessas regiões, para os edifícios de escritório, o consumo energético anual foi cerca de 100.000 kWh (refletância ótima de 0,8) sem considerar ganhos de calor internos e cerca de 50.000 kWh (refletância ótima de 0,1) considerando ganhos de calor internos. Para edifícios de apartamento, o consumo energético anual variou de aproximadamente 55.000 kWh (refletância ótima de 0,1) a valores menores que 40.000 kWh (refletância ótima de 0,7) para os cenários sem e com ganhos de calor internos, respectivamente. Segundo os autores, a inversão nos valores de refletância ótima encontrados para escritórios e apartamentos com e sem ganhos de calor internos deve-se ao fato de que em escritórios, a grande necessidade energética para aquecimento anula os benefícios decorrentes dos ganhos de calor através da cobertura com a instalação de um revestimento de alta absorção solar. Portanto, a redução da necessidade de energia para resfriamento ao utilizar uma cobertura fria torna-se significativa no balanço energético anual final. Por outro lado, em apartamentos, os ganhos de calor através da superfície da cobertura tornam-se relevantes devido à menor quantidade de ganhos de calor interno. Em climas quentes, o consumo de energia com climatização diminui removendo as cargas internas. No entanto, a diferença entre os cenários com e sem cargas internas é muito menor.

Outros estudos se concentraram em avaliar a influência de ações específicas do comportamento dos ocupantes no desempenho termoenergético de edificações. Para edifícios ventilados naturalmente, têm sido utilizados indicadores de desempenho térmico como horas de conforto térmico e graus-hora de resfriamento e aquecimento. Para edifícios condicionados

artificialmente (eletricidade ou gás natural) ou modelados como híbridos (combinação de ventilação natural e sistema de ar-condicionado), variáveis como energia consumida para resfriamento e aquecimento, percentual de horas em que a temperatura interna encontra-se dentro da faixa de conforto térmico têm sido empregadas para analisar o desempenho térmico (Silva; Ghisi, 2014; Marshall *et al.*, 2016; Sorgato; Melo; Lamberts, 2016; Balvedi *et al.*, 2018; Laskari *et al.*, 2022).

A eficiência de diferentes estratégias passivas implementadas na envoltória dos edifícios para economizar energia é significativamente afetada pelo padrão de uso. Por exemplo, verificou-se que o controle da ventilação natural é um dos parâmetros que mais pode influenciar a percepção da temperatura e o consumo de energia com climatização. Conforme as estratégias implementadas e a localidade da edificação, pode ser viável a utilização de um sistema de ventilação natural controlada por temperatura. Outro exemplo relaciona-se com o isolamento térmico, que pode ser recomendado para climas quentes e frios, porém, deve considerar os padrões de uso da edificação para obtenção de desempenho térmico adequado. Em alguns casos, o isolamento pode reduzir as necessidades de energia no inverno, porém, produzir superaquecimento no verão (D’Orazio; Di Perna; Di Giuseppe, 2010). Além disso, a consideração dos ganhos internos, conforme a tipologia da edificação pode ser determinante para a definição da configuração ideal da cobertura. Assim, este trabalho buscou avaliar a influência do controle da ventilação natural no desempenho termoenergético de um edifício residencial com a utilização de sistemas de cobertura verde e cobertura fria.

2.3. Conforto térmico em edificações

A implementação de estratégias passivas na envoltória dos edifícios, como coberturas verdes e frias, não somente contribui com o desempenho térmico de edificações, como também pode melhorar a qualidade do ambiente interno. Além disso, o conforto térmico nos ambientes internos também pode ser afetado pelos padrões de uso da edificação.

A influência da refletância solar de coberturas frias no conforto térmico dos usuários em edificações residenciais em 27 diferentes cidades foi estimada por Synnefa, Santamouris e Akbari (2007). A variável utilizada foi o número de horas de desconforto (horas em que a temperatura interna excedeu os limites de 27°C e 29°C). O aumento da refletância solar reduziu as horas de desconforto para ambos os limites de temperatura e a redução variou conforme a condição climática. Os resultados mostraram que o conforto térmico foi melhorado, diminuindo

as horas de desconforto entre 5 e 97% para cobertura fria com refletância de 0,6 e entre 9 e 100% para refletância de 0,85. As máximas temperaturas em edifícios não condicionados diminuíram entre 0,8 e 2°C para refletância e 0,6 e entre 1,2 e 3,3°C para refletância de 0,85, conforme a cidade. Essas reduções foram mais significativas para edificações sem ou com pouco isolamento.

O estudo de Gagliano *et al.* (2015), já citado anteriormente, avaliou também a influência de coberturas convencionais, frias e verdes, com e sem isolamento, no conforto térmico interno de um quarto de referência de uma casa localizada na costa do Mediterrâneo. O Índice de Desconforto Térmico (*intensity of thermal discomfort*, ITD) foi utilizado para medir o conforto térmico. O ITD é definido pela integral, em certo período de tempo, da diferença positiva entre a temperatura operativa e o valor limite de 26°C necessária para obter condições confortáveis internamente. De acordo com os resultados do estudo, a cobertura verde sem isolamento apresentou o melhor desempenho, com valores de temperatura operativa entre 25°C e 26,5°C e valor de ITD próximo a 10°C.h. A adição de uma camada de isolamento reduziu a temperatura operativa nos cenários com cobertura convencional e fria. Considerando a adição de uma camada de 0,08 m de isolamento, o ITD da cobertura convencional diminuiu de 489,2°C.h para 119,8°C.h e o da cobertura fria, de 339,6°C.h para 86,2°C.h.

Gagliano *et al.* (2016), também já mencionados neste trabalho, utilizaram a temperatura operativa como métrica para avaliar o conforto térmico interno para diferentes cenários de cobertura (convencional e verde, com e sem isolamento, e considerando ou não ventilação natural noturna). As análises se deram durante o mês de agosto, que corresponde ao verão na cidade de Catania (Itália). Os resultados mostraram que com exceção da cobertura convencional sem isolamento, todos os cenários de cobertura atingiram o conceito de conforto térmico adaptativo para o caso em estudo, visto que apresentaram valores de temperatura operativa dentro do intervalo da Categoria I definida pela ISO EN 15251 (ISO, 2007) para edifícios naturalmente ventilados. A Categoria I abrange uma faixa de quatro graus e corresponde a um alto nível de expectativa (90% de aceitabilidade). O cenário de cobertura convencional sem isolamento apresentou as maiores variações diárias de temperatura operativa (4,5°C). A adição de uma camada de isolamento uniformizou o perfil diário da temperatura operativa, e esse efeito foi mais pronunciado no caso da cobertura convencional. A consideração de ventilação natural noturna, tanto nos cenários de cobertura convencional,

quanto verde, reduziu de forma significativa os valores mínimos de temperatura operativa, aumentando a amplitude das variações e podendo causar moderado desconforto.

Sorgato, Melo e Lamberts (2016) avaliaram, dentre outros aspectos, o conforto térmico dos usuários em ambientes naturalmente ventilados de uma residência unifamiliar localizada em Florianópolis, Santa Catarina, por meio do programa EnergyPlus. Quatro combinações de envoltória da edificação e três diferentes cenários de comportamento do usuário com relação ao controle de ventilação natural foram modelados: ventilação da manhã à noite, controle de ventilação automatizado e ventilação noturna. A variável utilizada para avaliação do conforto térmico foi o número/percentual de horas de conforto térmico. Neste estudo, assumiu-se que os usuários da edificação aceitariam as condições adaptativas de conforto térmico da *Standard 55* (ASHRAE, 2020). Os autores verificaram que os cenários com ventilação de manhã à noite resultaram nos menores números de horas de conforto térmico e aumentaram o consumo de energia com ar-condicionado. Os cenários com ventilação automatizada resultaram nos maiores números de horas de conforto térmico.

O conforto térmico dos usuários em um edifício de escritórios de seis andares em Xiamen (China) foi investigado por Guo *et al.* (2020). Foram variados os parâmetros: refletância da cobertura, taxa de mudança de ar da ventilação noturna, espessura do isolamento da cobertura e nível de massa térmica interna. O percentual fora do intervalo (*percentage outside range*, POR) foi selecionado como um indicador de conforto térmico. Este indicador acumula o percentual de horas ocupadas em tempo de operação sem condicionamento de ar quando o nível de conforto térmico simulado excede a faixa de conforto especificada nas normas. Os resultados mostraram que a refletância da cobertura teve o impacto mais significativo no percentual fora do intervalo, seguido da espessura do isolamento da cobertura e do nível de massa térmica interna. O aumento da refletância aumentou o percentual fora do intervalo, apesar de diminuir o consumo de energia de resfriamento. Segundo os autores, isso ocorreu, pois a cobertura com alta refletância reduz os ganhos de calor solar e a temperatura do ar interno, reduzindo assim o consumo de energia em dias quentes e aumentando o tempo de desconforto interno em dias frios. A ventilação noturna não exerceu influência no percentual fora do intervalo. O potencial de resfriamento da ventilação noturna é restrito aos dias em que há demanda de resfriamento. Nestes dias, a temperatura ambiente noturna é relativamente alta em Xiamen.

Cirrincione, Marvuglia e Scaccianoce (2021) avaliaram o impacto da instalação de coberturas verdes em edifícios no conforto térmico interno. As simulações foram realizadas para dois ambientes urbanos europeus: Esch-sur-Alzette, Luxemburgo (clima temperado oceânico) e Palermo, Itália (clima subtropical Mediterrâneo). O nível de conforto interno foi medido por meio do voto médio predito (*predicted mean vote*, PMV). Valores de voto médio predito em torno de zero indicam sensação térmica neutra, enquanto valores negativos e positivos indicam desconforto devido à sensação de frio e calor, respectivamente. Em comparação com uma cobertura convencional, a cobertura verde reduziu os valores absolutos mensais do voto médio predito, principalmente no verão. Apesar dos efeitos positivos da cobertura verde, nos meses de transição (abril para Esch-sur-Alzette e novembro para Palermo), a cobertura convencional apresentou desempenho ligeiramente melhor. Este efeito provavelmente ocorreu devido à inércia térmica adicionada pela presença da cobertura verde, o que pode retardar a sua resposta às mudanças nas condições climáticas que ocorrem nestes períodos de transição. Além do voto médio predito, outro parâmetro utilizado para avaliação dos níveis de conforto interior foi a temperatura do teto. Os resultados mostraram que com a presença da cobertura verde, a temperatura do teto foi mantida mais alta no inverno e mais baixa no verão, em comparação com a cobertura convencional.

Observou-se que a avaliação do conforto térmico é comumente realizada com base no número ou no percentual de horas em que a temperatura ambiente se mantém dentro ou fora de um intervalo previamente estabelecido como confortável. Os estudos revisados mostraram que a cobertura verde pode melhorar o conforto térmico dos usuários em comparação com coberturas convencionais e frias. No entanto, essa conclusão não pode ser extrapolada para qualquer condição climática. Quanto às coberturas frias, verificou-se que o aumento da refletância solar, apesar de reduzir a energia necessária para resfriamento, nem sempre aumenta as horas de conforto térmico, pois pode causar desconforto em dias frios. Além disso, observou-se que a consideração da ventilação natural durante o dia ou a noite pode reduzir as horas de conforto térmico. Uma opção pode ser a ventilação natural controlada por temperatura.

2.4. Avaliação do ciclo de vida energético

A avaliação do ciclo de vida energético (ACVE) é uma abordagem baseada na avaliação do ciclo de vida (ACV) tradicional, que segue a normatização internacional ISO 14040 (ISO, 2006a) e ISO 14044 (ISO, 2006b). A ACV permite identificar oportunidades de melhoria

ambiental de produtos durante seu ciclo de vida e auxilia os tomadores de decisão sobre os impactos de um projeto (Coma; Pérez; Cabeza, 2018). A ACV é conduzida em quatro fases: (1) definição de objetivo e escopo, em que são definidas as condições de contorno, unidade funcional e limitações; (2) análise de inventário do ciclo de vida, em que é realizada a coleta de dados de todos os processos, materiais e fluxos de energia, ou seja, entradas e saídas; (3) avaliação do impacto do ciclo de vida, buscando evidenciar a significância dos impactos e associação com categorias específicas de impacto ambiental; e (4) interpretação, em que são reportados os resultados e recomendações aos tomadores de decisão. No Brasil, as normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) seguem os mesmos princípios das versões internacionais.

Os limites dos sistemas de uma ACV podem ser definidos como: (a) berço ao portão (*cradle to gate*), que compreende as etapas de extração, transporte e fabricação de matérias-primas; (b) do berço ao túmulo (*cradle to grave*), que inclui as etapas mencionadas anteriormente, mais transporte até a edificação, instalação, uso, manutenção, reforma, demolição e disposição final e (c) berço ao berço (*cradle to cradle*), que além das etapas anteriores, inclui a reutilização, recuperação ou reciclagem.

Ao contrário da ACV tradicional que compreende uma análise abrangente de impactos ambientais, incluindo energia, uso de recursos não renováveis, emissões diversas para o solo, água e ar, a ACVE é uma ferramenta simplificada que prioriza os insumos energéticos. No setor das edificações, a ACVE permite comparar o consumo de energia de diferentes edifícios ou demonstrar os benefícios de estratégias de projeto utilizadas para otimizar desempenho energético, considerando o consumo de energia durante todo o ciclo de vida (fases de fabricação, uso e fim de vida). Uma das vantagens da análise de energia do ciclo de vida é que as fases com alto consumo de energia são identificadas. Portanto, o processo pode ser melhorado reduzindo o consumo de energia para essas fases. Consequentemente, as emissões de gases de efeito estufa também serão reduzidas (Ramesh; Prakash; Shukla, 2010; Karimpour *et al.*, 2014). A energia considerada no ciclo de vida energético é usualmente dividida em: energia embutida (EE), energia operacional (EO) e energia de desconstrução (ED).

A energia embutida, também chamada de energia incorporada, compreende a energia necessária para construir uma edificação: fabricação dos materiais de construção (consumo direto), extração da matéria prima, transporte da matéria prima para a fábrica, transporte do material de construção ao canteiro de obras e energia consumida na fase de construção da

edificação (consumo indireto). A energia embutida total consiste na soma da energia embutida inicial (materiais utilizados na fase de construção) com a energia embutida recorrente ou de manutenção (materiais utilizado nas etapas de reforma e manutenção, durante a fase operacional) (Tavares, 2006; Sartori; Hestnes, 2007). Para o cálculo da energia embutida, as pesquisas sobre ACVE em edificações utilizam bases de dados nacionais ou internacionais, conforme disponibilidade.

A energia operacional corresponde à energia gasta com equipamentos de cocção, iluminação, entretenimento, climatização, etc. Esse tipo de energia pode ser considerado por meio de dados de consumo médio, conforme a tipologia e a localização da edificação (Tavares, 2006; Silva, 2012; Paulsen; Spoto, 2013; Sartori.; Calmon, 2019), simulações (Herrera, 2013; Invidiata; Lavagna; Ghisi, 2018; Triana; Lamberts; Sassi, 2021), modelos numéricos (Dominguez-Delgado; Domínguez-Torres; Domínguez-Torres, 2020) ou equações simplificadas (Carpenter; Zhou, 2013).

A energia de desconstrução é a energia consumida para descarte, deposição ou reciclagem dos materiais. Nesta fase consideram-se todos os consumos de energia diretos necessários à demolição e desmontagem da edificação e também o transporte dos resíduos dos materiais da construção para destinação final (Ramesh; Prakash; Shukla, 2010). De acordo com os estudos de caso apresentados por Sartori e Hestnes (2007), a somatória da energia consumida durante as fases de construção, demolição e transporte de materiais representa cerca de 1% da energia consumida em todo o ciclo de vida. Por esta razão, alguns estudos não consideram essas fases na ACVE.

Em estudos de ACVE, a unidade funcional geralmente apresenta-se sob a forma de demanda de energia ao longo de toda a vida útil do edifício (GJ ou kWh) ou demanda de energia com referência à área e em base anual (GJ/m²/ano ou kWh/m²/ano). Alguns trabalhos comparam o gasto energético nas diferentes fases do ciclo de vida, apresentando os resultados em percentual.

2.4.1. Avaliação do ciclo de vida energético em edificações

Inúmeros estudos avaliam o desempenho de estratégias passivas com o objetivo de reduzir o consumo energético das edificações. No entanto, muitas vezes menor demanda de energia operacional é alcançada pelo uso de maior quantidade de materiais, aumentando a energia embutida do edifício (Cabeza *et al.*, 2014). O artigo de revisão de Sartori e Hestnes (2007)

analisou 60 estudos de caso sobre ACVE de edificações residenciais e não residenciais. Nas edificações de baixo consumo de energia, a participação da energia embutida no total variou entre 9 e 46%. Nas edificações convencionais, a participação variou entre 2 e 38%. Os autores também verificaram a existência de uma relação linear entre o consumo de energia operacional e o total de energia consumida. Ou seja, apesar das diferenças entre os casos individuais – materiais e técnicas construtivas, tamanho e tipo da edificação e clima – a tendência geral foi uniforme devido ao papel dominante da energia operacional. Ramesh, Prakash e Shukla (2010) realizaram uma revisão de literatura com base em 73 estudos de caso de ACVE de edifícios, incluindo residências e escritórios. Os resultados mostraram que a energia embutida (10 a 20%) e a operacional (80 a 90%) representam quase que a totalidade da demanda energética ao longo do ciclo de vida das edificações, enquanto a demolição e outras fases representam parcela insignificante. A mesma relação linear entre a energia operacional e a energia consumida em todo o ciclo de vida foi observada.

Karimpour *et al.* (2014) demonstraram que existe uma relação entre a relevância da energia embutida relativa à energia total e as condições climáticas. Em localidades de climas extremos (maior quantidade de aquecimento e resfriamento), a razão entre energia embutida/energia total do ciclo de vida é menor em comparação com localidades de climas mais amenos. Os autores verificaram que em regiões de clima frio, por exemplo, a energia operacional representa entre 80 e 90% da energia consumida no ciclo de vida, enquanto a energia incorporada responde por cerca de 10 a 20%. Em regiões de clima mais ameno, a energia operacional é menor e, conseqüentemente, a proporção de energia embutida é mais relevante (aproximadamente 25%), reforçando a importância da energia embutida nessas localidades. Estudos recentes, como o de Dascalaki *et al.* (2021), mostram que a energia embutida inicial e recorrente dos materiais de construção ao longo da vida útil de edifícios residenciais pode atingir até cerca de 30% da energia consumida.

Alla *et al.* (2020) avaliaram o impacto do isolamento da envoltória de edificações residenciais na economia de energia em dez cidades italianas, por meio do *payback* energético. O cálculo do *payback* foi baseado na comparação entre a energia operacional economizada e a energia embutida dos materiais selecionados para o isolamento. Os resultados apresentaram significativa dependência da zona climática. Em cidades do norte da Itália, o *payback* energético foi de cerca de 3 anos, em comparação com 84 anos em cidades localizadas no sul.

À medida que as edificações buscam reduzir a energia operacional, que representa percentual mais expressivo da energia consumida ao longo do ciclo de vida, a energia embutida ganha mais importância. Dessa forma, materiais de construção que necessitem de menor consumo de energia durante a manufatura tem potencial para reduzir a energia embutida dos edifícios. Reddy e Jagadish (2003), por exemplo, demonstraram que a energia embutida de edificações residenciais pode ser reduzida em até 50% utilizando materiais eficientes energeticamente.

No Brasil, alguns trabalhos de ACVE avaliaram materiais construtivos de forma isolada (Kalbusch; Ghisi, 2012), enquanto a maioria estudou edificações residenciais. Tavares (2006) desenvolveu uma metodologia de ACVE de edificações e aplicou em cinco modelos de residências brasileiras, considerando ciclo de vida de 50 anos. Os resultados mostraram que a energia embutida representa percentual significativo (29 a 49%) da energia consumida no ciclo de vida (fase pré-operacional até a pós-operacional). Silva (2012) analisou o ciclo de vida energético de sete tipologias comumente empregadas em habitações de interesse social. A fase operacional foi responsável por maior parte da energia consumida (22,65 a 28,98 GJ/m²), seguida da fase pré-operacional (2,77 a 3,42 GJ/m²), enquanto o consumo máximo de energia pós-operacional foi de 0,20 GJ/m². Carminatti Júnior (2012) também avaliou o ciclo de vida energético de habitações de interesse social. Entretanto, somente a energia embutida inicial foi considerada.

Herrera (2013) analisou o consumo energético de uma moradia social calculando a energia incorporada dos materiais de construção e o consumo energético resultante do desempenho térmico da edificação. Os resultados mostraram correlação linear positiva entre energia incorporada dos materiais e consumo energético na edificação, o que ressalta a necessidade de utilizar materiais com menor consumo de energia para sua fabricação. Paulsen e Sposto (2013) realizaram ACVE de uma residência do programa Minha Casa Minha Vida. Os resultados do estudo de caso mostraram que a energia incorporada corresponde a 30% do total de energia consumida, enquanto a energia operacional responde por 70%. Pedroso (2015) avaliou quatro sistemas de vedação em um projeto típico de habitação térrea por meio do cálculo da energia incorporada em diferentes etapas do ciclo de vida. Em todos os casos, a etapa de desconstrução representou em média 1% da energia incorporada total, enquanto a energia incorporada na fase de pré-uso variou entre 9,2 e 60,6% e na fase de uso e manutenção variou entre 37,3 e 90,5%. Os trabalhos de Invidiata, Lavagna e Ghisi (2018) e Triana, Lamberts e

Sassi (2021) propuseram metodologias de avaliação de habitações multidisciplinares que combinam indicadores ambientais, econômicos e sociais. Indicadores de energia foram considerados por ambos os estudos por meio da ACVE. Estes últimos dois trabalhos foram melhor abordados na seção 2.6.1.

O estudo de caso brasileiro realizado por Sartori e Calmon (2019) avaliou duas edificações residenciais localizadas no clima quente e úmido de Vitória, Espírito Santo. Foi analisado o consumo de energia e suas emissões de gases de efeito estufa para as etapas pré-operacional e operacional após a aplicação de diferentes estratégias: (1) substituição da cobertura existente por uma cobertura verde modular; (2) instalação de película refletiva nas esquadrias; (3) brise para sombreamento das aberturas; (4) absorvância otimizada das superfícies opacas da envoltória (paredes e teto); e (5) instalação de fachadas ventiladas. Todas as medidas de *retrofit* aumentaram a energia embutida, entretanto, geraram economia de energia operacional. Com relação à energia total consumida, para o edifício de três andares, somente a alteração na absorvância e a instalação de fachadas ventiladas reduziram a energia do ciclo de vida. Para o edifício de 17 andares, somente a cobertura verde não gerou benefícios energéticos no ciclo de vida. Esse estudo reforça que a escolha de estratégias para redução do consumo de energia no ciclo de vida demanda pesquisa extensa – tanto dos materiais escolhidos, quanto dos padrões de consumo dos usuários – e reafirma a importância do processo de tomada de decisão na escolha dos materiais.

A maioria dos estudos nacionais e internacionais reportaram que a energia operacional é a parcela mais significativa da demanda de energia ao longo do ciclo de vida das edificações, ressaltando a necessidade avaliar detalhadamente a fase operacional. Por outro lado, a energia embutida também pode representar percentual significativo da energia total e apresentar correlação com o consumo de energia nos edifícios, demonstrando a importância de investigar a energia consumida durante a fase de manufatura dos materiais, conjuntamente com a fase operacional.

2.4.2. Avaliação do ciclo de vida energético em coberturas

Apesar de diversos estudos realizarem ACVE de edificações como um todo para avaliar a eficiência de estratégias de projeto, poucos trabalhos utilizaram ACVE com foco no desempenho energético de edificações devido às diferentes tipologias de cobertura. Carpenter e Zhou (2013) conduziram uma análise para determinar a opção de *retrofit* de coberturas planas

com o menor consumo de energia durante o ciclo de vida, em uma residência em St. Louis (EUA). Os cenários incluíram uma cobertura verde e outra fria durante ciclo de 10 anos. Cada cenário foi avaliado por meio da energia incorporada de *retrofit* (fabricação e transporte dos materiais), energia operacional para aquecimento e resfriamento e energia incorporada necessária para produzir a energia operacional. A energia incorporada para um ciclo adicional de manutenção da cobertura original também foi considerada. O estudo mostrou que a cobertura verde demandou maior energia incorporada de *retrofit*, devido a maior quantidade de materiais utilizada em sua estrutura. No entanto, apresentou maior redução na energia operacional e na energia embutida necessária para a produção da energia operacional. Considerando o ciclo de 10 anos, a cobertura verde (687,0 GJ) apresentou melhor desempenho comparada com a cobertura fria (930,5 GJ) no consumo total de energia. Ambos os cenários de *retrofit* apresentaram economia de energia comparados com a cobertura original (1.110,0 GJ).

Dominguez-Delgado, Domínguez-Torres e Domínguez-Torres (2020) realizaram avaliação do ciclo de vida do desempenho energético de coberturas convencionais (absortância solar 0,8 e 0,9) localizadas em um edifício habitacional de Sevilha após *retrofit* com aplicação de uma camada de elastômero branco na superfície para se tornarem frias (absortância solar 0,1, 0,2, 0,3 e 0,4). Simulações dinâmicas foram realizadas para avaliar o efeito do envelhecimento no desempenho energético das coberturas frias durante toda a sua vida útil (20 anos). Ou seja, somente a energia operacional (aquecimento e resfriamento) foi avaliada ao longo do ciclo de vida. Foram considerados três cenários: envelhecimento sem lavagem, com lavagem decenal e quinquenal. Os resultados mostraram que houve economia de energia para todas as coberturas frias. As coberturas de referência (absortância 0,8 e 0,9) apresentaram economia de energia com o *retrofit* entre 1,018 e 1,946 GJ/m². Entretanto, as análises mostraram que a economia de energia induzida pela lavagem das coberturas frias foi irrelevante quando considerado todo o ciclo de vida. Isso ocorreu, pois os ciclos de lavagem recuperam parte da refletância reduzida devido ao envelhecimento, diminuindo a energia necessária para resfriamento. Por outro lado, a energia necessária para aquecimento aumentou. Dessa forma, os autores verificaram que ao longo de 20 anos, esses efeitos se equilibram e, por isso, a economia de energia é similar considerando ou não os ciclos de lavagem.

Tanto a energia embutida, quanto a energia operacional relacionam-se com os materiais utilizados na configuração escolhida para cada tipologia de cobertura, com as estratégias de operação e manutenção adotadas e com o clima do local de estudo. A limpeza

periódica das coberturas frias, por exemplo, pode restaurar a sua refletância original, entretanto, não necessariamente terá efeito benéfico considerando todas as etapas do ciclo de vida. Assim, a configuração ideal de cobertura verde e fria deve ser investigada em condições climáticas específicas para a devida avaliação da energia consumida no ciclo de vida, visto que a energia gasta na fase de construção pode ser contrabalanceada pela economia de energia na fase de operação.

2.5. Análise do custo do ciclo de vida

A análise do custo do ciclo de vida (ACCV) é um método para avaliar o custo total de propriedade, considerando todos os custos desde a aquisição até a disposição final de um edifício ou sistema de construção, durante certo período de tempo (Cabeza *et al.*, 2014). De acordo com a ISO 15686-5 (ISO, 2017), que apresenta os princípios básicos da metodologia e a definição de alguns termos, a ACCV pode ser realizada para apenas parte ou para todo o ciclo de vida de um projeto. Conforme o período de análise especificado, podem ser incluídos os custos de aquisição, manutenção, operação e fim de vida. Dessa forma, a técnica pode ser utilizada para tomada de decisão por meio da comparação entre projetos distintos de edificação.

Um indicador comumente utilizado para medir o custo do ciclo de vida de edificações é o valor presente líquido (VPL), em que os custos futuros são descontados no tempo para representar o valor presente, em termos monetários, de projetos de longo prazo. Essa taxa permite a conversão de custos futuros em custo atual e sua escolha pode influenciar significativamente a decisão de um investimento. A revisão de ACCV em projetos de construção residencial realizada por Islam, Jollands e Setunge (2015) mostrou que a taxa de desconto variou de 2 a 8% entre os trabalhos revisados. Alguns estudos utilizam mais de uma taxa de desconto conforme avança o período de análise, outros analisam o efeito da adoção de diferentes taxas de desconto no custo do ciclo de vida. Outra forma de analisar os custos em um período longo é a criação de diferentes cenários, como diferentes tarifas futuras de energia, se o custo da energia for considerado (Marszal *et al.*, 2012). Diferentes indicadores como o *payback* descontado e a taxa interna de retorno (TIR) também são utilizados para medir o custo do ciclo de vida.

2.5.1. Análise do custo do ciclo de vida em edificações

A ACCV permite analisar uma edificação considerando todos os custos ao longo da vida útil do empreendimento, ao invés de somente os custos de aquisição. Essa abordagem é fundamental, visto que um argumento frequentemente utilizado para apoiar a construção dos chamados “edifícios verdes” é o menor custo operacional, embora o custo inicial de construção possa ser mais elevado. Weerasinghe, Ramachandra e Rotimi (2021), por exemplo, compararam o custo do ciclo de vida de edifícios industriais verdes com edifícios industriais convencionais similares em Sri Lanka. O VPL foi utilizado para medir o custo do ciclo de vida considerando os custos de construção, operação, manutenção e fim de vida. A taxa de desconto considerada foi 4,26% e o período de análise foi 50 anos. Os resultados mostraram que, embora o custo de construção inicial de um edifício industrial verde ter sido 29% maior, os custos de operação e manutenção de resultaram em economias de 23% e 15%, respectivamente (economia geral de 17%).

De acordo com o estudo de Dwaikat e Ali (2018), que avaliou o custo do ciclo de vida de um edifício de escritórios verde, o custo com energia equivale à cerca de 48% do custo total do ciclo de vida do edifício e à 60% dos custos de operação. Neste estudo de caso, foram considerados apenas os custos de utilidade como custos operacionais do edifício (contas de consumo de energia e água, além das taxas anuais de esgoto). O período de análise adotado foi 60 anos. Os autores destacaram que reduzir o consumo de energia é fundamental para reduzir o custo total do ciclo de vida do edifício. Esse estudo demonstra a importância da ACCV na fase de projeto das edificações. Por meio da adoção de soluções mais eficientes energeticamente, pode-se reduzir o custo na fase de operação. Entretanto, os custos com a aquisição dessas soluções também devem ser considerados.

Mithraratne e Vale (2004) desenvolveram uma pesquisa comparativa sobre o custo e a energia do ciclo de vida variando a tipologia construtiva de uma residência na Nova Zelândia. Observou-se que tanto o custo inicial de construção, quanto o custo do ciclo de vida foram mais altos em edificações com maior energia embutida – que poderiam proporcionar maior conforto e benefícios adicionais à saúde. Na análise, os autores consideraram os custos necessários para manter os diferentes tipos de construção em condições habitáveis. Por outro lado, no estudo de Bansal, Singh e Sawhney (2014), que avaliou a energia embutida e o custo de construção de residências de até quatro andares na Índia, encontrou-se que o custo de construção não necessariamente será mínimo com a utilização de materiais com menor energia incorporada.

O custo e a energia associados ao transporte de material para o canteiro de obras não foram considerados neste estudo devido à dificuldade de rastrear a origem autêntica e o meio de transporte de materiais no local.

A escolha de estratégias de projeto mais eficientes é complexa e deve levar em consideração tanto o custo de aquisição, quanto o custo com energia operacional – que pode representar cerca de metade do custo do ciclo de vida.

2.5.2. Análise do custo do ciclo de vida em coberturas

A ACCV também tem sido utilizada para avaliar e comparar a viabilidade econômica de diferentes tipologias de cobertura ao longo da vida útil. No caso específico das coberturas verdes, a revisão de literatura de Scolaro e Ghisi (2022) identificou que tanto o custo do ciclo de vida, quanto o custo-benefício do ciclo de vida são metodologias utilizadas para avaliar a viabilidade econômica de coberturas. A análise do custo do ciclo de vida aborda os custos totais ao longo do ciclo de vida. A análise de custo-benefício do ciclo de vida combina a abordagem do custo do ciclo de vida com a análise de custo-benefício, que compara os fluxos de caixa positivos e negativos. No entanto, a revisão destaca que tanto os custos, quanto os benefícios considerados variam entre os estudos.

Mahmoud *et al.* (2017) realizaram uma avaliação econômica de três configurações de coberturas verdes (com diferentes áreas de cobertura e orientações do telhado) em uma residência na Arábia Saudita, ao longo do ciclo de vida de 40 anos. A métrica utilizada foi o VPL. Foram considerados os custos de instalação, operação e manutenção e os benefícios de economia de energia, longevidade, melhoria da qualidade do ar, criação de habitat e mitigação das ilhas de calor. Os resultados mostraram que as coberturas verdes apresentaram VPL positivo apenas a partir do 20º ano. Perto do 40º ano, somente a cobertura verde que cobre toda a área de telhado apresentou VPL significativo, o que significa que os benefícios seriam completamente atingidos somente no final da vida útil. Os autores concluíram que as coberturas verdes não são viáveis economicamente devido as baixas taxas de eletricidade na Arábia Saudita no ano da pesquisa. Em um cenário em que os subsídios de eletricidade fossem removidos, as coberturas verdes apresentariam maior potencial de implementação.

Ziogou *et al.* (2017) avaliaram o ciclo de vida econômico de coberturas verdes em edifícios com e sem isolamento em quatro cidades do Chipre, durante vida útil de 20 anos. Foi realizada uma análise do custo-benefício social por meio do VPL, considerando custos de

construção, manutenção e operação e custos ambientais (eletricidade, emissões de CO₂, NO_x e SO₂). Os resultados mostraram que apesar das contribuições ambientais positivas das coberturas verdes, o VPL se manteve negativo e muito maior comparado ao VPL dos edifícios com cobertura convencional, principalmente devido aos altos custos iniciais de construção. Os autores ressaltaram que diversos benefícios ambientais das coberturas são difíceis de quantificar e não foram considerados na análise econômica, como manutenção do ecossistema, estética, redução da poluição sonora, gestão do escoamento de água da chuva, etc.

Ulubeyli e Arslan (2017) compararam a viabilidade econômica de coberturas verdes extensivas com coberturas de madeira (comuns na Turquia) considerando os custos com materiais e manutenção das coberturas e os benefícios das coberturas verdes. A vida útil utilizada na análise foi 40 anos. Os resultados mostraram que os custos iniciais e de manutenção de uma cobertura verde são muito superiores aos de uma cobertura de madeira. No entanto, a cobertura verde foi a opção mais viável financeiramente a longo prazo, devido aos seus benefícios. Por meio de análise de sensibilidade, verificou-se que dos quatorze custos/benefícios considerados para a cobertura verde, somente a economia de energia teve efeito significativo nos resultados.

Kim *et al.* (2018) calcularam o custo do ciclo de vida de uma cobertura verde e de uma cobertura convencional durante vida útil de 40 anos. Foram considerados os custos de construção, manutenção e disposição na Coreia e o custo-benefício da colheita de batatas da fazenda de cobertura. As mudanças nos custos ao longo do tempo foram corrigidas usando taxa de desconto de 1,12%. Em comparação com a cobertura convencional, a cobertura verde apresentou custo 38,9% menor.

Saafi e Daouas (2018) realizaram uma ACCV com o objetivo de determinar a melhor combinação entre refletividade da cobertura e espessura do isolamento na Tunísia. Três refletâncias foram avaliadas: (1) caso referência com refletância 0,2; (2) caso restaurado com refletância inicial 0,89 restaurada por lavagem no início do verão (no inverno, considerou-se refletância de 0,71); e (3) caso envelhecido com refletância 0,67. Duas configurações de coberturas com isolamento e três tipos de materiais isolantes foram considerados. A análise foi desenvolvida para período de 20 anos e incluiu os custos de energia, dos materiais de isolamento, da cobertura fria e de manutenção (lavagem). O caso que apresentou maior economia ao longo do ciclo de vida foi o caso referência com 8,8 cm de lã de vidro como material de isolamento (73,39 TND/m²) e o período de retorno foi de 2,66 anos. No entanto, o

caso restaurado com 5,4 cm de lã de rocha apresentou economia muito próxima do caso referência (73,03 TND/m²), com período de retorno de 3,6 anos. Apesar de não ser a solução mais econômica, o caso restaurado pode ser interessante se considerados os benefícios ambientais de mitigação das ilhas de calor.

Sproul *et al.* (2014) realizaram uma análise do custo do ciclo de vida de 50 anos de coberturas pretas, frias e verdes, nos EUA. Os autores consideraram a vida útil das coberturas verdes como 40 anos (em comparação com vinte anos para coberturas pretas e frias). Foi considerada a instalação da cobertura, substituição e manutenção, benefícios relacionados à energia, emissões evitadas, compensação de CO₂.eq pelo resfriamento global e benefícios relacionados às águas pluviais. Os resultados mostraram que as coberturas frias tiveram economia líquida de \$ 25/m² e as coberturas verdes apresentaram valor negativo de \$ 71/m², em comparação com as coberturas pretas. Ressalta-se que devido ao período de análise adotado (50 anos), após a substituição da cobertura verde, foram considerados os benefícios de apenas 1/4 de sua vida útil. Por outro lado, após a segunda substituição das coberturas pretas e frias, foram considerados os benefícios de metade da sua vida útil.

Shi *et al.* (2019) realizaram ACCV de um edifício de escritórios que sofreu *retrofit* com a adição de uma cobertura fria ou uma cobertura verde de bandeja (bandejas de substrato e vegetação colocadas em cima da camada de proteção impermeabilizante e conectadas a drenos). O estudo considerou o clima de cinco cidades chinesas. Foram considerados os custos com instalação, substituição e manutenção, economia com energia de aquecimento e resfriamento, valor da redução de emissão de CO₂ e benefícios relacionados com a gestão do escoamento de água superficial. A cobertura fria apresentou economia líquida positiva em regiões de inverno quente (5,7 a 35,1 CNY/m²). A cobertura verde apresentou valores negativos em todas as zonas climáticas (entre -81,3 e -16,7 CNY/m²). A economia líquida de ambas coberturas apresentou tendência de melhoria em cidades mais quentes.

Os resultados de viabilidade econômica de coberturas verde e frias são variáveis em níveis internacionais devido as diferenças entre os custos e as práticas regionais e as condições específicas de cada estudo de caso. Os custos com energia, por exemplo, que podem afetar de maneira significativa os custos do ciclo de vida das coberturas, dependem das tarifas e subsídios locais e do clima. As condições climáticas influenciam o desempenho termoenergético das coberturas e consequentemente, o gasto e o custo com energia. Assim, ressalta-se a necessidade de realizar estudos de ACCV em diferentes localidades.

2.6. Tomada de decisão com múltiplos critérios

Situações que envolvem a tomada de decisão com base em múltiplos critérios – muitas vezes conflitantes – são ocorrências comuns na vida cotidiana, seja no contexto pessoal, de negócios, acadêmico ou público. O processo de tomada de decisão com múltiplos critérios (*Multiple Criteria Decision Making*, MCDM) consiste em encontrar a alternativa mais atrativa considerando todos os critérios adotados (Hwang; Yoon, 1981). A metodologia MCDM tem ganhado credibilidade no desenvolvimento orientado para a sustentabilidade e na escolha de estratégias verdes de construção devido à sua capacidade de apoiar a tomada de decisões a partir de uma abordagem holística, considerando critérios ambientais, econômicos e sociais (Dabbaghian *et al.*, 2014). De acordo com Triantaphyllou (2000), os métodos MCDM apresentam três etapas:

- i. Determinar os critérios e as alternativas relevantes.
- ii. Determinar medidas numéricas à importância relativa dos critérios e ao impacto das alternativas nesses critérios.
- iii. Processar os valores numéricos para determinar a classificação de cada alternativa.

Um problema MCDM possui m alternativas ($A_1, A_2, \dots, A_m$) e n critérios ($C_1, C_2, \dots, C_n$). Os tomadores de decisão determinam o desempenho (absoluto ou relativo) a_{ij} (para $i = 1, 2, \dots, m$ e $j = 1, 2, \dots, n$) para cada alternativa em cada critério. Em seguida, uma matriz com a_{ij} valores, juntamente com os pesos de cada critério w_j é definida. Dados os valores de a_{ij} e w_j , o objetivo é classificar as alternativas quando todos os critérios de decisão são considerados simultaneamente. Dentre os principais métodos MCDM estão o AHP (*Analytic Hierarchy Process*), TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), ELECTRE (*Elimination and Choice expressing Reality*), COPRAS (*Complex Proportional Assessment*), WSM (*Weighted Sum Model*) e WPM (*Weighted Product Model*) (Triantaphyllou, 2000).

O método AHP de Saaty (1990) busca determinar a importância entre dois elementos de acordo com uma escala de comparação em pares. A metodologia se dá em três etapas principais:

- i. Estruturar o problema como uma hierarquia. No primeiro nível está o objetivo geral de se utilizar MCDM. No segundo nível estão os critérios que contribuem com o objetivo geral. No terceiro nível estão as alternativas avaliadas em cada critério do segundo nível.

ii. Realizar julgamentos comparativos em pares entre a importância dos critérios com relação ao objetivo geral. A comparação entre os critérios se dá por meio de questionários aplicados a profissionais com competências específicas na área com perguntas similares ao padrão: dos dois critérios que estão sendo comparados, qual é considerado mais importante para atingir o objetivo geral? A escala utilizada para os julgamentos é apresentada no Quadro 1. A partir dos julgamentos, uma matriz de comparação aos pares é formada, onde o principal autovetor fornece a prioridade relativa dos critérios medidos.

iii. Estabelecer a prioridade global das alternativas. As prioridades das alternativas em relação a cada critério são colocadas em uma matriz. As colunas dessa matriz são multiplicadas pelo peso do critério correspondente e as linhas são então somadas, resultando no vetor desejado das alternativas.

O método também verifica se os julgamentos são consistentes por meio do cálculo da razão de consistência.

Quadro 1 - Escala fundamental do método AHP

Valor	Definição	Explicação
1	Importância equivalente.	Os dois critérios contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância moderada.	A análise e a experiência mostram que um critério é um pouco mais importante que o outro.
5	Importância forte, essencial.	A análise e a experiência mostram que um critério é essencialmente mais importante que o outro.
7	Importância muito forte.	A análise e a experiência mostram que um critério é fortemente mais importante que o outro.
9	Importância extrema.	A análise e a experiência mostram que um critério é extremamente mais importante que o outro.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários.	Quando valores intermediários aos valores acima são necessários.

Se o critério i apresenta um dos valores atribuído a ele quando comparado com o critério j , então j tem o valor inverso quando comparado com i .

Fonte: Adaptado de Saaty (1990)

O método TOPSIS de Hwang e Yoon (1981) baseia-se no conceito de que a alternativa escolhida deve ser aquela com a distância mais curta da solução ideal positiva (A^+) e com a distância mais longa da solução ideal negativa (A^-) simultaneamente. A solução ideal positiva apresenta os melhores valores nos critérios e a ideal negativa, os piores valores. Uma das abordagens utiliza a distância Euclidiana. O método segue seis etapas:

- i. Construir a matriz de decisão normalizada para transformar os valores dos desempenhos dimensionais das alternativas em cada critério em adimensionais.
- ii. Construir a matriz de decisão normalizada com pesos por meio da multiplicação da matriz normalizada pelo peso associado de cada critério. Os pesos de cada critério devem ser definidos pelo tomador de decisão a partir de outra metodologia e inseridos no método TOPSIS.
- iii. Determinar a solução ideal positiva (A^+) e a ideal negativa (A^-).
- iv. Calcular as medidas de distância (Euclidiana, por exemplo) entre cada alternativa e as soluções ideais positiva e negativa.
- v. Calcular a proximidade com a solução ideal.
- vi. Classificar as alternativas com base na proximidade com a solução ideal.

Métodos de tomada de decisão com base em múltiplos critérios têm sido empregados em pesquisas recentes para avaliar os impactos ambientais, sociais e econômicos das edificações. Há reconhecimento geral que tanto a ACV (ou ACVE), quanto a ACCV devem ser utilizadas para avaliar os aspectos ambientais e econômicos de projetos de edificações, respectivamente (Zuo *et al.*, 2017; Triana; Lamberts; Sassi, 2021). Entretanto, não há consenso sobre os aspectos sociais. Alguns estudos utilizam indicadores relativos ao conforto térmico do usuário para avaliar a dimensão social da sustentabilidade de edifícios (Invidiata; Lavagna; Ghisi, 2018; Triana; Lamberts; Sassi, 2021). As seções 2.6.1 e 2.6.2 trazem alguns exemplos de estudos que utilizaram MCDM para escolher as alternativas mais adequadas para edificações e coberturas, respectivamente.

2.6.1. Tomada de decisão com múltiplos critérios para a escolha de edificações

Nesta seção, são apresentados alguns estudos sobre MCDM que avaliaram diferentes soluções para edificações com base no ciclo de vida. Buscou-se verificar os critérios adotados e os métodos utilizados para determinar o peso dos critérios e o desempenho das alternativas.

Motuziene *et al.* (2016) avaliaram três diferentes alternativas para a envoltória de uma residência unifamiliar (alvenaria, troncos de madeira e tábuas de madeira) por meio de MCDM. Foram considerados os critérios redução de gastos, energia primária não renovável, gases de efeito estufa e destruição da camada de ozônio. O método AHP foi utilizado para definir os pesos de cada critério e o método COPRAS para selecionar a melhor alternativa com base nos resultados de ACV e ACCV. Para a avaliação dos pesos dos critérios, 30 especialistas da área

de energia, proteção do ambiente e construção participaram de uma pesquisa. Os resultados mostraram que a alternativa construtiva que utiliza troncos de madeira apresentou a melhor classificação e alternativa em tábuas de madeira, a segunda melhor classificação.

Invidiata, Lavagna e Ghisi (2018) propuseram avaliar diferentes soluções de projeto para uma habitação social localizada em Milão a partir de MCDM, combinando conforto térmico, avaliação do ciclo de vida (ACVE e ACVCO₂) e análise do custo do ciclo de vida. Com o objetivo de encontrar a melhor solução de projeto (envoltória e estrutura) para a edificação, os autores utilizaram os métodos AHP e COPRAS. O método AHP foi utilizado para a definição dos pesos (prioridades) dos quatro parâmetros utilizados no estudo, os quais foram analisados por 30 especialistas por meio de comparações em pares utilizando a escala de Saaty. A partir do método COPRAS foi possível definir a melhor solução de projeto com base nos quatro parâmetros com seus respectivos pesos. O EnergyPlus foi utilizado para estimar o número de horas em conforto térmico no edifício. Três diferentes bases de dados foram utilizadas para realizar a ACV. O custo do ciclo de vida de cada estratégia foi estimado com base na lista de preços da Câmara de Comércio de Milão. Dentre as soluções de projeto avaliadas, a solução com estrutura em concreto armado e tijolos cerâmicos *rettificati* nas paredes externas foi considerada a mais sustentável.

Triana, Lamberts e Sassi (2021) desenvolveram uma metodologia de avaliação de habitações populares brasileiras por meio do Índice de Sustentabilidade. Esse índice integrou indicadores ambientais, energéticos, econômicos e relacionados ao conforto térmico do usuário. Quatro indicadores foram considerados: emissões de CO₂ no ciclo de vida, consumo de energia no ciclo de vida, custo do ciclo de vida e graus-hora de desconforto para aquecimento e resfriamento. Pesos equivalentes foram dados aos indicadores. Neste trabalho, quanto menor o valor do índice, melhor o desempenho do edifício. Um estudo de caso foi aplicado na cidade de São Paulo, considerando um projeto representativo do setor e casos com a aplicação de medidas de eficiência energética para três cenários climáticos, considerando mudanças climáticas. A metodologia integrada ressaltou a importância da seleção dos materiais considerando seus impactos associados, o desempenho termoenergético da edificação durante a sua vida útil, e as mudanças climáticas na fase operacional. Considerando o índice proposto, todos os casos com aplicação de medidas de eficiência apresentaram melhorias com relação ao caso base. O melhor caso apresentou redução de 52% com relação ao caso base. Segundo os autores, um painel de

especialistas seria necessário para estabelecer pesos aos indicadores, o que poderia levar a resultados diferentes dos encontrados.

2.6.2. Tomada de decisão com múltiplos critérios para a escolha de coberturas

Uma pesquisa foi realizada na base de dados Scopus buscando artigos que apresentassem termos relacionados com “cobertura” e “multicritério” no título, resumo ou nas palavras-chave. O objetivo foi encontrar estudos que utilizaram MCDM para comparar diferentes alternativas de coberturas para edificações e classificar a mais adequada com base em critérios de avaliação. Foram excluídos os trabalhos que envolvessem outros elementos construtivos (como paredes) ou outras infraestruturas (como pavimento permeável) na análise, ou que comparassem apenas os materiais para a cobertura ou para sua estrutura.

O Quadro 4 (Apêndice A) apresenta os trabalhos encontrados. Dentre os estudos revisados, aproximadamente 90% incluíram coberturas verdes juntamente com outros tipos de cobertura na análise ou realizaram comparações entre diferentes alternativas de coberturas verdes. Os critérios adotados geralmente buscaram retratar aspectos ambientais, econômicos e sociais, entretanto, variam muito entre os estudos. As coberturas verdes, por exemplo, podem apresentar diversos benefícios, como já mencionado anteriormente. Entretanto, muitos deles são difíceis de quantificar. Para ponderar o desempenho relativo das alternativas de cobertura em relação a cada critério, cerca de 50% dos estudos revisados que consideraram coberturas verdes entre as alternativas adotaram valores reportados na literatura para coberturas semelhantes ou utilizaram a avaliação de especialistas. Entre os demais trabalhos, não foram encontrados estudos abrangentes que reunissem parâmetros relevantes do ponto de vista ambiental, econômico e social – como desempenho termoenergético, conforto térmico, ACV (ou ACVE) e ACCV, tendo como forma de avaliação das alternativas métodos de simulação ou experimentação, que representem a realidade específica do caso de estudo. Quanto aos métodos de avaliação multicritério, a maior parte dos estudos revisados (cerca de 40%) utilizou a metodologia AHP ou alguma de suas variações, conjuntamente ou não com outro método. O método TOPSIS foi utilizado em aproximadamente 20% dos estudos.

2.7. Síntese da revisão de literatura

O setor da construção é responsável por significativo consumo de energia e a expectativa é de que a demanda de energia em edifícios continue a aumentar. Um dos principais desafios é a

redução do consumo energético para sistemas climatização de ambientes. Nesse sentido, a envoltória – em particular, a superfície das coberturas – exerce grande influência no desempenho termoenergético da edificação, uma vez que representa a interface entre o ambiente interno e externo. Dessa forma, estratégias passivas, como as coberturas verdes e as coberturas frias, têm sido avaliadas.

As coberturas verdes geralmente são compostas por uma estrutura de camadas: vegetação, substrato, filtro, drenagem, anti-raiz e impermeabilização. Por meio desta estrutura, as coberturas verdes podem, dentre outros benefícios (relacionados com questões hidrológicas, qualidade do ar e manutenção da biodiversidade), reduzir a energia consumida para climatização em edificações, melhorar do conforto térmico dos usuários e contribuir com a mitigação dos efeitos das ilhas de calor. Os benefícios obtidos do ponto de vista térmico associam-se principalmente a processos físicos como o sombreamento proporcionado pela vegetação e a evapotranspiração (vegetação e substrato), que contribuem para a redução do ganho de calor pela cobertura, e a massa térmica fornecida pelo substrato, que retarda a transferência de calor, diminuindo as variações diárias de temperatura.

As coberturas frias também podem ser utilizadas para melhorar o desempenho térmico das edificações, reduzindo consumo de energia e melhorando as condições do ambiente interno, além de contribuir com o resfriamento do ar próximo à cobertura. No entanto, esses efeitos ocorrem por meio de outros mecanismos. As coberturas frias apresentam revestimentos com alta refletância solar e alta emitância infravermelha, refletindo a radiação solar e emitindo calor, o que resulta na diminuição da temperatura superficial e em menor ganho de calor pela cobertura.

Estudos desenvolvidos por meio de simulação computacional apresentados na revisão de literatura mostraram que essas estratégias têm sido consideradas promissoras para melhoria do desempenho termoenergético dos edifícios. Entretanto, seu desempenho é fortemente dependente das condições climáticas e das características da configuração adotada, como a consideração ou não de isolamento térmico. Além disso, a bibliografia também reporta uma lacuna entre os valores simulados e os valores reais, e aponta como uma das causas a negligência com a consideração do padrão de uso da edificação.

A adoção de uma camada de isolamento em coberturas (convencionais, verdes e frias) pode ser benéfica tanto em climas frios, quanto em climas quentes para manter a temperatura interna e dificultar a entrada de calor. No entanto, além das condições climáticas, os padrões de

uso da edificação devem ser levados em consideração, principalmente em edificações com maior nível de isolamento, em que o desempenho é mais afetado pelo comportamento dos ocupantes. Por exemplo, a utilização da ventilação natural de maneira inadequada e a consideração dos ganhos de calor internos devido aos equipamentos e eletrodomésticos pode provocar sobreaquecimento dos ambientes em climas quentes. Dessa forma, a configuração ideal de cada tipologia de cobertura deve ser definida para determinada localidade, considerando as necessidades de aquecimento e resfriamento ao longo de todo o ano, antes de definir qual a melhor alternativa.

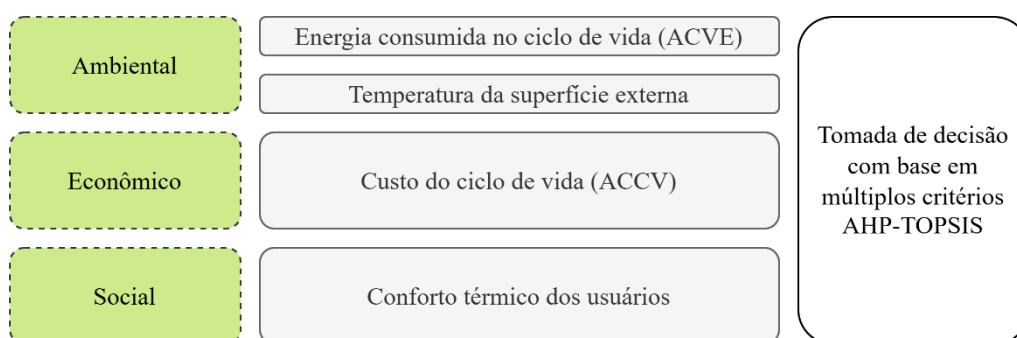
A tipologia de cobertura e suas características, bem como os padrões de uso da edificação exerce influência não somente sobre as necessidades energéticas para climatização do ar, como também sobre a temperatura da superfície (que influencia a temperatura do ar e as ilhas de calor) e o conforto térmico dos usuários. Portanto, é necessário avaliar o desempenho de coberturas verdes e frias juntamente com os padrões de uso e investigar sua influência com relação aos diferentes parâmetros considerados relevantes.

Além disso, o consumo de energia também ocorre nas fases de produção dos materiais de construção, de manutenção da edificação e no final de sua vida útil (demolição e descarte de materiais). Assim, é preciso avaliar edifícios com a implementação de estratégias passivas, como as coberturas verdes e frias, em todo o seu ciclo de vida. Por meio dos resultados da ACVE é possível contabilizar todos os insumos de energia de um edifício em seu ciclo de vida. É possível comparar os benefícios apresentados pelas coberturas durante a fase de uso com os recursos necessários nas fases de fabricação dos materiais, construção e fim da vida da edificação e verificar se esses sistemas são de fato mais sustentáveis comparados com coberturas convencionais. Apesar de diversos estudos avaliarem o desempenho térmico e parâmetros de conforto térmico de coberturas verdes e frias, poucos estudos comparativos relativos ao ciclo de vida energético destas tipologias de cobertura foram encontrados. Nestes estudos de ACVE, os padrões de uso da edificação não foram considerados.

Além da avaliação ambiental, o desenvolvimento de edificações sustentáveis deve considerar também parâmetros econômicos e sociais. A ACCV tem sido utilizada na literatura para avaliar o custo total das edificações com a implementação de estratégias de melhoria de desempenho, durante todo o ciclo de vida. Com relação à questão social, não há consenso sobre a forma de avaliação. Uma das abordagens consiste em avaliar os impactos sobre o usuário, a partir de parâmetros como conforto térmico.

Os tópicos abordados na revisão de literatura relacionam-se entre si de modo que a seleção da tipologia de cobertura mais sustentável para um determinado contexto climático deve considerar simultaneamente parâmetros ambientais, econômicos e sociais. Diante de múltiplos critérios relevantes (ACVE, temperatura da superfície externa, ACCV e conforto térmico), métodos de tomada de decisão com múltiplos critérios (MCDM) podem ser utilizados para avaliar e comparar estratégias de melhoria aplicadas em edificações – como coberturas verdes e frias. A Figura 5 ilustra a relação entre os tópicos abordados.

Figura 5 - Relação existente entre os tópicos centrais abordados na revisão de literatura



A metodologia MCDM tem ganhado credibilidade no desenvolvimento de edifícios sustentáveis devido à sua capacidade de apoiar a tomada de decisão a partir de uma abordagem holística. Como exposto no texto, critérios relativos aos aspectos ambientais, econômicos e sociais já foram aplicados de modo combinado para a escolha da alternativa ideal de cobertura. Entretanto, esta pesquisa se diferencia das demais por avaliar diferentes tipologias de coberturas incluindo critérios que consideram o ciclo de vida, juntamente com critérios sociais, utilizando simulações computacionais como forma de avaliação das alternativas de coberturas nos respectivos critérios. A partir desta forma de avaliação, é possível considerar os padrões de uso e as condições climáticas específicas da localidade nos resultados.

3. Método

Este estudo propôs um método de avaliação de coberturas (convencional, verde e fria) a partir de uma abordagem ampla, considerando os seguintes parâmetros:

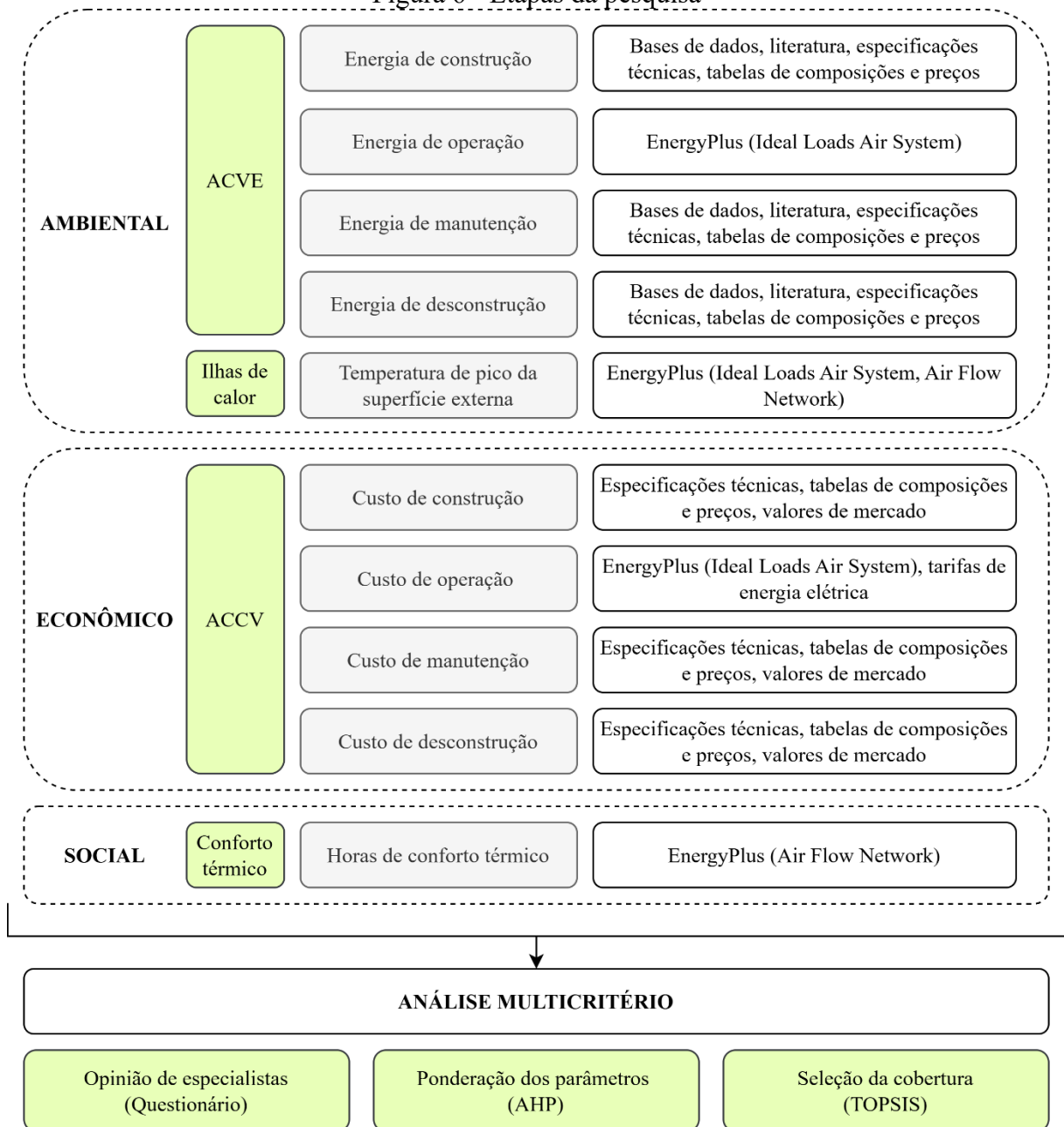
- Energia consumida no ciclo de vida (ACVE);
- Temperatura da superfície externa;
- Custo do ciclo de vida (ACCV);
- Conforto térmico do usuário.

A partir do processo de tomada de decisão com múltiplos critérios (MCDM), foi possível definir a tipologia de cobertura mais adequada, conforme o desempenho das alternativas de cobertura em cada um dos parâmetros e o peso atribuído aos parâmetros. A Figura 6 apresenta as etapas da pesquisa.

O método envolveu simulação computacional do desempenho termoenergético da edificação e aspectos relacionados ao ciclo de vida das coberturas. A energia operacional do parâmetro ACVE e os parâmetros temperatura da superfície externa e conforto térmico dos usuários foram avaliados por meio de variáveis obtidas a partir de simulação computacional no programa EnergyPlus (carga térmica anual que foi utilizada no cálculo de energia anual para climatização, temperatura de pico da superfície externa e horas de conforto térmico, respectivamente). Em particular, a influência da camada de isolamento foi investigada em todas as tipologias de cobertura. A influência do controle da ventilação natural no conforto térmico do usuário também foi avaliada. A análise foi realizada para uma edificação residencial multifamiliar em três diferentes condições climáticas brasileiras.

O quantitativo de materiais, equipamentos, transporte e mão de obra utilizados na ACVE e na ACCV foi realizado com base em tabelas do Sistema Nacional e Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) das diferentes cidades consideradas, em Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO, 2010) e em informações de mercado. As energias embutida inicial, embutida na manutenção e de desconstrução do parâmetro ACVE foram calculadas a partir de valores disponíveis na literatura, em bases de dados nacionais ou internacionais, conforme disponibilidade. Para o cálculo do custo do ciclo de vida, foram utilizadas as tabelas SINAPI e preços de mercado.

Figura 6 - Etapas da pesquisa



3.1. Modelagem da edificação e simulação computacional

Nesta seção, são apresentados os diferentes contextos climáticos em que a avaliação foi realizada, a edificação de referência modelada, as diferentes tipologias de cobertura e configurações de controle da ventilação natural que foram investigadas, e as variáveis utilizadas para analisar os resultados.

3.1.1. Contextos climáticos

O método multicritério proposto foi aplicado em três contextos climáticos a fim de verificar a influência do clima na escolha da tipologia de cobertura mais adequada. Foram adotados os arquivos climáticos TMY de 2007-2021 (Crawley; Lawrie, 2022) das cidades de Florianópolis (SC), Curitiba (PR) e Brasília (DF) a fim de investigar condições climáticas secas e úmidas, bem como situações de verão temperado e quente. Os valores de temperatura do ar, umidade relativa e precipitação obtidos a partir da simulação computacional no programa EnergyPlus são apresentados no Apêndice B. A Tabela 2 apresenta a classificação dos climas de acordo com Köppen (Alvares *et al.*, 2013) e com a TR 15220-3-1 (ABNT, 2024).

Tabela 2 - Classificação climática das cidades de Florianópolis, Curitiba e Brasília		
Cidade	Köppen	TR 15220-3-1
Florianópolis	Cfa - Subtropical úmido, sem estação seca e com verão quente	3A - Zona mista e úmida
Curitiba	Cfb - Subtropical úmido, sem estação seca e com verão temperado	1M - Zona muito fria com inverno moderado
Brasília	Aw - Tropical árido com inverno seco	3B - Zona mista e seca

Conforme os arquivos climáticos TMY de 2007-2021 (Crawley; Lawrie, 2022), Florianópolis é uma cidade litorânea, com temperaturas externas variando entre 6,4°C e 34,6°C ao longo do ano, com média de 21,2°C. Assim como em Curitiba, a cidade possui umidade relativa média alta, 80,3%. A precipitação anual é de 1.243 mm. Curitiba caracteriza-se pelo inverno mais frio, tendo como temperatura do ar média 18,1°C, chegando a 0,2°C durante o inverno e 32,2°C durante o verão. A umidade relativa média ao longo do ano é igual a 81,7% e a precipitação anual é de 1.496 mm. Em Brasília, as temperaturas externas variam entre 8,6°C e 33,3°C, com média de 21,5°C. Quanto à umidade relativa do ar, a cidade de Brasília é a que possui o menor valor médio, 65,4%. A precipitação anual é de 1.189 mm.

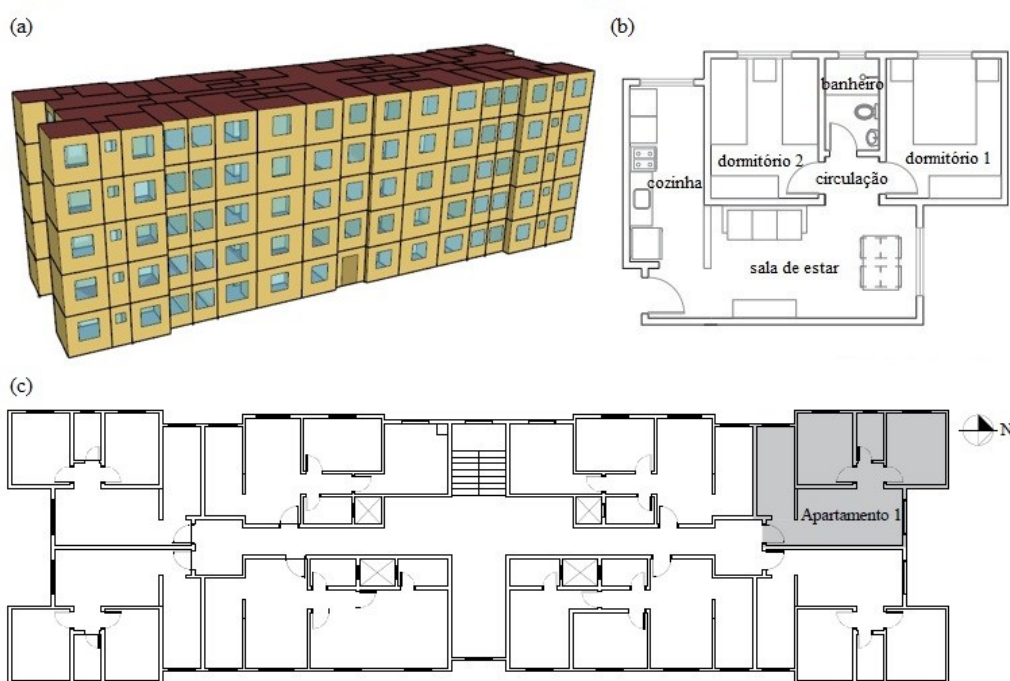
3.1.2. Modelo de edificação

A tipologia de edificação utilizada é um edifício residencial multifamiliar de cinco andares com apartamentos de dois dormitórios, um ou dois banheiros e uma sala com cozinha conjugada, conforme projeto representativo de habitações sociais brasileiras levantado por Triana, Lamberts e Sassi (2015), para as faixas de renda 2 e 3 (de R\$ 1.600,01 a R\$ 5.000,00). A escolha por um modelo de residência multifamiliar ao invés de unifamiliar se deu pelo fato de esse tipo

de edificação ser mais comum em grandes centros urbanos, onde o fenômeno das ilhas de calor é mais pronunciado. Além disso, o estudo de Piselli *et al.* (2017) demonstrou que residências multifamiliares apresentam maior necessidade energia para climatização de ar, se comparadas com residências unifamiliares. Portanto, a investigação da energia necessária ao resfriamento e ao aquecimento (outro parâmetro de avaliação da análise multicritério) é mais significativa nessa tipologia.

A Figura 7 apresenta uma perspectiva da modelagem da edificação (tipologia linear), a planta do apartamento tipo escolhido (apartamento 1) e um andar típico. A planta do apartamento 1 demonstrada na Figura 7(b) e hachurada na Figura 7(c) foi a considerada na análise. Toda a edificação foi simulada, entretanto, as análises térmicas foram realizadas somente em um apartamento localizado no último pavimento da edificação, onde a influência das coberturas verde e fria é mais percebida (Pisello; Piselli; Cotana, 2015; Piselli *et al.*, 2017; Cascone *et al.*, 2018). A orientação solar foi determinada com base na maximização das cargas térmicas identificadas por meio de simulações preliminares, visando otimizar a representatividade dos cenários críticos de desempenho térmico. O modelo foi simulado em campo aberto, ou seja, sem considerar o sombreamento de outros elementos urbanos. A Tabela 3 mostra as áreas úteis dos ambientes modelados.

Figura 7 - Modelo de edificação multifamiliar considerado neste estudo



Fonte: Adaptado de Triana, Lamberts e Sassi (2015)

Os parâmetros de entrada definidos incluem as características levantadas por Triana, Lamberts e Sassi (2015). As paredes são de blocos de concreto com reboco interno e externo com transmitância $2,78 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e capacidade térmica $209 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$. A cor das paredes não foi considerada na simulação computacional e, portanto, a camada externa corresponde ao revestimento de argamassa, que possui absorvância de 0,7. As portas são de madeira com espessura de 3,5 cm e área de $1,68 \text{ m}^2$ (hall), $1,47 \text{ m}^2$ (dormitórios) e $1,26 \text{ m}^2$ (banheiro). As janelas da sala de estar, cozinha e dormitórios são de duas folhas com deslizamento horizontal, fator de ventilação 0,45 e com áreas de, respectivamente, $1,80 \text{ m}^2$, $1,44 \text{ m}^2$ e $1,44 \text{ m}^2$. A janela do banheiro é do tipo basculante, com fator de ventilação 0,8 e área $0,36 \text{ m}^2$. O fator de ventilação corresponde à proporção da área de ventilação efetiva proporcionada por uma janela em relação à sua área total. As janelas são de vidro simples incolor 3 mm. O pé direito do pavimento é de 2,60 m.

Foram consideradas as seguintes propriedades térmicas e óticas dos vidros: transmitância a radiação solar para incidência normal de 0,85, refletância a radiação solar para incidência normal na frente e atrás de 0,075, transmitância à luz visível para incidência normal de 0,901, refletância à luz visível para incidência normal na frente e atrás de 0,081, emissividade hemisférica à radiação infravermelha na frente e atrás de 0,84 e condutividade térmica de $0,9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Tabela 3 - Área útil dos ambientes do modelo de edificação multifamiliar

Ambiente	Área útil (m²)
Sala de estar + cozinha + circulação	20,81
Dormitório 1	7,94
Dormitório 2	7,41
Banheiro	2,44
Total	38,6

Fonte: Adaptado de Triana, Lamberts e Sassi (2015)

As cargas internas devido à presença de pessoas, ao sistema de iluminação e aos equipamentos foram consideradas constantes, conforme as Tabelas 4, 5 e 6. A Figura 8 apresenta o cronograma de ocupação. Os valores foram obtidos da NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

Tabela 4 - Cargas internas referentes às pessoas consideradas no modelo de edificação

Ambiente	Calor produzido por área de superfície corporal (W/m ²)	Calor produzido por uma pessoa com 1,80 m ² de superfície corporal (W)	Período de uso
Sala	60	108	14:00 - 21:59*
Dormitórios	45	81	00:00 - 07:59 e 22:00 - 23:59

*A sala é ocupada por duas pessoas entre 14:00 e 17:59 e por quatro pessoas no restante do período.

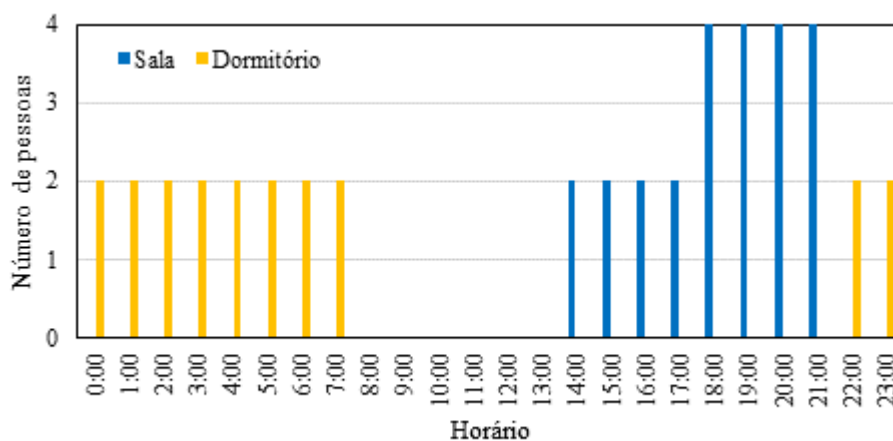
Tabela 5 - Cargas internas referentes à iluminação consideradas no modelo de edificação

Ambiente	Densidade de potência instalada (W/m ²)	Período de uso
Sala	5,00	16:00 - 21:59
Dormitórios	5,00	06:00 - 07:59 e 22:00 - 23:59

Tabela 6 - Cargas internas referentes aos equipamentos consideradas no modelo de edificação

Ambiente	Potência (W)	Período de uso
Sala	120	14:00 - 21:59

Figura 8 - Cronograma de ocupação



Ressalta-se aqui que as simulações computacionais realizadas para determinar a melhor estratégia a ser aplicada na envoltória – nesse caso, a tipologia de cobertura – devem considerar os ganhos internos relativos ao tipo de edificação selecionada (residencial, comercial, etc.) para obter resultados confiáveis. A presença ou ausência dos ganhos internos nas simulações afeta os resultados de consumo de energia com climatização, principalmente tipologias de edificação com maiores ganhos internos, como edifícios de apartamentos ou escritórios em climas frios (Piselli *et al.*, 2017).

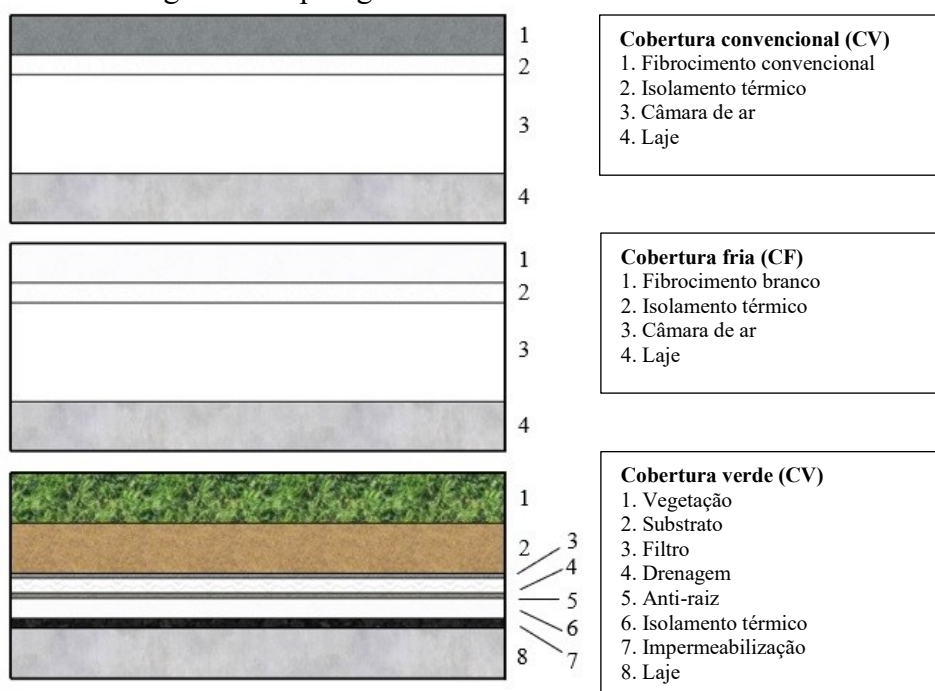
O modelo foi avaliado em dois cenários: com ventilação natural (VN) e com ar-condicionado (AC). O cenário com ventilação natural foi modelado no EnergyPlus por meio da classe de objetos *Air Flow Network* e as variáveis de saída foram as temperaturas nos ambientes de permanência prolongada e as temperaturas do ar externo (que foram utilizadas no cálculo das horas de conforto térmico). São considerados ambientes de permanência prolongada a sala e os dormitórios. Para o cenário com ar-condicionado foi utilizada a classe *Ideal Loads Air System* e as variáveis de saída foram as cargas térmicas anuais de resfriamento e aquecimento (que foram utilizadas no cálculo da energia consumida para climatização).

Para melhor investigar o efeito do controle da ventilação natural no conforto térmico, diferentes comportamentos do usuário foram investigados por este trabalho. Estes estão detalhados na seção 3.1.4.

3.1.3. Tipologias de cobertura do modelo de edificação

Três tipologias de cobertura foram analisadas: cobertura convencional em fibrocimento, fria e verde extensiva. Como suporte estrutural para todos os tipos de cobertura, foi considerada uma laje de concreto com espessura de 12 cm. A Figura 9 mostra as coberturas esquematizadas em camadas e as abreviações adotadas para identificá-las.

Figura 9 - Tipologias de cobertura consideradas no estudo

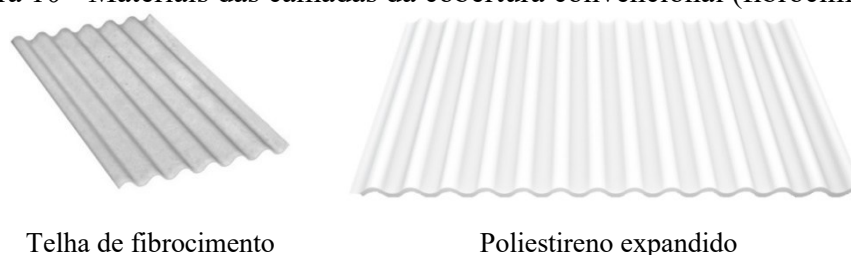


*Todas as coberturas foram analisadas com e sem a camada de isolamento térmico.

3.1.3.1. Cobertura convencional

Neste trabalho, uma cobertura convencional de fibrocimento foi adotada, tendo em vista que essa tipologia é comumente empregada em edificações brasileiras, representando cerca de metade do mercado nacional de telhas (Silva; Etulain, 2010). Foi considerada uma cobertura composta por telhas de fibrocimento e uma câmara de ar não ventilada entre as telhas e laje de cobertura em duas condições: sem e com isolamento térmico (poliestireno expandido). A Figura 10 apresenta os materiais utilizados na cobertura convencional.

Figura 10 - Materiais das camadas da cobertura convencional (fibrocimento)



A Tabela 7 apresenta os dados físicos da cobertura convencional que foram utilizados para a simulação no EnergyPlus. Os valores foram obtidos na NBR ISO 10456 (ABNT, 2022) e na NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

Tabela 7 - Dados físicos da cobertura convencional (fibrocimento)

Camada	Espessura (mm)	Densidade (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Resistência térmica (m ² .K/W)
Fibrocimento	6,0	1.800	0,65	840	0,009
Isolamento térmico	0 e 40	15	0,04	1.420	1,0
Câmara de ar*	> 50	-	-	-	0,21

*Espaço de ar na cobertura (fluxo descendente).

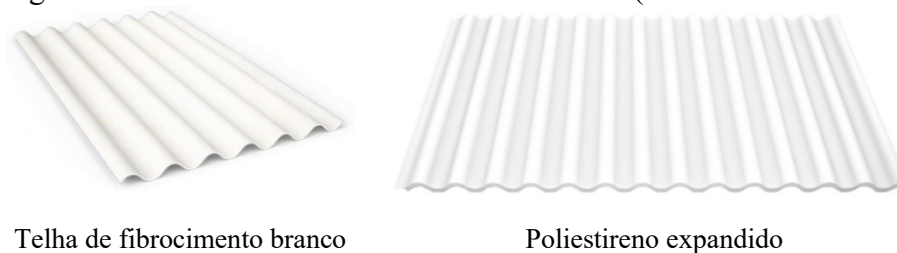
Os valores de emitância térmica, absorvância solar e absorvância visível da telha foram de 0,88, 0,64 e 0,62, respectivamente, obtidos de Silva (2019). Em seu trabalho, a autora mediu a emitância térmica, a refletância solar e a refletância visível de telhas de fibrocimento por meio de equipamentos de laboratório. A partir dos valores de refletância solar e visível, foi possível obter os valores de absorvância solar e visível. No entanto, a fim de considerar o processo de envelhecimento natural, foi considerada a degradação da absorvância solar das telhas, de acordo

com o Anexo A da NBR 15571-1 (ABNT, 2021). Dessa forma, o valor de absorptância solar após degradação de três anos (0,68) foi utilizado na simulação e foi considerado constante em todo o horizonte de análise.

3.1.3.2. Cobertura fria

O modelo de cobertura fria adotado foi uma cobertura de fibrocimento pigmentada de fábrica na cor branca (portanto, não foi considerada a pintura de branco). Da mesma forma que na cobertura convencional, foi considerada a cobertura composta por telhas de fibrocimento, nesse caso brancas, e uma câmara de ar não ventilada entre as telhas e a laje de cobertura. Foi considerada uma condição sem isolamento térmico e outra com. A Figura 11 mostra os materiais utilizados na cobertura fria.

Figura 11 - Materiais utilizados na cobertura fria (fibrocimento branco)



Os dados físicos para simulação da cobertura fria no EnergyPlus foram os mesmos utilizados para a cobertura convencional (Tabela 7). Os valores de emitância térmica, absorptância solar e absorptância visível da telha foram 0,90, 0,25 e 0,21, respectivamente, também obtidos de Silva (2019) para o caso de telhas de fibrocimento brancas. Entretanto, na simulação foi utilizado o valor de absorptância solar após degradação de três anos (0,42), calculado conforme o Anexo A da NBR 15571-1 (ABNT, 2021).

3.1.3.3. Cobertura verde

Uma cobertura verde extensiva foi adotada, visto que geralmente não necessita de reforços adicionais na estrutura devido ao seu menor peso (usualmente entre 49 e 98 kg/m²) em comparação com coberturas verdes semi-intensivas e intensivas (Wark; Wark, 2003; Castleton *et al.*, 2010; Gagliano *et al.*, 2016; Bevilacqua, 2021). O tipo de vegetação foi *Sedum*. Essas plantas caracterizam-se por possuírem metabolismo ácido crassuláceo (CAM). Durante o dia fecham os estômatos, reduzindo a transpiração a fim de conservar a umidade, e durante a noite

abrem os estômatos, quando as taxas de transpiração são significativamente mais baixas (Al-Busaidi *et al.*, 2013). Apesar das reduzidas taxas de evapotranspiração, são as mais utilizadas em coberturas verdes extensivas devido a sua capacidade de adaptação, resistindo bem a períodos de seca (Ziogou *et al.*, 2017; Eksi *et al.*, 2020; Casagrande, 2020; Scolaro; Ghisi, 2022).

Para o substrato, foi considerada uma mistura de vermiculita (V), composto (C) e areia (A) na proporção de 5V: 1C: 4A (% volume). Essa composição foi adaptada de uma composição disponível na literatura e utilizada devido à disponibilidade de informações acerca de suas propriedades térmicas (Sailor; Hutchinson; Bokovoy, 2008) e por já ter sido adotada em outro estudo que também considerou o cultivo da vegetação *Sedum* (Ziogou *et al.*, 2017). Além disso, substratos compostos por matéria orgânica e minerais porosos leves são usualmente adotados em estudos de ACV de coberturas verdes (Scolaro; Ghisi, 2022). A Tabela 8 apresenta os dados físicos que foram inseridos no EnergyPlus para as camadas de vegetação e substrato (*ecorooof*). Para os demais parâmetros, foi adotado o valor padrão do programa.

Tabela 8 - Dados físicos das camadas de vegetação e substrato das coberturas verdes

Camada	Parâmetro	Valor
Vegetação	Altura da vegetação (m)	0,10
	Índice de área foliar (IAF)	3,00
	Refletância das folhas	0,19
	Emissividade das folhas	0,97
	Resistência estomática mínima (s/m)	120
Substrato	Espessura (m)	0,10
	Condutividade térmica do solo seco (W/m.K)	0,20
	Densidade do solo seco (kg/m³)	1.020,00
	Calor específico do solo seco (J/kg.K)	1.093,00
	Conteúdo volumétrico saturado de umidade	0,26
	Conteúdo volumétrico residual de umidade	0,01
	Conteúdo volumétrico inicial de umidade	0,15

Fonte: Baseado em Cascone *et al.* (2018), Shi *et al.* (2019) e Ziogou *et al.*, (2017).

As demais camadas da cobertura verde foram modeladas separadamente. As camadas de filtro, drenagem, e anti-raiz são geralmente constituídas por materiais poliméricos (Scolaro; Ghisi, 2022). Neste trabalho, foi considerada manta geotêxtil como filtro (Gagliano *et al.*, 2016), polietileno de alta densidade (PEAD) como drenagem (Koroxenidis; Theodosiou, 2021)

e polietileno de baixa densidade (PEBD) como membrana anti-raiz (Chenani; Lehvävirta; Häkkinen, 2015; Koroxenidis; Theodosiou, 2021). Foi considerada uma condição sem camada de isolamento térmico e outra com; quando considerada esta camada, poliestireno expandido foi utilizado. Quanto à camada de impermeabilização, uma membrana betuminosa foi considerada. Os dados físicos dessas camadas são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados físicos das camadas de filtro, drenagem, isolamento térmico, anti-raiz e impermeabilização da cobertura verde

Camada	Espessura (mm)	Densidade (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Referência
Camada filtrante	1,0	910	0,22	1.800	Gagliano <i>et al.</i> (2016)
Camada drenante (água)*	10	1.000	0,60	4.190	NBR ISO 10456 (ABNT, 2022)
Camada anti-raiz	0,4	920	0,33	2.200	NBR ISO 10456 (ABNT, 2022)
Isolamento térmico	0 e 40	15	0,04	1.420	NBR ISO 10456 (ABNT, 2022)
Impermeabilização	5,0	1.100	0,23	1.000	NBR ISO 10456 (ABNT, 2022)

* Conforme Koroxenidis e Theodosiou (2021), a camada drenante apresenta variação sazonal do conteúdo de umidade em suas cavidades e, portanto, a sua altura (25 mm) é dividida em 60% ar e 40% água. Apesar da existência da camada de ar, esta não pode ser considerada como um isolante, pois não é constante e as cavidades a interrompem, potencialmente funcionando como pontes térmicas quando cheias de água. Assim, pode ser modelada somente a camada de água para representar a camada de drenagem, seguindo abordagem comum na implementação de fenômenos de ponte térmica em fluxo de calor unidimensional.

Conforme Koroxenidis e Theodosiou (2021), a camada de drenagem em PEAD não foi modelada no EnergyPlus devido à sua pequena espessura (2 mm). No entanto, foi incluída na ACVE e na ACCV considerando densidade 1,35 kg/m². A Figura 12 apresenta os materiais utilizados nas camadas da cobertura verde.

Figura 12 - Materiais utilizados nas camadas da cobertura verde



3.1.4. Configurações de controle da ventilação natural

No Brasil, é comum a utilização de ventilação natural em residências em todos os climas, seja por questões culturais ou pela inexistência de aparelhos de ar-condicionado. Assim, o método de adaptação mais comum em dias quentes é a abertura de portas e janelas para ventilação (Ramos *et al.*, 2021). Dessa forma, é relevante investigar de que forma os diferentes comportamentos do usuário relacionados com a ventilação natural afetam o desempenho das coberturas com relação ao conforto térmico do usuário. Destaca-se que esta análise foi conduzida separadamente, e seus resultados não foram incorporados à metodologia multicritério.

Assim, três diferentes configurações de controle da ventilação natural foram avaliadas no contexto climático de Florianópolis/ SC: ventilação durante os períodos de ocupação, conforme NBR 15575-1 (ABNT, 2021), ventilação de manhã à noite e ventilação noturna nos ambientes de permanência prolongada, conforme Sorgato, Melo e Lamberts (2016). De acordo com os autores, apesar de simplificadas, estas configurações são comuns em residências brasileiras. Ressaltam ainda que métodos mais sofisticados de representar a abertura e o fechamento de janelas (como algoritmos) podem não representar adequadamente a realidade brasileira.

A configuração de ventilação durante os períodos ocupados teve como base o cronograma apresentado na Figura 8. Na configuração de ventilação de manhã à noite, a

ventilação ocorre das 6:00 às 24:00 e na configuração de ventilação noturna, a abertura das janelas ocorre entre 18:00 e 24:00 nos ambientes de permanência prolongada. Em todos os casos, o comportamento do usuário foi independente da temperatura interna (as janelas permanecem sempre abertas durante os períodos descritos). Dessa forma, as janelas dos ambientes de permanência prolongada operam conforme a configuração de ventilação adotada. A janela do banheiro permanece sempre aberta e as janelas dos demais ambientes de permanência transitória permanecem sempre fechadas. As portas internas permanecem abertas, com exceção da porta do banheiro, que permanece sempre fechada. A porta externa permanece sempre fechada. Em janelas e portas fechadas, ocorre infiltração pelas frestas – coeficiente de fluxo de ar por frestas de 0,0024 kg/(s.m) para portas e 0,00063 kg/(s.m) para janelas, conforme NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

3.1.5. Configurações de controle do ar-condicionado

Como mencionado, é comum em residências brasileiras a abertura das janelas para ventilação natural em dias quentes. No entanto, observa-se crescimento da compra de aparelhos de ar-condicionado nos últimos anos, o que justifica a análise na energia consumida com resfriamento e aquecimento da edificação.

Por meio da classe de objetos *Ideal Loads Air System*, que busca reproduzir um sistema de condicionamento de ar ideal, foram obtidas as seguintes variáveis de saída: carga térmica anual de resfriamento e carga térmica anual de aquecimento – energia a ser retirada e adicionada ao ambiente ao longo de um ano, respectivamente. A carga térmica é um indicador de desempenho térmico proposto pela NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

Os *setpoints* adotados para o termostato foram de 21°C para aquecimento e 26°C para resfriamento. Estes valores foram determinados com base na NBR 16401-2 (ABNT, 2008), que recomenda temperatura operativa entre 22,5°C e 26,0°C no verão e entre 21,0°C e 24,0°C no inverno, de forma a simular um ambiente de relativo conforto térmico aos usuários tanto no verão, quanto no inverno. O intervalo entre 21°C e 26°C também é comumente utilizado na literatura por estudos que avaliam a necessidade de energia para climatização, como citado anteriormente (Castleton *et al.*, 2010). O sistema de ar-condicionado ideal deve ser acionado somente quando os ambientes de permanência prolongada (sala e dormitórios) estiverem ocupados. Foi considerado que todas as janelas e portas permanecem sempre fechadas

(ocorrendo infiltração por frestas), com exceção da janela do banheiro, que permanece sempre aberta, conforme NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

3.1.6. Análise dos resultados da simulação computacional

Na etapa de análise dos resultados da simulação computacional, buscou-se compreender a influência que as diferentes tipologias de cobertura exercem sobre a energia necessária para climatização, sobre a temperatura da superfície externa e sobre o conforto térmico do usuário.

3.1.6.1. Energia de resfriamento e aquecimento

O resultado de carga térmica anual (resfriamento e aquecimento) nos ambientes de permanência prolongada foi utilizado para calcular o consumo anual de energia necessário para climatização. O consumo energético anual foi obtido por meio da divisão da carga térmica pelo coeficiente de eficiência energética do sistema de condicionamento de ar (INMETRO, 2022). No caso de resfriamento, esse coeficiente foi considerado igual ao Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal (IDRS) mínimo para o condicionador de ar apresentar classe A de eficiência energética, 5,5 (INMETRO, 2022). No caso de aquecimento, o coeficiente utilizado foi 4,47, valor calculado em função do coeficiente de eficiência energética para resfriamento, conforme estabelecido por Inmetro (2022).

Na ACVE e na ACCV, o consumo de energia necessária para climatização (resfriamento e aquecimento) da edificação durante o horizonte de tempo de 40 anos foi considerado no cálculo da energia e do custo operacional. O consumo anual de energia foi, então, multiplicado pelo horizonte de tempo (40 anos). Neste sentido, foi considerado que o consumo de energia com climatização foi o mesmo em todos os anos. A energia consumida por equipamentos e iluminação foi considerada na modelagem, mas não foi incluída na ACVE e na ACCV, visto que é equivalente em todos os modelos simulados.

3.1.6.2. Temperatura da superfície externa

A temperatura de pico da superfície externa foi utilizada como um indicativo da influência das coberturas em termos de ilhas de calor. A temperatura da superfície externa das coberturas foi extraída da simulação nos dois cenários: com ventilação natural (*Air Flow Network*) e com ar-condicionado (*Ideal Loads Air System*). A temperatura de pico foi considerada como o maior valor de temperatura superficial externa registrado no ano, considerando valores horários.

Para o caso das coberturas verdes, a temperatura da superfície externa foi calculada por meio da média entre as temperaturas da vegetação e do substrato em todas as horas do ano, conforme Costanzo, Evola e Marletta (2016). O maior valor desta média registrado no ano foi considerado como a temperatura de pico da cobertura. De acordo com os autores, a temperatura das superfícies dos edifícios influencia fortemente a temperatura do ar no ambiente urbano. Dessa forma, a temperatura da cobertura se apresenta como uma variável fundamental no estudo dos efeitos das alternativas de cobertura em termos de mitigação das ilhas de calor urbano.

É importante destacar que a redução da temperatura da superfície de uma única cobertura não teria impacto significativo na mitigação dos efeitos das ilhas de calor em escala urbana ou mesmo em nível de bairro. Para que tal efeito fosse perceptível, seria necessária a implementação de determinada tipologia de cobertura em larga escala.

3.1.6.3. Conforto térmico

O conforto térmico dos usuários foi avaliado por meio da variável horas de conforto térmico nos ambientes de permanência prolongada (sala e dormitórios) durante os períodos ocupados. Neste estudo, foi considerado que os usuários da edificação residencial aceitariam as condições de conforto térmico adaptativo da *Standard 55* (ASHRAE, 2020). As temperaturas operativas internas nos ambientes em questão e as temperaturas médias diárias do ar externo (bulbo seco) foram obtidas da simulação da edificação no cenário com ventilação natural (*Air Flow Network*).

A temperatura média externa foi calculada por meio da média aritmética das temperaturas médias diárias do ar externo (bulbo seco) dos últimos sete dias e foi utilizada para obter os intervalos de temperatura operativa de conforto adaptativo, considerando 80% de satisfação. As temperaturas do limite inferior e superior foram determinadas por meio das Equações 3 e 4, respectivamente (ASHRAE, 2020). Acima da temperatura do limite superior, os usuários sentiriam desconforto por calor e abaixo da temperatura do limite inferior, desconforto por frio.

$$Li_{80\%aceitabilidade} = 0,31 \times t_{me} + 14,3 \quad (3)$$

$$Ls_{80\%aceitabilidade} = 0,31 \times t_{me} + 21,3 \quad (4)$$

Onde:

$Li_{80\%aceitabilidade}$ é a temperatura do limite inferior da zona de conforto ($^{\circ}C$);

$Ls_{80\%aceitabilidade}$ é a temperatura do limite superior da zona de conforto ($^{\circ}C$);

t_{me} é a temperatura média externa ($^{\circ}C$).

Após obtidas as faixas de temperatura nas quais os ocupantes estariam em conforto térmico (valores entre os limites inferior e superior), o número de horas ocupadas com temperatura dentro dessa faixa foi verificado e a porcentagem de horas de conforto térmico foi definida.

3.2. Definição de objetivo e escopo da análise do ciclo de vida

A primeira fase de uma ACV consiste em definir o objetivo e o escopo da análise. A função escolhida para a comparação das diferentes tipologias de cobertura foi a de cobrir certa área por determinado período de tempo. A unidade funcional utilizada foi um m^2 de cobertura e o horizonte de tempo considerado foi 40 anos, valores usualmente considerados por estudos de ACV de coberturas verdes (Scolaro; Ghisi, 2022). Assim, para a ACVE a unidade de medida foi a energia consumida por metro quadrado de área do apartamento (kWh/m^2) durante 40 anos. Para a ACCV, a unidade de medida foi o custo, em reais, por metro quadrado de área do apartamento ($R\$/m^2$) durante 40 anos. Os custos também foram apresentados em termos de valor presente líquido (VPL) por metro quadrado de área do apartamento. A vida útil das coberturas de fibrocimento (convencional e fria) foi considerada 40 anos, valor situado entre a vida útil mínima de coberturas considerada pela NBR 15575-1 (ABNT, 2021) (vinte anos) e a vida útil estimada por estudos relativos ao ciclo de vida de telhas de fibrocimento (50 anos) (Marques; Gomes; Kern, 2016). A vida útil da cobertura verde também foi considerada 40 anos (Shafique *et al.*, 2020; Scolaro; Ghisi, 2022).

Quanto às fronteiras do sistema, para a realização da ACVE e da ACCV, foi adotada a abordagem do berço ao túmulo (*cradle to grave*), considerando as etapas: extração de matérias-primas, fabricação dos materiais, instalação, operação, manutenção e desconstrução. Devido à falta de dados referentes às etapas de reutilização, recuperação ou reciclagem, estas não foram incluídas.

3.2.1. ACVE das diferentes tipologias de cobertura

A ACVE levou em consideração a energia embutida inicial, operacional, embutida na manutenção e de desconstrução, expressas em termos de energia primária.

3.2.1.1. Energia embutida inicial

A energia embutida inicial corresponde à energia necessária para a construção das coberturas e foi calculada conforme a Equação 5.

$$EE_i = EE_{cob} + E_{tr.mat} + E_{eq} \quad (5)$$

Onde:

EE_i é a energia embutida inicial necessária para a construção da cobertura (kWh);

EE_{cob} é a energia embutida nos materiais utilizados na cobertura (kWh);

$E_{tr.mat}$ é a energia consumida no transporte de materiais até a obra (kWh);

E_{eq} é a energia consumida por equipamentos na obra (kWh).

Para o cálculo da energia embutida nos materiais de construção foi utilizada a Equação 6. A energia embutida nos materiais foi obtida em bases de dados ou na literatura e a quantidade de materiais, em especificações técnicas de fabricantes, na literatura ou em Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO, 2010).

$$EE_{cob} = \sum_{i=1}^n (EE_{mat} \times M_{mat}) \quad (6)$$

Onde:

EE_{cob} é a energia embutida nos materiais utilizados na cobertura (kWh);

i é o material de construção em questão;

n é o número de materiais de construção;

EE_{mat} é a energia embutida do material (kWh/kg);

M_{mat} é a massa do material (kg).

Para o cálculo da energia consumida no transporte dos materiais até a obra (Equação 7), foi fixada a distância entre a fábrica dos materiais e a obra como 80 km (160 km ida e volta), e o consumo energético referente ao transporte por caminhão basculante como 0,00045

kWh/kg.km (1,62 MJ/t.km), conforme Tavares (2006). A distância foi fixada devido à dificuldade de definir a distância específica entre a fábrica de cada material e a obra.

$$E_{tr.mat} = E_{comb} \times M_{mat} \times D_{mat} \quad (7)$$

Onde:

$E_{tr.mat}$ é a energia consumida no transporte de materiais até a obra (kWh);

E_{comb} é o consumo energético do transporte utilizado (kWh/kg.km);

M_{mat} é a massa do material transportado (kg);

D_{mat} é a distância entre a fábrica do material e a obra (km).

A energia consumida por equipamento na obra foi calculada por meio da Equação 8, considerando a potência e o tempo de utilização de cada tipo de equipamento disponível nas Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO, 2010) e o fator de conversão de eletricidade em energia primária de 1,6 (Kamimura *et al.*, 2020).

$$E_{eq} = P_{eq} \times t \times f_c \quad (8)$$

Onde:

E_{eq} é a energia consumida por equipamentos na obra (kWh);

P_{eq} é a potência do equipamento (kW);

t é o tempo de utilização do equipamento (h);

f_c é o fator de conversão de eletricidade em energia primária.

3.2.1.2. Energia operacional

A energia operacional representa a energia gasta com climatização, iluminação, cocção e demais equipamentos utilizados na edificação. Para efeito de comparação entre as coberturas, neste trabalho somente a energia de climatização foi considerada como energia operacional, visto que a energia consumida com iluminação e equipamentos é a mesma entre as edificações com diferentes tipologias de coberturas. Dessa forma, apenas as simulações configuradas com ar-condicionado foram consideradas na análise, tendo em vista que não há consumo de energia com climatização na configuração com ventilação natural.

A energia operacional (Equação 9) foi calculada por meio da multiplicação da energia anual consumida para climatização (obtida conforme seção 3.1.6.1) pelo horizonte de tempo, definido como 40 anos, considerando o fator de conversão de eletricidade em energia primária.

$$EO = E_{c.an} \times H \times f_c \quad (9)$$

Onde:

EO é a energia operacional (kWh);

$E_{c.an}$ é a energia anual necessária para climatização (kWh/ano);

H é o horizonte de tempo (ano);

f_c é o fator de conversão de conversão de eletricidade em energia primária.

3.2.1.3. Energia embutida na manutenção

Como a vida útil das coberturas é igual ao horizonte de tempo, não foi necessário substituir os materiais das camadas. Com relação às coberturas convencional e fria, a lavagem a cada cinco anos foi considerada como atividade de manutenção. Entretanto, destaca-se que nas simulações a absorvância das coberturas convencional e fria foi considerada constante (valor após degradação de três anos). Embora a lavagem possa restaurar o valor da refletância, pelo menos nos primeiros anos da vida útil, a frequência de manutenção deve ser alta (com intervalo de meses) (Bretz; Akbari, 1997) e, portanto, considerada improvável nos contextos analisados.

Quanto à cobertura verde, as atividades de fertilização e adição de substrato foram consideradas na etapa de manutenção. Conforme Vacek, Struhala e Matějka (2017), anualmente foram consideradas duas doses de 8 g/m² de fertilizantes compostos por nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) em duas diferentes proporções (19:06:12 e 10:09:19). Os mesmos autores estimam a perda anual de 0,5% do substrato. A atividade de irrigação não foi considerada para avaliar a influência de cada clima, tendo em vista que a vegetação *Sedum* em coberturas verdes extensivas necessita de irrigação somente em períodos de estiagem (Brachet; Schiopu; Clergeau, 2019; Casagrande, 2020).

O Quadro 2 apresenta as atividades de manutenção das coberturas.

Quadro 2 - Atividades de manutenção das coberturas convencional, fria e verde

Tipologia de cobertura	Atividade	Periodicidade
Convencional	Lavagem	A cada 5 anos
Fria	Lavagem	A cada 5 anos
Verde	Fertilização	A cada seis meses
	Adição de substrato	A cada 5 anos

Assim, a energia embutida na manutenção foi calculada conforme a Equação 10 e corresponde à energia embutida nos materiais a serem utilizados somada à energia consumida no transporte desses materiais e no uso de equipamentos. A distância entre a fábrica dos materiais e a obra foi mantida como 80 km. Considerou-se o consumo energético referente ao transporte por veículo utilitário (0,0012 kWh/kg.km¹) devido à menor quantidade de materiais transportada em comparação com a fase inicial.

$$EE_m = \sum_{i=1}^m [(EE_{cob} + E_{tr.mat} + E_{eq}) \times N_m] \quad (10)$$

Onde:

EE_m é a energia embutida na manutenção (kWh);

i é a atividade de manutenção em questão;

m é o número de atividades de manutenção;

EE_{cob} é a energia embutida nos materiais utilizados na cobertura (kWh) (Equação 6);

$E_{tr.mat}$ é a energia consumida no transporte de materiais até a obra (kWh) (Equação 7);

E_{eq} é a energia consumida por equipamentos na obra (kWh) (Equação 8);

N_m é o número de manutenções realizadas na cobertura durante o horizonte de tempo.

O número de manutenções a ser realizado nas coberturas (N_m) foi calculado por meio da Equação 11.

$$N_m = \frac{H}{P_m} \quad (11)$$

¹ Valor calculado considerando o poder calorífico da gasolina obtido por Francesquett *et al.* (2011) de 9.494 cal/g, capacidade do veículo de 650 kg e consumo 1 L de combustível para cada 10 km rodados.

Onde:

N_m é o número de manutenções realizadas na cobertura durante o horizonte de tempo;

H é o horizonte de tempo (ano);

P_m é a periodicidade da atividade de manutenção (ano).

3.2.1.4. Energia de desconstrução

A energia de desconstrução, calculada por meio da Equação 12, corresponde à energia consumida nas etapas de demolição e transporte dos materiais demolidos.

$$ED = E_{eq} + E_{tr.dem} \quad (12)$$

Onde:

ED é a energia de desconstrução (kWh);

E_{eq} é a energia consumida por equipamentos na obra (kWh) (Equação 8);

$E_{tr.dem}$ é a energia consumida no transporte do material demolido até o aterro (kWh).

Para o cálculo da energia consumida no transporte do material demolido (Equação 13), foi considerada a distância de 50 km entre a obra e o aterro e o consumo energético referente ao transporte por caminhão basculante de 0,00045 kWh/kg.km (1,62 MJ/kg.km), conforme Tavares (2006).

$$E_{tr.dem} = E_{comb} \times M_{dem} \times D_{dem} \quad (13)$$

Onde:

$E_{tr.dem}$ é a energia consumida no transporte do desperdício de materiais (kWh);

E_{comb} é o consumo energético do transporte utilizado (kWh/kg.km);

M_{dem} é a massa do material demolido transportado (kg);

D_{dem} é a distância entre a obra e o aterro (km).

3.2.2. ACCV das diferentes tipologias de cobertura

Neste trabalho, a ACCV considerou o custo inicial, operacional, de manutenção e de desconstrução das coberturas. Os custos inicial, de manutenção e de demolição foram calculados considerando a área de cobertura de toda a edificação e, posteriormente, divididos

pelo número de apartamentos do pavimento. Este procedimento foi realizado, pois para determinar o quantitativo da estrutura metálica para telhas de fibrocimento (coberturas convencional e fria) é necessário saber o vão e o comprimento total da cobertura.

3.2.2.1. Custo inicial

O custo inicial corresponde ao custo de aquisição dos materiais da cobertura, de transporte dos materiais até a obra e de instalação. Considera-se que o custo para eventual transporte do desperdício está incluído no custo de instalação. Para o cálculo do custo inicial, foi utilizada a Equação 14. Os custos foram obtidos da tabela do Sistema Nacional e Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) e de mercado. Quando não abordado na SINAPI, o quantitativo de materiais e mão de obra foi realizado com base em Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO, 2010). Da mesma forma que para o cálculo da energia embutida inicial, foi considerada distância de 80 km entre a fábrica dos materiais e a obra e consumo de 1 L de óleo diesel a cada 3 km rodados referente ao transporte por caminhão basculante com capacidade de 10,5 t (Tavares, 2006).

$$CI = CI_{cob} + CI_{tr.mat} + CI_{mo.inst} \quad (14)$$

Onde:

CI é o custo inicial (R\$);

CI_{cob} é o custo atual dos materiais e equipamentos necessários para a montagem da cobertura (R\$);

$CI_{tr.mat}$ é o custo atual para transporte do material até a obra (R\$);

$CI_{mo.inst}$ é o custo atual com mão de obra para montagem da cobertura (R\$).

O custo de transporte foi avaliado exclusivamente com base no custo do combustível. A quantidade de caminhões necessária para o transporte (e consequentemente, o número de quilômetros rodados e o consumo de combustível) foi estimada considerando o peso dos materiais e a capacidade do caminhão basculante para todos os materiais, com exceção do poliestireno expandido. Devido à baixa densidade, a quantidade de caminhões para o transporte deste material considerou a capacidade volumétrica do caminhão, estimada em 6 m³.

3.2.2.2. Custo operacional

O custo operacional corresponde ao custo de energia com climatização da edificação durante o horizonte de tempo de 40 anos e, assim como para o cálculo da energia operacional, o custo com iluminação e equipamentos não foi considerado, visto que é equivalente entre as edificações com diferentes coberturas. O custo operacional foi calculado por meio da Equação 15, que leva em consideração a energia necessária para climatização da edificação e a tarifa de energia reajustada anualmente em cada cidade considerada.

$$CO = \sum_{t=1}^p (T_{e.an} \times E_{c.an}) \quad (15)$$

Onde:

CO é o custo operacional (R\$);

t é o ano em questão;

p é o número de anos avaliados (horizonte de tempo de 40 anos);

$T_{e.an}$ é a tarifa de energia elétrica no ano t (R\$);

$E_{c.an}$ é a energia anual necessária para climatização, obtida conforme seção 3.1.6.1 (kWh/ano).

A tarifa de energia elétrica foi reajustada anualmente por meio da taxa de reajuste anual. O valor adotado para essa taxa foi a média dos reajustes tarifários estabelecidos pela companhia de energia das cidades consideradas nos últimos cinco anos. O cálculo da tarifa de energia elétrica em cada ano t foi realizado por meio da Equação 16.

$$T_{e.an} = T_{e.atual} \times (1 + T_{e.reaj})^t \quad (16)$$

Onde:

$T_{e.an}$ é a tarifa de energia elétrica no ano t (R\$);

$T_{e.atual}$ é a tarifa de energia elétrica atual (R\$);

$T_{e.reaj}$ é a média dos reajustes de energia elétrica dos últimos cinco anos (% a.a.);

t é o ano em questão (ano).

3.2.2.3. Custo de manutenção

As atividades de manutenção consideradas durante o horizonte de tempo de 40 anos foram as descritas no Quadro 2. O custo de manutenção corresponde ao custo com os materiais utilizados na manutenção, com o transporte de materiais até a obra e com a instalação dos materiais na obra. O custo de manutenção foi calculado por meio da Equação 17. Os custos foram obtidos da tabela do Sistema Nacional e Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) e de mercado.

$$CM = \sum_{i=1}^m (CM_{cob} + CM_{tr.mat} + CM_{mo.inst}) \quad (17)$$

Onde:

CM é o custo de manutenção (R\$);

i é a atividade de manutenção em questão;

m é o número de atividades de manutenção;

CM_{cob} é o custo dos materiais utilizados na manutenção da cobertura (R\$);

CM_{tr.mat} é o custo do transporte dos materiais utilizados na manutenção até a obra (R\$);

CM_{mo.inst} é o custo com mão de obra para instalação dos materiais utilizados na manutenção na obra (R\$).

Os custos de manutenção com material, transporte e instalação foram determinados por meio das Equações 18, 19 e 20, respectivamente, e se diferem dos custos iniciais por considerarem a inflação e o reajuste salarial ao longo do tempo. A inflação adotada foi a média da inflação no Brasil nos últimos cinco anos e o reajuste salarial adotado foi a média do reajuste do salário mínimo brasileiro nos últimos cinco anos. Da mesma forma que para o cálculo da energia consumida no transporte dos materiais utilizados para manutenção, foi considerada distância de 80 km entre a fábrica dos materiais e a obra e consumo de 1 L de gasolina a cada 10 km rodados referente ao transporte por veículo utilitário (menor volume de materiais em comparação com a fase inicial). O custo do transporte foi estimado considerando o peso dos materiais e a capacidade do veículo utilitário.

$$CM_{cob} = CI_{cob} \times (1 + I)^t \quad (18)$$

$$CM_{tr.mat} = CI_{tr.mat} \times (1 + I)^t \quad (19)$$

$$CM_{mo.inst} = CI_{mo.inst} \times (1 + T_{inst.reaj})^t \quad (20)$$

Onde:

CM_{cob} é o custo dos materiais utilizados na manutenção da cobertura (R\$);

CI_{cob} é o custo atual dos materiais necessários para a cobertura (R\$);

I é a inflação média dos últimos cinco anos (% a.a.);

t é o ano em questão (ano);

$CM_{tr.mat}$ é o custo do transporte dos materiais utilizados na manutenção até a obra (R\$);

$CI_{tr.mat}$ é o custo atual para transporte do material até a obra (R\$);

$CM_{mo.inst}$ é o custo com mão de obra para instalação dos materiais utilizados na manutenção na obra (R\$);

$CI_{mo.inst}$ é o custo atual com mão de obra para montagem/instalação da cobertura (R\$);

$T_{inst.reaj}$ é a taxa média de reajuste do salário mínimo dos últimos cinco anos (% a.a.).

3.2.2.4. Custo de desconstrução

O custo de desconstrução (Equação 21) inclui o custo com a demolição da cobertura, transporte do material demolido e descarte desse material em aterro. O custo da demolição foi obtido da tabela do Sistema Nacional e Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) e de mercado. Quando não abordado na tabela do SINAPI, o quantitativo de materiais e mão de obra foi realizado com base em Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO, 2010). Da mesma forma que para o cálculo da energia consumida no transporte do material demolido, foi considerado distância de 50 km entre a obra e o aterro. O custo do transporte foi embutido no custo de descarte do material demolido, tendo em vista que o serviço inclui coleta em caçamba e transporte até o aterro.

$$CD = C_{eq} + C_{mo.dem} + C_{tr.dem} + C_{desc} \quad (21)$$

Onde:

CD é o custo de desconstrução (R\$);

C_{eq} é o custo com equipamentos para demolição (R\$);

$C_{mo.dem}$ é o custo com mão de obra para demolição (R\$);

$C_{tr.dem}$ é o custo com transporte do material demolido até o aterro (R\$);

C_{desc} é o custo com descarte dos materiais da cobertura em aterro (R\$).

Os custos de desconstrução com equipamentos, mão de obra, transporte e descarte foram determinados por meio das Equações 22, 23, 24 e 25, respectivamente.

$$C_{eq} = C_{eq.atual} \times (1 + I)^t \quad (22)$$

$$C_{mo.dem} = C_{mo.dem.atual} \times (1 + T_{inst.reaj})^t \quad (23)$$

$$C_{tr.dem} = C_{tr.dem.atual} \times (1 + I)^t \quad (24)$$

$$C_{desc} = C_{desc.atual} \times (1 + I)^t \quad (25)$$

Onde:

C_{eq} é o custo com equipamentos para demolição (R\$);

$C_{eq.atual}$ é o custo atual com equipamentos para demolição (R\$);

I é a inflação média dos últimos cinco anos (%);

t é o ano em questão (ano);

$C_{mo.dem}$ é o custo com mão de obra para demolição (R\$);

$C_{mo.dem.atual}$ é o custo atual com mão de obra para demolição (R\$);

$T_{inst.reaj}$ é a taxa média de reajuste do salário mínimo dos últimos cinco anos (%);

$C_{tr.dem}$ é o custo com transporte do material demolido até o aterro (R\$);

$C_{tr.dem.atual}$ é o custo atual com transporte do material demolido até o aterro (R\$);

C_{desc} é o custo com descarte dos materiais da cobertura em aterro (R\$);

$C_{desc.atual}$ é o custo atual com descarte dos materiais da cobertura em aterro (R\$).

3.2.2.5. Valor presente líquido

Para o cálculo do valor presente líquido (Equação 26), os custos de operação, manutenção e desconstrução calculados conforme as seções de 0 a 0 foram trazidos para valor presente utilizando uma taxa de desconto. A Taxa SELIC média dos últimos cinco anos (7,61% ao ano) (BCB, 2024) foi utilizada como taxa de desconto (ou taxa mínima de atratividade), pois considera-se que um valor não gasto em um dado momento poderia ser investido no mercado financeiro.

$$VPL = -CI - \sum_{t=1}^m \frac{[CO_t + CM_t + CD_t]}{(1+d)^t} \quad (26)$$

Onde:

VPL é o valor presente líquido (R\$);

CI é o custo inicial (R\$);

CO é o custo de operação (R\$);

CM é o custo de manutenção (R\$);

CD é o custo de desconstrução (R\$);

t é o ano em questão;

m é o número de anos avaliados (horizonte de tempo de 40 anos);

d é a taxa de desconto em número decimal.

O VPL das coberturas foi calculado variando os valores da taxa de desconto, reajuste da tarifa de energia elétrica, inflação e reajuste do salário mínimo entre -50% e +50% buscando abranger ao máximo as variações reais – estes valores foram inicialmente considerados como médias dos valores dos últimos cinco anos. Os valores da “taxa de desconto” e do “reajuste da tarifa de energia elétrica” foram alterados individualmente entre seus valores possíveis para verificar seu efeito no VPL, enquanto os demais valores de entrada foram mantidos constantes. Os valores de entrada da “inflação” e do “reajuste do salário mínimo” foram variados simultaneamente tendo em vista que ambos incidem sobre os custos de manutenção e desconstrução.

3.3. Definição da tipologia de cobertura mais adequada em cada contexto climático

Depois de avaliar as alternativas de cobertura por meio dos quatro parâmetros estabelecidos de forma isolada (energia consumida no ciclo de vida (kWh/m²), temperatura de pico da superfície externa (°C), custo total do ciclo de vida (R\$/m²) e número de horas de conforto térmico nos períodos de ocupação dos ambientes de permanência prolongada), as alternativas foram avaliadas considerando todos os parâmetros simultaneamente. Dessa forma, por meio de MCDM foi possível determinar a tipologia de cobertura mais sustentável em termos energéticos para cada clima considerado.

Inicialmente, foi aplicado um questionário a um painel de especialistas da área de construção civil, a fim de comparar a importância dos quatro parâmetros. Na sequência, uma

combinação dos métodos AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) foi utilizada para ponderar os parâmetros e selecionar a alternativa de cobertura mais sustentável do ponto de vista energético, devido a sua simplicidade e facilidade de aplicação (Guzmán-Sánchez *et al.*, 2018).

3.3.1. Questionário

Um questionário (Apêndice C) foi desenvolvido e encaminhado a um grupo de especialistas da área de construção civil. Algumas pesquisas desenvolvidas com metodologias similares consideraram grupos com pelo menos trinta especialistas (Motuziene *et al.*, 2016; Invidiata; Lavagna; Ghisi, 2018; Rosasco; Perini, 2019). Outros estudos adotaram um número menor de participantes (Canto-Perello *et al.*, 2015; Carrera *et al.*, 2022; Ekmekcioğlu, 2023; Loikkanen; Lahdelma; Salminen, 2017; Mahdiyar *et al.*, 2019). O painel foi formado por projetistas (engenheiros ou arquitetos) e por pesquisadores com experiência em construção sustentável.

No início do questionário, foram apresentadas informações gerais sobre o objetivo do estudo e instruções para responder às questões. Em seguida, uma breve definição dos indicadores foi fornecida. Por fim, foram apresentados questionamentos em que os especialistas tiveram que expressar suas opiniões sobre a importância relativa dos parâmetros. Para isso, foi utilizada a escala de Saaty (1990) apresentada na seção 2.6, que varia de 1 (importância equivalente de dois parâmetros) a 9 (importância extrema de um parâmetro com relação a outro). As respostas obtidas foram utilizadas para ponderar os quatro parâmetros, conforme sua importância relativa.

3.3.2. Ponderação dos parâmetros de avaliação

A ponderação dos parâmetros foi realizada por meio do método AHP, que expressa os resultados das comparações obtidas do questionário na forma matricial. A matriz gerada neste trabalho foi uma matriz quadrada 4x4, em que as linhas e colunas correspondem aos quatro parâmetros de avaliação, conforme Figura 13.

Figura 13 - Matriz utilizada no método AHP para ponderar os parâmetros de avaliação

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & 1 & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Onde:

a_{ij} é a importância relativa de um parâmetro i em relação a outro parâmetro j ;

n é o número de parâmetros.

Nesta matriz, se $a_{ij} = a$, então $a_{ji} = 1/a$, ou seja, se um parâmetro i apresenta um determinado valor “a” quando comparado com outro parâmetro j , então j tem o valor inverso quando comparado com i . Além disso, a condição $a_{ii} = 1$ deve ser satisfeita, ou seja, a diagonal principal da matriz deve ser formada por números “um”.

A partir da matriz gerada, pôde-se calcular o vetor de prioridades que indicou a ponderação de cada um dos parâmetros de avaliação. Para isso, foram seguidas as etapas: (1) somatório dos valores de importância relativa registrados em cada coluna da matriz A ; (2) criação de uma nova matriz normalizada, em que cada elemento é dado pelo elemento da matriz A dividido pelo somatório de sua respectiva coluna; e (3) cálculo da prioridade por meio da média aritmética dos elementos de cada linha da matriz normalizada. É gerado, então, o vetor de prioridades, em que o resultado de cada linha corresponde ao valor de ponderação de cada parâmetro. A soma dos elementos desse vetor é igual a um.

Depois de calcular os valores de ponderação de cada parâmetro, as comparações realizadas entre os parâmetros na matriz A foram validadas por meio da razão de consistência (*consistency ratio*, CR), calculada por meio da Equação 27.

$$CR = \frac{\frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}}{RI} < 0,10 \quad (27)$$

Onde:

$\lambda_{\max}$ é o maior autovalor da matriz de julgamentos;

n é a ordem da matriz;

RI é o índice de consistência randômico.

O RI é um valor dado em função da ordem da matriz A (número de parâmetros considerados), conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Índice de consistência randômico (RI) em função da ordem da matriz

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Para cada especialista cujas respostas foram consideradas válidas (razão de consistência inferior a 0,10), o método AHP forneceu os pesos relativos de cada parâmetro. A ponderação a ser utilizada para selecionar a alternativa de cobertura mais sustentável foi obtida por meio da média dos pesos atribuídos por cada especialista, refletindo o ponto de vista de todo o grupo.

Para investigar a influência dos pesos dos parâmetros nos resultados, uma análise de sensibilidade foi realizada considerando quatro cenários alternativos de ponderação dos parâmetros. Dessa forma, os pesos dos parâmetros definidos pelo método AHP foram modificados, estabelecendo a preponderância de um dos parâmetros, cujo peso foi fixado em 0,40, enquanto o peso dos demais foi considerado 0,20.

3.3.3. Seleção da alternativa mais sustentável em termos energéticos

A avaliação das alternativas em todos os parâmetros ponderados pelo AHP de forma simultânea foi feita por meio do TOPSIS. Nesse método, é construída uma matriz D, que se refere à avaliação das m alternativas em cada um dos n parâmetros (Figura 14).

Nesse estudo, as alternativas são as seis tipologias cobertura: convencional, fria e verde sem e com isolamento. Os parâmetros de avaliação são representados por quatro variáveis: energia consumida no ciclo de vida, temperatura de pico da superfície externa das coberturas, custo do ciclo de vida e horas de conforto térmico dos usuários na configuração de ventilação durante os períodos ocupados (Figura 8).

Figura 14 - Matriz utilizada no método TOPSIS para selecionar a melhor alternativa com base em múltiplos critérios

$$D = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & \dots & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{m1} & X_{m2} & X_{m3} & \dots & X_{mn} \end{pmatrix}$$

Onde:

x_{ij} é o desempenho da alternativa i com relação ao parâmetro j ;

m é o número de alternativas;

n é o número de parâmetros.

Para determinar a melhor alternativa com base em múltiplos critérios que não possuem igual peso, o método segue as etapas descritas na sequência.

i. Construção da matriz normalizada R: esse processo transforma os desempenhos dimensionais das alternativas em cada parâmetro em valores adimensionais por meio da Equação 28.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (28)$$

Onde:

r_{ij} é o elemento normalizado da matriz R;

x_{ij} é desempenho da alternativa i com relação ao parâmetro j ;

m é o número de alternativas.

ii. Construção da matriz normalizada com pesos V: os pesos atribuídos à cada parâmetro por meio do método AHP são multiplicados pelos elementos da matriz normalizada, conforme a Equação 29.

$$v_{ij} = w_j \times r_{ji} \quad (29)$$

Onde:

v_{ij} é o elemento normalizado com peso da matriz P;

w_j é o peso para o parâmetro j ;

r_{ij} é o elemento normalizado da matriz R.

iii. Determinação da solução ideal positiva (A^+) e ideal negativa (A^-): são escolhidos os melhores desempenhos em cada critério; para parâmetros de benefício, deseja-se o maior valor entre as alternativas e para parâmetros de custo/ perda, deseja-se o menor valor entre as alternativas. Em seguida, são criadas alternativas fictícias, os vetores A^+ e A^- , que indicam a melhor alternativa (solução ideal) e a pior alternativa (solução ideal negativa), respectivamente, conforme as Equações 30 e 31.

$$A^+ = \{(\max v_{ij} \mid j \in J), (\min v_{ij} \mid j \in J'), i = 1, 2, 3, \dots, m\} = \{v_{1+}, v_{2+}, \dots, v_{n+}\} \quad (30)$$

$$A^- = \{(\min v_{ij} \mid j \in J), (\max v_{ij} \mid j \in J'), i = 1, 2, 3, \dots, m\} = \{v_{1-}, v_{2-}, \dots, v_{n-}\} \quad (31)$$

Onde:

A^+ é a solução ideal positiva;

A^- é a solução ideal negativa;

$J = \{j = 1, 2, 3, \dots, n \text{ e } j \text{ é associado ao critério de benefício}\}$;

$J' = \{j = 1, 2, 3, \dots, n \text{ e } j \text{ é associado ao critério de custo/perda}\}$;

v_{ij} é o elemento normalizado com peso da matriz P;

n é o número de parâmetros;

m é o número de alternativas.

iv. Cálculo da distância Euclidiana entre cada alternativa e as soluções ideais positivas e negativas por meio das Equações 32 e 33.

$$Si^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (32)$$

$$Si^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (33)$$

Onde:

Si^+ é a distância Euclidiana entre a alternativa i e a solução ideal positiva;

Si^- é a distância Euclidiana entre a alternativa i e a solução ideal negativa;

v_{ij} é o elemento normalizado com peso da matriz V ;

v_j^+ é a solução ideal positiva no parâmetro j ;

v_j^- é a solução ideal negativa no parâmetro j .

v. Cálculo da proximidade com a solução ideal por meio da Equação 34.

$$Ci^+ = \frac{Si^-}{Si^+ + Si^-} \quad (34)$$

Onde:

Ci^+ é a proximidade de uma alternativa com a solução ideal;

Si^+ é a distância Euclidiana entre a alternativa i e a solução ideal positiva;

Si^- é a distância Euclidiana entre a alternativa i e a solução ideal negativa.

vi. Classificação das alternativas com base na proximidade com a solução ideal (Ci^+):
a melhor alternativa é aquela que é mais próxima da solução ideal, ou seja, aquela que apresenta o maior valor de Ci^+ .

4. Resultados e discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio da aplicação do método proposto.

4.1. Simulação computacional

Os resultados obtidos por meio da simulação computacional de um apartamento localizado no último pavimento de uma edificação multifamiliar são apresentados nesta seção. A energia de climatização foi utilizada no cálculo do parâmetro ACVE, a temperatura de pico da superfície externa foi utilizada como indicativo da influência das coberturas em termos de ilhas de calor e o número de horas de conforto térmico foi a variável utilizada para avaliar o parâmetro conforto térmico.

4.1.1. Energia de resfriamento e aquecimento

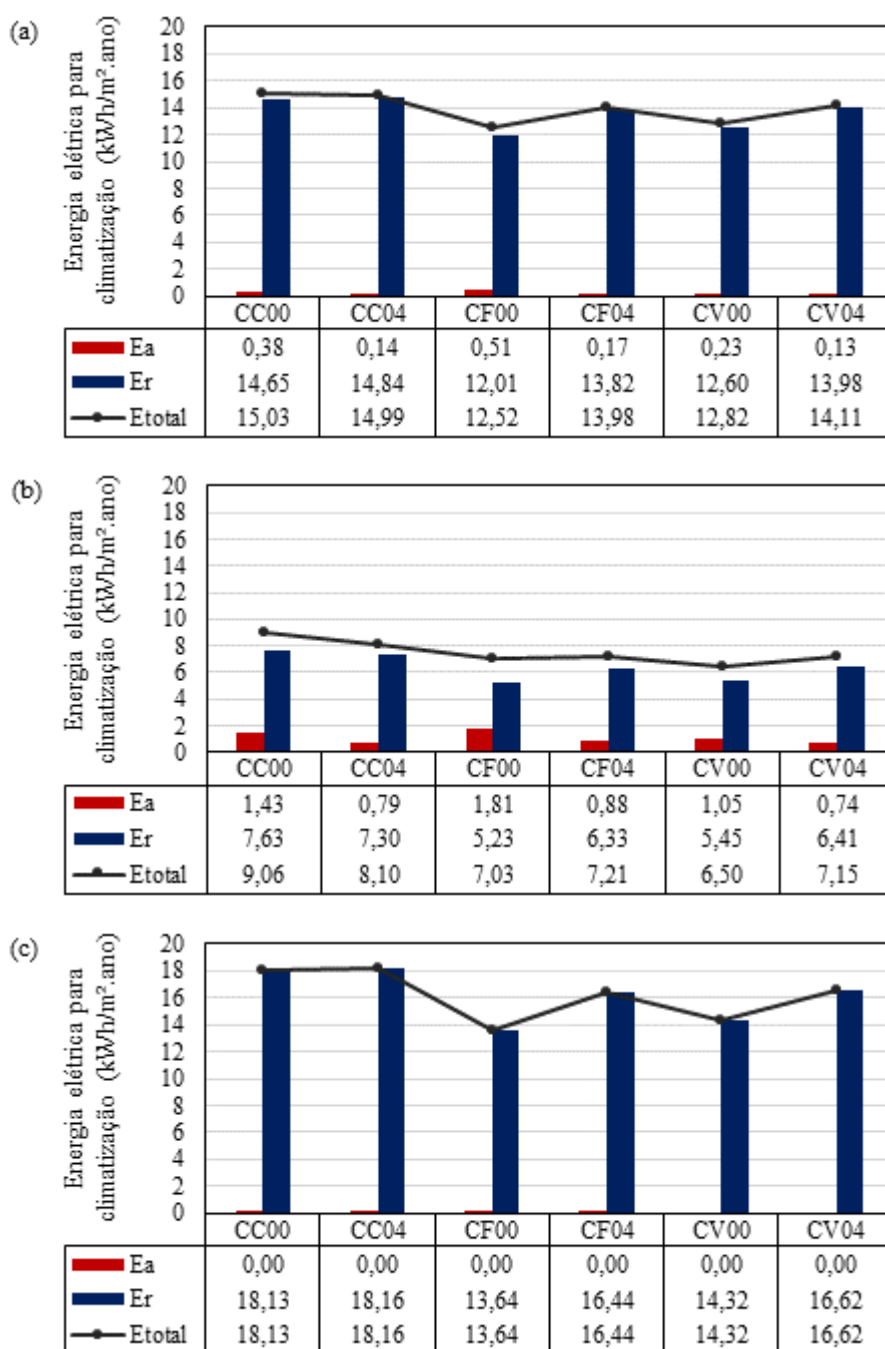
A Figura 15 apresenta o consumo anual de energia elétrica com aquecimento e resfriamento da edificação, por metro quadrado de área dos ambientes climatizados. Os resultados obtidos são influenciados pelo coeficiente de eficiência energética do sistema de condicionamento de ar adotado, descrito na seção 3.1.6.1.

Em Florianópolis, cidade de clima úmido o ano todo e com verão quente, as soluções mais eficientes foram as coberturas fria e a verde, ambas sem isolamento, reduzindo o consumo anual de energia elétrica em 16,7% e 14,7%, respectivamente, em comparação com a cobertura convencional sem isolamento. Apesar de a cobertura fria aumentar a energia necessária para o aquecimento, reduziu a energia necessária para o resfriamento (preponderante nesta localidade).

Comparando as coberturas com adição de camada de isolamento (CC04, CF04 e CV04), observa-se que as coberturas fria e verde apresentaram melhor desempenho que a cobertura convencional. As reduções no consumo de energia elétrica anual em comparação com a cobertura convencional com isolamento ficaram entre 5,9% e 6,7%. Apesar de a camada de isolamento em todas as tipologias de cobertura ter contribuído com a redução da energia necessária para aquecimento, aumentou a energia necessária para resfriamento (preponderante) com a utilização das coberturas fria e verde, e manteve valor similar no caso da cobertura convencional. Anualmente, com a utilização do isolamento, o consumo de eletricidade aumentou nos casos com cobertura fria e verde (11,7% e 10,1%, respectivamente), e se manteve inalterado com cobertura convencional. Dessa forma, do ponto de vista do consumo energético

com climatização, a utilização de camada de isolamento em coberturas não é recomendável em edificações multifamiliares com as características consideradas no contexto de Florianópolis.

Figura 15 - Consumo de energia elétrica com climatização por área dos ambientes climatizados do apartamento com a utilização das coberturas convencional, fria e verde em (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília



Abreviações: energia elétrica para aquecimento (Ea), energia elétrica para resfriamento (Er), cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04). Nota: foram climatizados a sala e os dormitórios.

Em Curitiba, que possui o clima mais frio dentre as cidades avaliadas, verifica-se maior consumo de energia elétrica com aquecimento e menor consumo energético anual, se comparado com Florianópolis. Neste contexto climático, o consumo de energia elétrica com climatização também foi menor com a utilização das coberturas fria e verde (redução de 22,3% e 28,2% em relação à cobertura convencional sem isolamento, respectivamente). Comparadas com a cobertura convencional (CC00), ambas as tipologias de cobertura reduziram o consumo com resfriamento em cerca de 30%. No entanto, com a utilização da cobertura fria, o consumo com aquecimento aumentou em 26,3% devido à redução do ganho de calor solar. Por outro lado, a cobertura verde reduziu este consumo em 26,5% devido ao isolamento fornecido principalmente pela camada de substrato.

No clima de Curitiba, a utilização de uma camada de isolamento térmico nas coberturas fria e verde também reduziu o consumo com aquecimento e aumentou o consumo com resfriamento, bem como aumentou o consumo anual de energia (em 2,5% para o caso da cobertura fria e 10,0% para a verde). Entretanto, no caso da cobertura convencional, o isolamento contribuiu com a redução do consumo tanto de aquecimento, quanto de resfriamento, reduzindo em 10,6% o consumo anual de energia com climatização. Mesmo assim, comparando as soluções com isolamento entre si, verifica-se que as coberturas fria e verde reduzem o consumo energético anual em aproximadamente 11,0% com relação à cobertura convencional. Considerando o clima de Curitiba, do ponto de vista do consumo de energia elétrica com climatização, a utilização do isolamento é recomendada apenas na cobertura convencional.

Na cidade de Brasília, caracterizada por clima seco com temperaturas amenas mesmo durante o inverno, o consumo de energia elétrica para aquecimento pode ser considerado nulo. As coberturas fria e verde também foram as que apresentaram o melhor desempenho, reduzindo o consumo anual de energia elétrica em, respectivamente, 24,8% e 21,0% em comparação com a cobertura convencional sem isolamento.

No clima de Brasília, a adição de uma camada de isolamento térmico nas coberturas frias e verde aumentou o consumo de eletricidade com resfriamento, e consequentemente o consumo anual (aumento de 20,6% e 16,1% no caso das coberturas fria e verde, respectivamente). Na cobertura convencional, a utilização do isolamento não teve influência sobre o consumo de energia, da mesma forma que em Florianópolis. Dessa forma, o isolamento térmico também não é recomendado para a redução do consumo de energia elétrica com

climatização de edificações residenciais multifamiliares com as características consideradas em Brasília, sendo irrelevante ou até mesmo elevando o consumo, conforme a tipologia de cobertura adotada.

Considerando a tipologia da edificação adotada neste estudo e as características da envoltória dessa edificação e dos climas analisados, observou-se que as coberturas fria e verde sem isolamento apresentam os melhores desempenhos energéticos. Em Florianópolis e Brasília, cidades com temperaturas médias anuais mais elevadas, a utilização da cobertura fria apresenta desempenho ligeiramente superior, podendo reduzir o consumo anual de energia com climatização em 5,0% em comparação com a cobertura verde. A cobertura fria mantém a superfície da cobertura mais resfriada em comparação à cobertura convencional e irradia o calor armazenado, principalmente à noite, reduzindo o fluxo de calor para o interior da edificação. Esta conclusão é coerente com estudos de outros autores (Sailor; Elley; Gibson, 2012; Silva; Gomes; Silva, 2016). Em Curitiba, cidade de clima mais frio, onde é menor a necessidade de resfriamento e maior a de aquecimento se comparada a Florianópolis e Brasília, a cobertura verde é a solução mais eficiente (reduzindo em 7,6% o consumo anual de energia elétrica em comparação com a cobertura fria). Em dias frios, o substrato da cobertura verde fornece isolamento. Em dias quentes, a cobertura se beneficia da vegetação, que limita a entrada de cargas térmicas devido à radiação solar e à temperatura do ar.

Em todas as tipologias de cobertura e cidades avaliadas, o isolamento contribuiu com a redução da energia necessária para o aquecimento, quando existente. Isso aconteceu, pois as perdas de calor por parte do ambiente interno foram reduzidas nos dias frios. Por outro lado, nos dias quentes, a adição de uma camada de isolamento, apesar de possibilitar a redução do fluxo de calor da cobertura para o interior da edificação durante o dia, dificultou o resfriamento noturno (pois diminuiu o fluxo de calor no sentido inverso durante a noite). Dessa forma, as temperaturas dos ambientes internos permaneceram elevadas mesmo durante o dia.

Na cobertura convencional, a presença do isolamento pouco influenciou a energia necessária para resfriamento do apartamento nos contextos climáticos avaliados. No caso das coberturas fria e verde, o isolamento aumentou a energia necessária para resfriamento em todas as localidades. Estas tipologias apresentam a característica de reduzir a entrada de calor na edificação através da cobertura (seja pela alta refletância e emitância no caso das coberturas frias, ou pelo papel do sombreamento e da evapotranspiração no caso das coberturas verdes). Nestes casos, o isolamento extra fornecido pela adição de poliestireno expandido não auxiliou

na redução da energia necessária para o resfriamento ao longo do ano. Além disso, a presença do isolamento dificultou a saída de calor interno – gerado por pessoas, equipamentos e iluminação – nas noites de verão.

Os resultados encontrados com a adição de isolamento na cobertura verde são similares aos observados por Vera *et al.* (2017). Por outro lado, em seu trabalho, Silva, Gomes e Silva (2016) reportaram que a adição de isolamento térmico reduziu a energia necessária ao resfriamento em coberturas extensivas e semi-intensivas, mas aumentou em coberturas intensivas, que possuem alto IAF e altura da vegetação. Entretanto, nesta pesquisa, o IAF e a altura da vegetação têm valores maiores comparados aos considerados pelos referidos autores para as coberturas extensivas e semi-intensivas, corroborando com o fato de que coberturas verdes isoladas com maiores valores de IAF e altura da vegetação não aproveitam ao máximo os efeitos de resfriamento e evaporação.

Considerando as áreas dos ambientes de permanência prolongada (sala e dormitórios) do apartamento em estudo, a cobertura fria sem isolamento reduziria o consumo de energia elétrica com climatização em 91,0 kWh/ano e a cobertura verde sem isolamento em 79,9 kWh/ano em comparação com a cobertura convencional sem isolamento, no contexto de Florianópolis. Em Curitiba, as reduções seriam de 73,2 kWh/ano e 92,5 kWh/ano com a cobertura fria e a verde, respectivamente. As maiores reduções aconteceriam no contexto de Brasília, 162,5 kWh/ano com a cobertura fria e 137,9 kWh/ano com a verde.

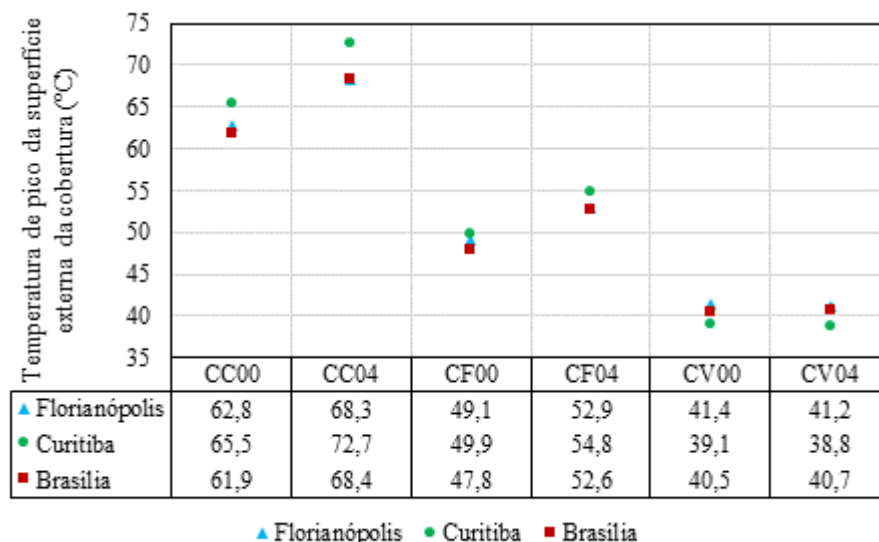
Em todos os contextos climáticos, mesmo com a consideração de isolamento térmico, a cobertura convencional apresentou desempenho inferior ao das coberturas fria e verde.

4.1.2. Temperatura da superfície externa

As temperaturas de pico da superfície externa das coberturas foram registradas em horários diferentes, em dias diferentes ou até mesmo em meses diferentes, dependendo da cobertura. No entanto, ao comparar as tipologias de cobertura, o padrão de comportamento foi semelhante ao longo do ano e, portanto, somente o valor máximo de temperatura foi utilizado na análise multicritério. Os perfis horários de temperatura da superfície externa das coberturas durante o ano são apresentados no Apêndice D. A Figura 16 apresenta a temperatura de pico da superfície externa das coberturas (considerando valores horários), com e sem isolamento, nos três contextos climáticos. A temperatura mais alta alcançada pela superfície das coberturas ao longo

do ano simulado foi equivalente nos cenários simulados com ventilação natural durante os períodos ocupados e com ar-condicionado.

Figura 16 - Temperatura de pico da superfície externa das coberturas convencional, fria e verde no contexto climático de Florianópolis, Curitiba e Brasília



Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Considerando as coberturas sem isolamento térmico, observou-se que a cobertura convencional atingiu as maiores temperaturas da superfície externa (entre 61,9°C e 65,5°C), enquanto a cobertura verde, os menores valores (entre 39,1°C e 41,4°C). A cobertura fria atingiu valores de temperatura da superfície externa intermediários, variando entre 47,8°C e 49,9°C. Os resultados corroboram com Gagliano *et al.* (2015; 2016), que consideraram absorptância solar da cobertura fria igual a 0,45 – valor similar ao adotado neste trabalho (0,42) – e IAF da vegetação igual a 5,0 – valor ainda maior ao adotado neste trabalho (3,0). As características de projeto das coberturas fria e verde são fundamentais para a análise dos resultados. Situações que consideram menores valores de absorptância solar para coberturas frias (por exemplo, 0,2) e menores valores de IAF para as coberturas verdes (como 2,0), podem encontrar resultados favoráveis às coberturas frias (Costanzo; Evola; Marletta, 2016).

A utilização de uma camada de isolamento aumentou as temperaturas de pico da superfície externa das coberturas convencional e fria entre 3,8°C e 7,2°C e não exerceu influência sobre a temperatura da superfície externa das coberturas verdes (média entre a

temperatura da vegetação e do substrato). O aumento da resistência térmica nas coberturas convencional e fria dificultou a transferência de calor através da cobertura em períodos quentes, elevando a temperatura da superfície externa das coberturas. As coberturas verdes se beneficiam dos efeitos de sombreamento e refletividade da vegetação (Gagliano *et al.*, 2015; 2016).

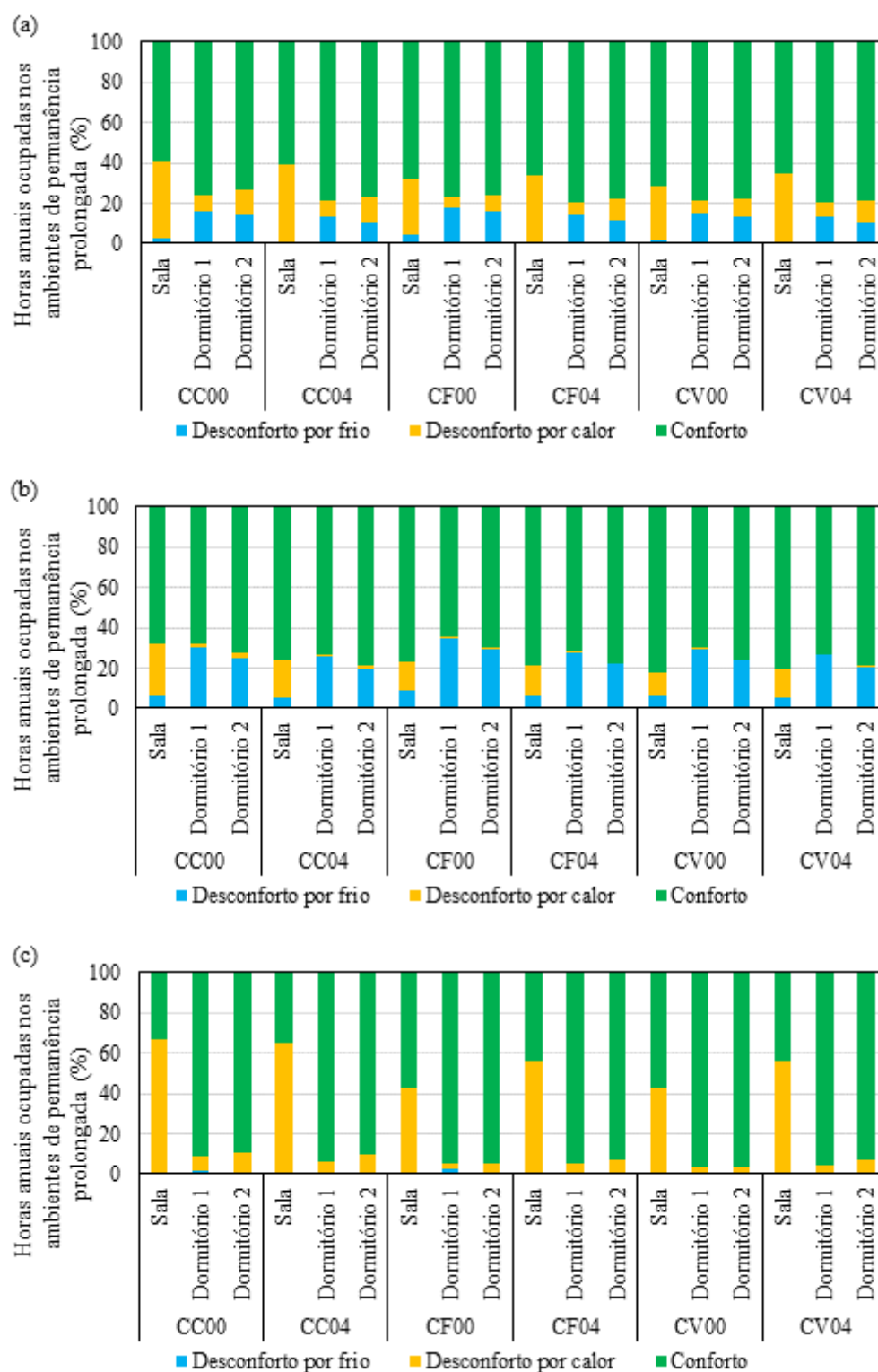
Os resultados mostram que as coberturas verde e fria são soluções para reduzir a temperatura da superfície externa das coberturas e o fluxo de calor sensível liberado para o ambiente externo, contribuindo com a mitigação dos efeitos das ilhas de calor em todos os contextos climáticos analisados. O fluxo de calor sensível (convecção) entre a superfície externa das coberturas e o ambiente externo plotado para três dias de verão é apresentado no Apêndice E. Com relação ao isolamento térmico, sua utilização não é adequada do ponto de vista das ilhas de calor, pois aumenta a temperatura da superfície externa das coberturas convencional e fria na medida em que dificulta a transferência de calor para as camadas inferiores da cobertura, e é irrelevante no caso da cobertura verde.

4.1.3. Conforto térmico

Na Figura 17 é apresentado o percentual de horas anuais de conforto térmico, e o percentual de horas anuais de desconforto térmico por calor e por frio nos ambientes de permanência prolongada. Nesta seção, os resultados referem-se à condição de ventilação natural durante os períodos ocupados, ou seja, as janelas foram consideradas abertas em todos os períodos de ocupação dos ambientes de permanência prolongada, conforme o cronograma apresentado na Figura 8.

Dentre as cidades avaliadas, Curitiba foi a que apresentou os menores percentuais de desconforto térmico por calor e os maiores percentuais de horas de desconforto por frio, devido as menores temperaturas da cidade no inverno. Com relação aos ambientes de permanência prolongada, em Florianópolis e em Brasília, cidades com maiores temperaturas médias anuais, observou-se que a sala apresentou menor percentual de horas de conforto térmico se comparada aos dormitórios, com todas as tipologias de coberturas. A sala possui ocupação diurna e noturna (14 às 22h), janela orientada para o norte e nesse ambiente predomina o desconforto por calor. Observa-se, dessa maneira, o papel relevante da envoltória vertical, em particular a superfície envidraçada.

Figura 17 - Horas anuais de conforto térmico nos ambientes de permanência prolongada com a utilização das coberturas convencional, fria e verde em (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília



Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Considerando o contexto de Florianópolis e coberturas sem isolamento, o caso com cobertura verde apresentou os maiores percentuais de horas de conforto térmico no ano (71,2% na sala, 78,8% no dormitório 1 e 78,0% no dormitório 2). No mesmo contexto, o caso com cobertura convencional foi o que resultou nos menores percentuais de horas de conforto térmico (59,3% na sala, 75,8% no dormitório 1 e 73,3% no dormitório 2). O caso com cobertura fria apresentou desempenho intermediário (67,9% de horas de conforto térmico na sala, 76,9% no dormitório 1 e 75,8% no dormitório 2), pois apesar de reduzir as horas de desconforto por calor, aumentou as horas de desconforto por frio em comparação com a cobertura convencional. Esse comportamento é coerente com o maior valor de refletância solar (Synnefa; Santamouris; Akbari, 2007; Guo *et al.*, 2020).

A utilização de uma camada de isolamento na cobertura localizada em Florianópolis proporcionou pequeno aumento (até 4,3%) no percentual de horas anuais de conforto térmico, exceto na sala quando considerado o uso de cobertura fria ou verde. Nesse ambiente, a ocupação acontece durante o período da tarde e da noite (14 às 22h) e é preponderante o desconforto por calor. Nos dormitórios, ambiente de ocupação predominantemente noturna (22 às 08h), onde predomina o desconforto por frio ou as horas de desconforto por frio são similares às horas de desconforto por calor, a utilização do isolamento em todas as coberturas aumentou as horas anuais de conforto térmico.

Em Curitiba, dentre as tipologias de cobertura sem isolamento térmico, a cobertura verde também proporcionou maior percentual de horas anuais de conforto térmico nos ambientes de permanência prolongada (82,2% na sala, 69,8% no dormitório 1 e 75,6% no dormitório 2). Em comparação com a cobertura convencional, a cobertura fria aumenta as horas de desconforto por frio, apesar de reduzir as horas de desconforto por calor. Anualmente, a cobertura fria aumentou o percentual de horas de conforto térmico na sala de 68,0% para 77,1%, mas reduziu o percentual de horas de conforto térmico de 67,7% para 64,1% no dormitório 1 e de 72,8% para 69,5% no dormitório 2, em comparação com o caso com cobertura convencional. Isso aconteceu, pois em Curitiba, o desconforto nos dormitórios ocorre predominantemente por frio e, nesse caso, a cobertura fria não apresenta vantagem em comparação com a cobertura convencional.

Nesse contexto climático, a adição de isolamento nas coberturas resultou em aumento mais expressivo (até 10,4%) do percentual de horas anuais de conforto térmico, com exceção do ambiente da sala quando considerado o uso de cobertura verde. Em todas as tipologias de

cobertura, a camada de isolamento contribuiu com a redução das horas de desconforto por frio, mas aumentou as horas de desconforto por calor.

Em Brasília, considerando as coberturas sem isolamento, os maiores percentuais de horas de conforto térmico foram observados no caso com cobertura verde (57,3% na sala, 96,3% no dormitório 1 e 96,1% no dormitório 2). Horas percentuais de conforto térmico ligeiramente inferiores foram encontradas para o caso com cobertura fria (56,8% na sala, 94,3% no dormitório 1 e 94,9% no dormitório 2). O caso com cobertura convencional apresentou os menores percentuais de horas de conforto térmico, principalmente quanto ao conforto na sala. Anualmente, os percentuais de conforto térmico com a cobertura convencional foram de 33,3% na sala, 91,3% no dormitório 1 e 89,4% no dormitório 2.

Considerando o clima de Brasília, a adição de isolamento térmico aumentou o percentual de horas anuais de conforto térmico em todos os ambientes de permanência prolongada no caso da cobertura convencional (até 4,8%), mas diminuiu ou pouco influenciou nos casos das coberturas fria e verde. Em Brasília, as temperaturas são mais elevadas durante todo o ano e em todos os ambientes de permanência prolongada as horas de desconforto térmico ocorrem quase totalmente por calor. Quando coberturas frias ou verdes são utilizadas, o resfriamento dos ambientes (e a redução do desconforto por calor) é resultante de características da própria cobertura e, nesses casos, a adição de isolamento térmico exerce pouca influência, podendo até mesmo prejudicar o desempenho dessas coberturas na medida em que dificulta a saída de calor interno.

De modo geral, com relação ao conforto térmico, observou-se que a cobertura verde apresentou melhor desempenho se comparada às coberturas convencional e fria em todas as cidades. Esse resultado vai de encontro ao observado por Gagliano *et al.* (2015) na cidade italiana de Catania, caracterizada por inverno ameno e verão quente e longo. A consideração de uma camada de isolamento térmico reduz o desconforto por frio, mas pode aumentar o desconforto por calor devido ao superaquecimento dos ambientes e à dificuldade de dissipação do calor para o meio externo, principalmente em ambientes onde o desconforto por calor é mais significativo (como é o caso da sala, neste trabalho).

A utilização de isolamento térmico na cobertura convencional aumentou o percentual de horas de conforto térmico nos ambientes de permanência prolongada nos três contextos climáticos analisados. Nas coberturas fria e verde, o isolamento em alguns casos melhorou e em outros prejudicou o conforto térmico dos usuários, conforme o horário de ocupação do

ambiente e o contexto climático considerado. Com a utilização dessas coberturas, em geral, observou-se que o isolamento reduz o percentual de horas em conforto térmico em ambientes onde desconforto térmico ocorre predominantemente por calor (neste caso, a sala) e em contextos climáticos que provocam desconforto térmico predominantemente por calor (neste caso, o clima de Brasília).

Além da influência da tipologia da cobertura, buscou-se investigar se o padrão de abertura de janelas afeta o conforto térmico dos usuários. Para esta análise, foi escolhido o contexto de Florianópolis. O percentual de horas anuais de conforto e desconforto térmico nos ambientes de permanência prolongada em função da configuração de ventilação natural simulada em Florianópolis é apresentado na Tabela 11. O percentual de conforto e desconforto foi calculado considerando somente os períodos ocupados em cada ambiente (a sala é ocupada durante 2.864 horas no ano e os dormitórios, 3.580 horas).

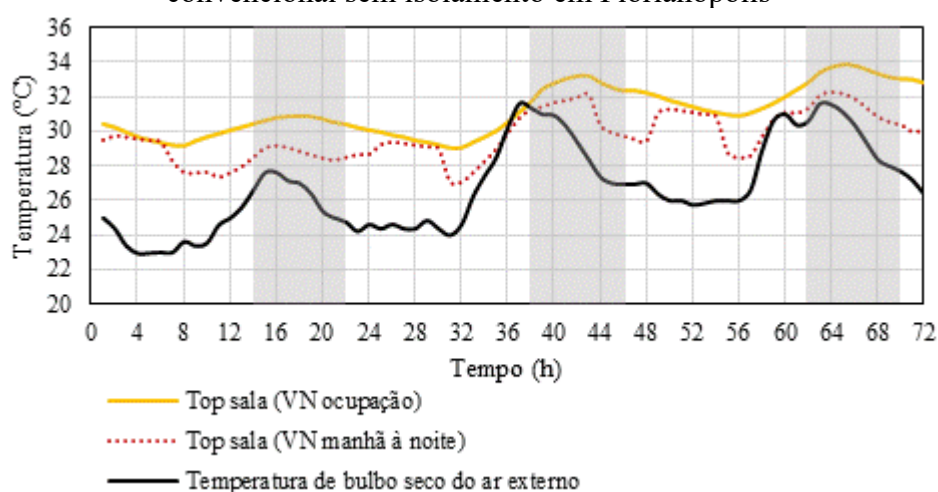
Em todas as configurações de ventilação natural, a influência da tipologia de cobertura sobre o percentual de horas de conforto térmico foi mais expressiva na sala (ocupação no período da tarde e início da noite). Nesse ambiente, o percentual de horas de conforto variou conforme a cobertura entre 59,3% a 71,2% com a configuração de ventilação natural durante os períodos de ocupação, entre 71,5% e 78,8% com ventilação natural de manhã à noite e entre 61,1% e 70,9% considerando ventilação natural noturna. Nos dormitórios (ocupação noturna), a consideração de diferentes tipologias de cobertura resultou em variações menores no percentual de horas de conforto térmico, independentemente da configuração de ventilação natural simulada.

Tabela 11 - Percentual de horas anuais de conforto e desconforto térmico nos ambientes de permanência prolongada em função da configuração de ventilação natural com a utilização das coberturas convencional, fria e verde em Florianópolis

Tipologia de cobertura	Ambiente	Ventilação durante os períodos de ocupação (conforme Figura 8)				Ventilação de manhã à noite (06:00 - 24:00)				Ventilação noturna (18:00 - 24:00)			
		Horas de conforto (%)	Horas de desconforto (%)			Horas de conforto (%)	Horas de desconforto (%)			Horas de conforto (%)	Horas de desconforto (%)		
			Total	Frio	Calor		Total	Frio	Calor		Total	Frio	Calor
CC00	Sala	59,3	40,7	2,9	37,8	71,5	28,5	10,6	17,8	61,1	38,9	5,1	33,7
	Dormitório 1	75,8	24,2	15,9	8,3	75,0	25,0	18,1	6,9	76,3	23,7	13,3	10,5
	Dormitório 2	73,3	26,7	14,0	12,7	73,0	27,0	15,5	11,4	72,0	28,0	11,0	17,0
CC04	Sala	61,1	38,9	0,8	38,1	76,2	23,8	9,5	14,3	64,6	35,4	2,9	32,5
	Dormitório 1	78,8	21,2	13,4	7,8	78,1	21,9	15,7	6,2	79,3	20,7	9,9	10,8
	Dormitório 2	76,6	23,4	11,0	12,4	75,8	24,2	13,5	10,6	75,5	24,5	5,8	18,7
CF00	Sala	67,9	32,1	4,7	27,4	75,9	24,1	12,4	11,7	69,4	30,6	6,6	24,0
	Dormitório 1	76,9	23,1	17,4	5,7	74,9	25,1	20,4	4,6	78,3	21,7	15,3	6,4
	Dormitório 2	75,8	24,2	16,1	8,2	74,5	25,5	18,3	7,3	75,3	24,7	13,1	11,6
CF04	Sala	65,7	34,3	1,1	33,2	77,7	22,3	10,3	12,0	67,4	32,6	3,4	29,2
	Dormitório 1	79,3	20,7	14,1	6,6	78,4	21,6	16,3	5,4	80,8	19,2	10,5	8,7
	Dormitório 2	77,4	22,6	11,8	10,8	77,0	23,0	14,1	9,0	77,5	22,5	6,6	15,8
CV00	Sala	71,2	28,8	2,0	26,8	78,7	21,3	11,1	10,2	70,9	29,1	4,7	24,4
	Dormitório 1	78,8	21,2	15,4	5,8	77,9	22,1	17,2	4,9	80,8	19,2	11,5	7,7
	Dormitório 2	78,0	22,0	13,2	8,7	77,0	23,0	14,7	8,3	77,6	22,4	8,5	13,8
CV04	Sala	65,7	34,3	0,8	33,6	78,8	21,2	9,7	11,6	67,7	32,3	3,0	29,4
	Dormitório 1	79,9	20,1	13,4	6,6	79,0	21,0	15,5	5,5	81,3	18,7	9,4	9,2
	Dormitório 2	78,5	21,5	10,7	10,8	77,2	22,8	13,5	9,3	77,5	22,5	5,5	17,0

Alterando a configuração de ventilação durante os períodos ocupados para ventilação de manhã à noite, em todos os casos, o percentual anual de horas de conforto aumentou notavelmente na sala e diminuiu (mas de forma pouco expressiva) nos dormitórios. Na sala, independentemente da tipologia de cobertura, o desconforto por calor diminuiu ao longo do ano devido à consideração da ventilação também no período matutino, que contribuiu com a redução da temperatura operativa desse ambiente. Para ilustrar, a Figura 18 apresenta o perfil de temperatura operativa do ambiente da sala durante três dias de verão para o caso da cobertura convencional sem isolamento. O desconforto por frio aumentou, no entanto, o percentual de horas de desconforto por frio é muito menor do que o de desconforto por calor neste ambiente. Dessa forma, com a mudança na ventilação natural para configuração manhã à noite, anualmente o percentual de horas de conforto térmico na sala aumentou entre 10,5% e 24,8% (ou entre 7,5 e 15,2 pontos percentuais), conforme a tipologia de cobertura.

Figura 18 - Temperatura operativa da sala em três dias de verão com as configurações de ventilação natural durante o período ocupado e de manhã à noite para o caso da cobertura convencional sem isolamento em Florianópolis

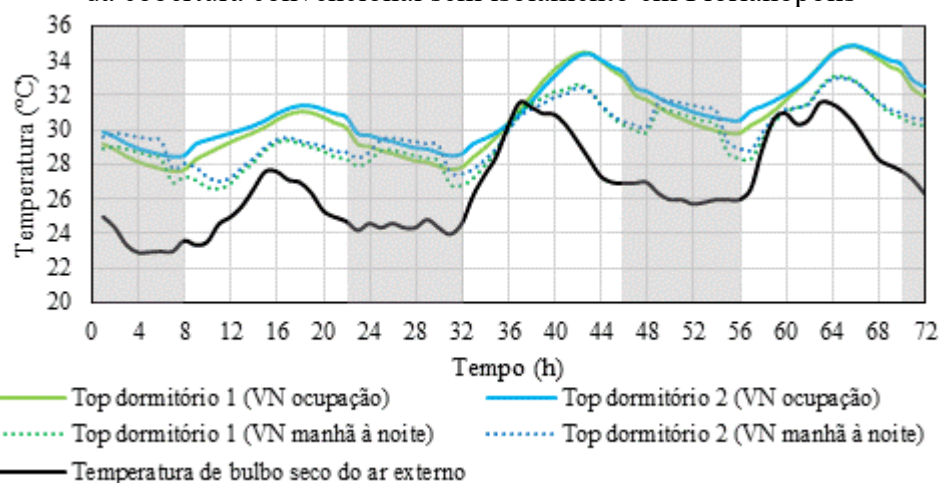


Nota: a hora 0 representa o horário 00:00 e os horários hachurados (14:00 - 22:00) representam o período de ocupação da sala. Abreviações: ventilação natural (VN) e temperatura operativa (Top).

Nos dormitórios, com a mudança na configuração de ventilação natural durante o período ocupado para ventilação de manhã à noite, também se verificou redução do desconforto por calor e aumento do desconforto por frio com todas as tipologias de cobertura. Apesar de a consideração da ventilação de manhã à noite reduzir o efeito do resfriamento noturno pela ausência de ventilação durante a madrugada (00:00 - 06:00), a temperatura operativa nos dormitórios nesse período foi apenas ligeiramente superior com essa condição de ventilação em

comparação com a ventilação durante o período ocupado. Por outro lado, a ventilação de manhã à noite proporcionou temperaturas operativas mais baixas (cerca de 2°C) aos dormitórios durante todo o dia, inclusive no início do período de ocupação dos quartos (22:00 – 24:00). A Figura 19 ilustra esse comportamento para o caso da cobertura convencional sem isolamento. Nestes ambientes, o percentual de horas de desconforto por frio é similar ou superior ao de desconforto por calor e, portanto, anualmente o percentual de horas de conforto térmico apresentou reduções de no máximo 2,5% (ou 2,0 pontos percentuais).

Figura 19 - Temperatura operativa dos dormitórios em três dias de verão com as configurações de ventilação natural durante o período ocupado e de manhã à noite para o caso da cobertura convencional sem isolamento em Florianópolis

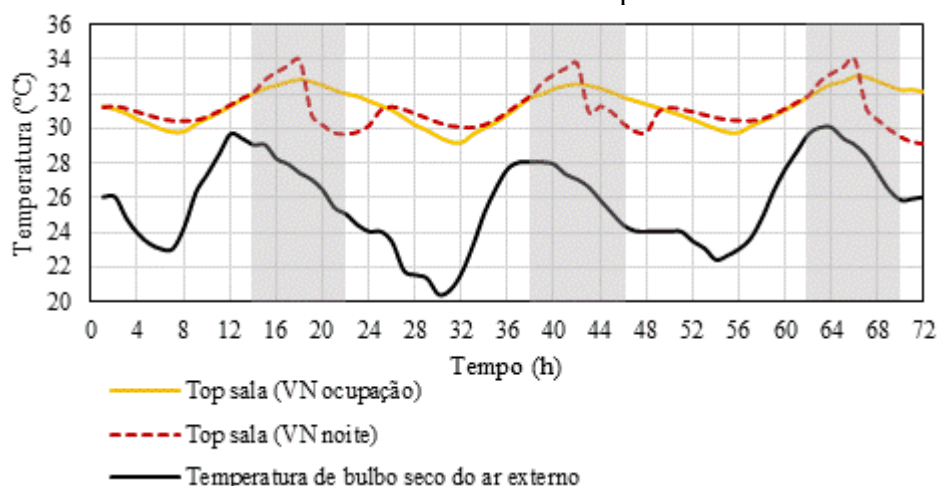


Nota: a hora 0 representa o horário 00:00 e os horários hachurados (22:00 - 23:59 e 00:00 - 08:00) representam o período de ocupação dos dormitórios. Abreviações: ventilação natural (VN) e temperatura operativa (Top).

Comparando a configuração de ventilação natural durante os períodos ocupados com a ventilação somente noturna, foram observadas pequenas variações no percentual de horas de conforto na sala e nos dormitórios, independentemente da tipologia de cobertura. Na sala, foi observada pequena redução no desconforto por calor e aumento no desconforto por frio devido às temperaturas mais baixas em parte do período ocupado (Figura 20). Anualmente o conforto foi pouco afetado, aumentando o percentual de horas de conforto térmico em no máximo 5,7% (ou 3,5 pontos percentuais) no caso da cobertura convencional isolada. Nos dormitórios, observou-se tendência oposta, ou seja, aumento do desconforto por calor e redução do desconforto por frio. Isso ocorreu, pois a redução do período de ventilação durante a noite (de 22:00 até 08:00 para 18:00 até 24:00) em ambientes de ocupação noturna reduziu o resfriamento neste período, fazendo com que a temperatura operativa nesses ambientes fosse elevada (Figura

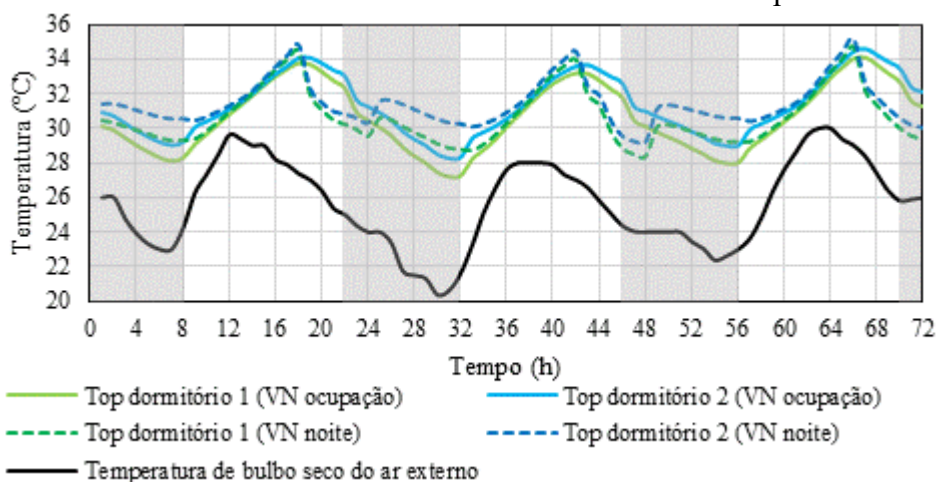
21). Anualmente, a alteração na configuração da ventilação natural em alguns casos aumentou o percentual de horas de conforto térmico nos dormitórios e em outras, diminuiu. Entretanto, essas variações foram insignificantes (menores que 2,6% ou 1,7 pontos percentuais).

Figura 20 - Temperatura operativa da sala em três dias de verão com as configurações de ventilação natural durante o período ocupado e noturna para o caso da cobertura convencional sem isolamento em Florianópolis



Nota: a hora 0 representa o horário 00:00 e os horários hachurados (14:00 - 22:00) representam o período de ocupação da sala. Abreviações: ventilação natural (VN) e temperatura operativa (Top).

Figura 21 - Temperatura operativa dos dormitórios em três dias de verão com as configurações de ventilação natural durante o período ocupado e noturna para o caso da cobertura convencional sem isolamento em Florianópolis



Nota: a hora 0 representa o horário 00:00 e os horários hachurados (22:00 - 23:59 e 00:00 - 08:00) representam o período de ocupação dos dormitórios. Abreviações: ventilação natural (VN) e temperatura operativa (Top).

Dessa forma, verificou-se que a configuração de ventilação natural adotada influenciou o percentual de horas anuais de conforto térmico, principalmente na sala. Esse

ambiente é caracterizado pela ocupação durante a tarde e início da noite, período de temperaturas externas mais elevadas e predomínio do desconforto por calor. Neste ambiente, a configuração de ventilação de manhã à noite foi a que proporcionou o maior número de horas de conforto térmico no ano. Nos dormitórios, as configurações de ventilação natural durante o período ocupado e noturna resultaram em maior número de horas de conforto, mas as diferenças resultantes da mudança de configuração foram menos expressivas.

Com relação à tipologia de cobertura, observou-se que independentemente da configuração de ventilação natural, a cobertura verde foi a que proporcionou o maior percentual de horas de conforto térmico durante o ano. Portanto, a escolha da tipologia de cobertura ideal para a edificação em questão não foi afetada pelas diferentes configurações de ventilação natural dos ambientes de permanência prolongada.

A presença ou não de isolamento térmico foi mais percebida na cobertura convencional. A adição de uma camada de isolamento térmico na cobertura convencional aumentou o percentual de horas anuais de conforto térmico em todos os ambientes de permanência prolongada para qualquer configuração de ventilação natural (entre 3,1% e 6,5% ou entre 1,8 e 4,7 pontos percentuais). Na cobertura fria, o isolamento aumentou o percentual de horas anuais de conforto simultaneamente em todos os ambientes de permanência prolongada do apartamento somente na configuração de ventilação natural de manhã à noite – neste caso o aumento foi de 2,3% a 4,5% (ou de 1,7 a 3,4 pontos percentuais). Nas demais configurações de ventilação natural, a adição de isolamento térmico na cobertura fria reduziu o percentual de horas de conforto térmico na sala, ambiente em que predomina o desconforto por calor. Na cobertura verde, o isolamento térmico reduziu esse percentual ou teve influência insignificante e, portanto, não é recomendada a sua utilização nesta tipologia de cobertura.

4.2. ACVE das diferentes tipologias de cobertura

Esta seção apresenta o consumo de energia nas diferentes fases do ciclo de vida de um apartamento localizado no último pavimento de uma edificação multifamiliar com as coberturas convencional, fria e verde, com e sem isolamento térmico. Os resultados de energia embutida inicial, de manutenção e de desconstrução foram os mesmos nas três cidades avaliadas, pois foi utilizada a mesma base de dados. A energia operacional foi obtida por meio de simulação computacional e variou entre os contextos climáticos.

O Apêndice F apresenta a energia embutida por material e componente de cada tipologia de cobertura, bem como o detalhamento da energia consumida no transporte de materiais até a obra e consumida por equipamentos em todas as fases do ciclo de vida. O quantitativo de materiais e equipamentos é apresentado no Apêndice H.

4.2.1. Energia embutida inicial

A energia embutida inicial de cada tipologia de cobertura é apresentada na Tabela 12. As coberturas convencional e fria apresentam os mesmos valores de energia embutida, uma vez que só apresentam diferentes cores de telha. Arruelas, parafusos, pregos e rebites foram desconsiderados da análise dessas coberturas devido à sua irrelevância em massa. No caso das coberturas verdes, as instalações hidrossanitárias não foram consideradas.

Tabela 12 - Energia embutida inicial das coberturas convencional, fria e verde do apartamento

Tipologia de cobertura	Energia embutida inicial				Por área de apartamento (kWh/m ²)
	Materiais (kWh)	Transporte (kWh)	Equipamentos (kWh)	Total (kWh)	
CC00	6.508,53	94,85	1,06	6.604,45	146,60
CC04	7.422,67	96,97	1,06	7.520,69	166,94
CF00	6.508,53	94,85	1,06	6.604,45	146,60
CF04	7.422,67	96,97	1,06	7.520,69	166,94
CV00	5.852,56	257,40	0,00	6.109,96	135,63
CV04	6.735,70	259,44	0,00	6.995,14	155,28

Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04). Nota: os resultados são os mesmos para as três cidades avaliadas, pois foi utilizada a mesma base de dados.

A energia embutida nos materiais foi a parcela com maior relevância em todos os casos, representando mais de 95,8% da energia embutida inicial. O transporte dos materiais até a obra representou cerca de 1,4% no caso das coberturas convencional e fria e em média 4,0% no caso da cobertura verde, devido à maior quantidade de material. A energia gasta por equipamentos foi irrelevante em todos os casos (menos de 0,0% do total).

A partir dos resultados da Tabela 25 (Apêndice F), observa-se que, considerando as coberturas convencional e fria com isolamento, os perfis metálicos que compõem as tesouras e terças representam 52,2% da energia embutida inicial devido à elevada quantidade de material (aço galvanizado) utilizado na estrutura. As telhas de fibrocimento correspondem a 16,2% e a

camada de isolamento térmico, a 12,3% da energia embutida inicial. No caso do isolamento, as placas de poliestireno expandido são leves e apresentam representatividade intermediária em termos de quantidade em massa. Entretanto, o poliestireno expandido é um dos materiais utilizados com maior valor de energia embutida por quilograma de material.

Considerando os materiais propostos para a cobertura verde com isolamento (Tabela 28, Apêndice F), a camada de impermeabilização foi a que mais contribuiu para a energia embutida inicial (55,7%), seguida pela camada de drenagem (18,5%) e de isolamento térmico (13,1%). Na impermeabilização, a elevada quantidade em massa de material asfáltico, aliada com a energia embutida por unidade do material resultaram em significativo consumo de energia nesta fase. Na camada de drenagem, os módulos de polietileno de alta densidade (PEAD) apresentam elevada energia embutida por quilograma de material. A vermiculita expandida foi o material que mais contribuiu com a energia embutida da camada de substrato, representando 7,4% da energia embutida inicial total da cobertura. As camadas anti-raiz e filtro foram as menos representativas em termos de energia embutida inicial (juntas correspondem a 3,5% do total).

A cobertura verde apresentou energia embutida inicial 7,5% menor em comparação com as coberturas convencional e fria. O isolamento térmico aumentou em 13,9% a energia embutida das coberturas convencional e fria e em 14,5% no caso da cobertura verde. A elevada representatividade da estrutura metálica na energia embutida inicial das coberturas convencional e fria sugere que sua redução poderia ser significativa caso outros materiais fossem utilizados para a tesoura e as terças. A adoção de peças metálicas foi considerada em função do porte da edificação. No entanto, caso uma estrutura de madeira fosse empregada, a energia embutida inicial total do apartamento seria de 2.474,31 kWh para as coberturas sem isolamento térmico e de 3.390,55 kWh para aquelas com isolamento².

Os valores encontrados foram considerados aceitáveis em comparação com resultados reportados na literatura, apesar da variação entre os resultados da cobertura verde devido às diferentes camadas incluídas e a escolha de diferentes materiais para cada uma delas. Lopes (2014) encontrou valor de aproximadamente 140,1 kWh/m² para cobertura convencional com estrutura de madeira e telha cerâmica. A mesma autora reportou valores de 315,2 e 330,0

² A energia embutida inicial foi calculada utilizando a composição de materiais para tesouras e terças disponível no Sinapi, códigos 92564 e 92543, respectivamente. Os valores de energia embutida por massa de material foram obtidos de Tavares (2006).

kWh/m² para cobertura verde vernacular (geotêxtil como filtro e anti-raiz e argila expandida como drenagem) e modular (PEAD), respectivamente, desconsiderando a estrutura.

No estudo de Myrans (2009), a energia embutida da cobertura verde foi de 747,00 kWh/m², valor muito superior ao encontrado nesta pesquisa. Entretanto, a autora considerou agregado de ardósia expandida, que possui alta energia embutida por unidade de material, na composição do substrato. Além disso, considerou a matéria-prima energética (*feedstock energy*) como parte da energia embutida do composto orgânico. O conceito de *feedstock energy* é utilizado quando um combustível é considerado um material, ao invés de um combustível na fabricação de um produto. A energia do combustível não é liberada, mas sim retida no material e pode ser parcialmente recuperada no fim de vida do produto (através de incineração, por exemplo) (Hammond; Jones, 2011). A consideração ou não do poder calorífico do composto orgânico afeta significativamente os resultados e a contribuição percentual de cada componente.

Assim como realizado por Hammond e Jones (2011), neste trabalho a matéria-prima energética (*feedstock energy*) foi incluída na estimativa da energia embutida quando representa uma perda permanente de recursos, como combustíveis fósseis, e reportada separadamente em caso contrário. Dessa forma, a matéria-prima energética foi incluída na produção de materiais plásticos (como PEBD e PEAD) e asfálticos, mas foi reportada separadamente para o composto orgânico.

4.2.2. Energia operacional

A Tabela 13 apresenta a energia operacional do apartamento com as diferentes tipologias de cobertura nos diferentes climas, considerando horizonte de tempo de 40 anos.

Como já discutido na seção 4.1.1, as coberturas fria e verde são as tipologias que apresentaram menor energia operacional. Em Florianópolis e Brasília, a cobertura fria proporcionou o menor consumo de energia. Em Curitiba, a cobertura verde foi a opção mais adequada. O isolamento térmico reduziu a energia operacional no caso da cobertura convencional localizada em clima mais frio (Curitiba), mas não exerceu influência (variação menor que 1,0%) ou aumentou no consumo de energia em climas mais quentes ou quando utilizado com as coberturas fria e verde.

Tabela 13 - Energia operacional das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Florianópolis, Curitiba e Brasília (período de análise de 40 anos)

Tipologia de cobertura	Energia operacional					
	Florianópolis		Curitiba		Brasília	
	Total (kWh)	Por área de apartamento (kWh/m²)	Total (kWh)	Por área de apartamento (kWh/m²)	Total (kWh)	Por área de apartamento (kWh/m²)
CC00	34.788,79	772,23	20.961,44	465,29	41.956,48	931,33
CC04	34.689,37	770,02	18.734,53	415,86	42.020,27	932,75
CF00	28.966,13	642,98	16.278,37	361,34	31.558,68	700,53
CF04	32.358,93	718,29	16.682,46	370,31	38.054,47	844,72
CV00	29.674,88	658,71	15.042,29	333,90	33.129,96	735,40
CV04	32.658,67	724,94	16.544,42	367,25	38.464,24	853,81

Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04). Nota: A energia operacional refere-se ao consumo de energia para climatização dos ambientes de permanência prolongada (sala e dormitórios). Entretanto, esta tabela apresenta a energia operacional por área de apartamento a fim de manter a mesma unidade da energia consumida nas demais fases do ciclo de vida.

4.2.3. Energia embutida na manutenção

A energia embutida na manutenção das coberturas é apresentada na Tabela 14 para o período de análise de 40 anos. Nas coberturas convencional e fria, considerou-se apenas a energia consumida por uma lavadora de alta pressão. Na cobertura verde, foi considerada a energia embutida nos materiais utilizados (para a adubação e a reposição do substrato) e consumida pelo transporte desses materiais.

Tabela 14 - Energia embutida na manutenção das coberturas convencional, fria e verde do apartamento (período de análise de 40 anos)

Tipologia de cobertura	Energia embutida na manutenção				
	Materiais (kWh)	Transporte (kWh)	Equipamentos (kWh)	Total (kWh)	Por área de apartamento (kWh/m²)
CC00	0,00	0,00	15,22	15,22	0,34
CC04	0,00	0,00	15,22	15,22	0,34
CF00	0,00	0,00	15,22	15,22	0,34
CF04	0,00	0,00	15,22	15,22	0,34
CV00	220,76	47,59	0,00	268,35	5,96
CV04	220,76	47,59	0,00	268,35	5,96

Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04). Nota: os resultados são os mesmos para as três cidades avaliadas, pois foi utilizada a mesma base de dados.

Dessa forma, no caso das coberturas convencional e fria, 100,0% da energia embutida na manutenção correspondeu à energia consumida por equipamentos. Com relação à cobertura verde, 82,3% da energia correspondeu à energia embutida nos materiais e 17,7% à energia consumida pelo transporte dos materiais até a obra. A energia embutida na manutenção é a mesma nas coberturas com e sem isolamento, uma vez que as atividades de manutenção são independentes da presença ou não dessa camada.

4.2.4. Energia de desconstrução

A Tabela 15 apresenta a energia de desconstrução das coberturas do apartamento. No caso das coberturas convencional e fria, foi considerada a energia consumida por equipamentos (guindaste hidráulico) para a remoção das telhas e da estrutura metálica e pelo transporte dos materiais até o aterro. A energia relativa ao consumo de gás pelo aparelho de corte e solda foi desconsiderada. No caso da cobertura verde, considerou-se a retirada manual dos materiais da cobertura e, portanto, a energia considerada nessa fase foi apenas a energia consumida pelo transporte dos materiais.

Tabela 15 - Energia de desconstrução das coberturas convencional, fria e verde do apartamento

Tipologia de cobertura	Energia de desconstrução			
	Transporte (kWh)	Equipamentos (kWh)	Total (kWh)	Por área de apartamento (kWh/m ²)
CC00	59,28	68,48	127,76	2,84
CC04	60,60	68,48	129,08	2,87
CF00	59,28	68,48	127,76	2,84
CF04	60,60	68,48	129,08	2,87
CV00	160,88	0,00	160,88	3,57
CV04	161,63	0,00	161,63	3,59

Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04). Nota: os resultados são os mesmos para as três cidades avaliadas, pois foi utilizada a mesma base de dados.

Dessa forma, cerca de metade da energia de desconstrução das coberturas convencional e fria foi relativa ao transporte e metade relativa aos equipamentos, enquanto 100,0% da energia de desconstrução das coberturas verdes correspondeu à energia consumida pelo transporte.

4.2.5. Energia do ciclo de vida

A Tabela 16 apresenta a energia total consumida no ciclo de vida das coberturas do apartamento em Florianópolis, Curitiba e Brasília. A cobertura fria proporcionou o menor consumo de energia no período de análise de 40 anos nas cidades de clima mais quente, Florianópolis e Brasília. Por outro lado, a cobertura verde resultou no menor valor de energia do ciclo de vida em Curitiba. O isolamento térmico reduziu o consumo de energia do ciclo de vida apenas para o caso da cobertura convencional em Curitiba. Esses resultados seguem a mesma tendência observada na fase de energia operacional.

Tabela 16 - Energia total consumida no ciclo de vida das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Florianópolis, Curitiba e Brasília (período de análise de 40 anos)

Tipologia de cobertura	Energia total consumida no ciclo de vida					
	Florianópolis		Curitiba		Brasília	
	Total (kWh)	Por área de apartamento (kWh/m²)	Total (kWh)	Por área de apartamento (kWh/m²)	Total (kWh)	Por área de apartamento (kWh/m²)
CC00	41.536,22	922,00	27.708,86	615,07	48.703,91	1.081,11
CC04	42.354,37	940,16	26.399,53	586,01	49.685,27	1.102,89
CF00	35.713,55	792,75	23.025,80	511,12	38.306,11	850,30
CF04	40.023,93	888,43	24.347,46	540,45	45.719,47	1.014,86
CV00	36.214,06	803,86	21.581,47	479,06	39.669,15	880,56
CV04	40.083,79	889,76	23.969,54	532,07	45.889,36	1.018,63

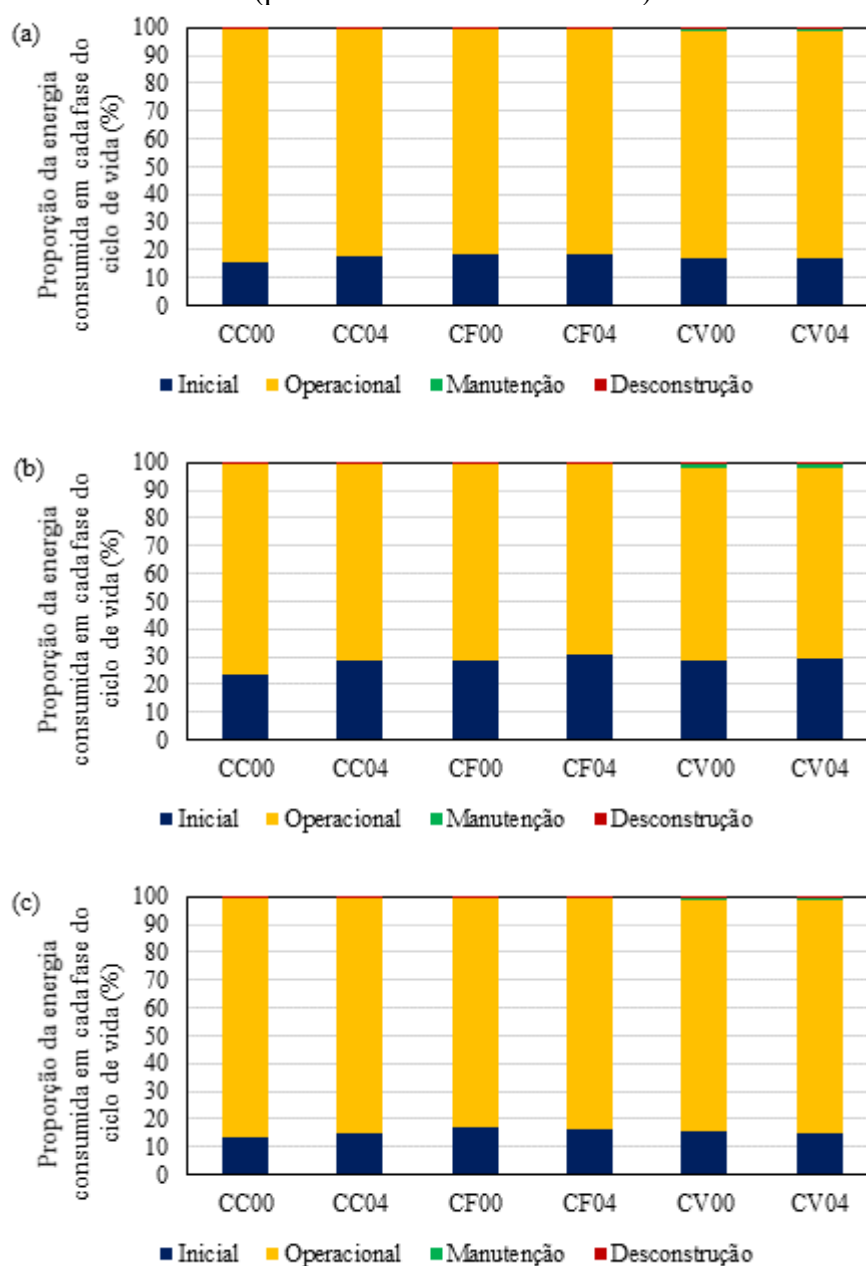
Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

De fato, a energia operacional representa a parcela mais significativa da energia do ciclo de vida, entre 68,5% e 86,1% do total, conforme a tipologia de cobertura e o clima (Figura 22). A energia embutida inicial representa entre 13,6% e 30,9% do total. As energias de manutenção e desconstrução são irrelevantes, cada uma correspondendo a menos de 1,2% do total em todos os casos. Ressalta-se que a vida útil das coberturas foi considerada igual ao horizonte de tempo da análise (40 anos) e, portanto, não houve substituição dos materiais em nenhum caso. Na fase de desconstrução, não foi considerado reaproveitamento ou reciclagem dos materiais, apenas a demolição das coberturas e transporte dos resíduos para aterro.

Os resultados apresentados nesta seção permitiram identificar os elementos ou camadas de cada cobertura que apresentam os maiores consumos energéticos. Nesse sentido, os materiais adotados que necessitam de alternativas de menor consumo energético foram

evidenciados. Além disso, observou-se a relevância da fase operacional, tendo em vista que as coberturas não apresentam diferenças tão significativas em termos de energia embutida inicial (diferenças inferiores a 7,5%).

Figura 22 - Proporção da energia consumida em cada fase do ciclo de vida das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília (período de análise de 40 anos)



Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

A principal limitação do método proposto refere-se à ausência de uma base de dados nacional ampla e atualizada de energia embutida por unidade de material de construção. Apesar dos recentes esforços do Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac, 2024) em calcular indicadores de demanda de energia primária de materiais de construção civil no Brasil, a iniciativa ainda não contempla uma lista extensa de materiais. Dessa forma, dados menos recentes da literatura nacional foram utilizados e, quando não encontrados, foram utilizados dados internacionais.

As distâncias entre a fábrica e a obra e entre a obra e o aterro utilizadas para o cálculo do consumo de energia com transporte, apesar de fixadas, não influenciam o resultado final. Variações de -50% e +50% nos valores adotados para essas distâncias alteram a contribuição do transporte para o consumo de energia no ciclo de vida em no máximo 1,2 pontos percentuais. Em outras palavras, a energia consumida no horizonte de tempo de 40 anos é pouco sensível às distâncias de transporte.

4.3. ACCV das diferentes tipologias de cobertura

Os custos obtidos para a cobertura de um apartamento localizado no último pavimento de uma edificação multifamiliar são apresentados nesta seção. Foram consideradas as coberturas convencional, fria e verde, com e sem isolamento.

4.3.1. Custo inicial

A Tabela 17 apresenta o custo inicial de cada tipologia de cobertura no apartamento em Florianópolis. Os custos referentes às cidades de Curitiba e Brasília encontram-se no Apêndice G, e as tabelas completas contendo o quantitativo e o custo de cada insumo encontram-se no Apêndice H.

A construção da cobertura convencional incluiu o transporte e a instalação de estrutura metálica (tesouras e terças), telhas de fibrocimento, cumeeira, calhas e rufos. A cobertura fria apresenta composição similar, alterando apenas a telha de fibrocimento comum para a telha de fibrocimento branco. Para a construção da cobertura verde, considerou-se o transporte e a instalação das camadas de impermeabilização, anti-raiz, drenagem, filtro, substrato e vegetação, além de instalações hidrossanitárias para drenagem da água absorvida. Nas coberturas com isolamento térmico, o transporte e a instalação de placas de poliestireno expandido foram considerados.

Tabela 17 - Custo inicial das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Florianópolis

Tipologia de cobertura	Custo inicial				Por área de apartamento (R\$/m ²)
	Materiais e equipamentos (R\$)	Transporte (R\$)	Mão de obra (R\$)	Total (R\$)	
CC00	11.317,00	67,36	1.086,45	12.470,80	276,82
CC04	12.732,75	168,39	1.096,47	13.997,61	310,71
CF00	12.194,25	67,36	1.086,45	13.348,05	296,29
CF04	13.610,00	168,39	1.096,47	14.874,86	330,19
CV00	14.228,33	134,71	1.849,75	16.212,80	359,88
CV04	15.595,85	235,75	1.859,43	17.691,02	392,70

Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

A cobertura verde foi a que apresentou o maior custo inicial, devido a maior quantidade de material em suas camadas. A vegetação, a impermeabilização e a drenagem foram as camadas que mais contribuíram com o custo inicial das coberturas verdes. No caso das coberturas convencional e fria, a estrutura metálica e as telhas representaram a parcela mais significativa do custo inicial. Comparando as coberturas sem isolamento, o custo da cobertura verde ficou entre 30,0% e 51,1% maior que o custo da cobertura convencional e entre 21,5% e 40,4% maior que o custo da cobertura fria, conforme a cidade. Considerando as coberturas com isolamento, a cobertura verde apresentou custo entre 26,4% e 44,4% maior em comparação com a cobertura convencional e entre 18,9% e 35,3% maior em comparação com a cobertura fria.

Estes resultados corroboram com dados da literatura, que apesar da variação dos custos encontrados e das tipologias de coberturas consideradas como convencionais, apontam maiores custos iniciais das coberturas verdes em comparação com convencionais e frias. Em seu estudo, Sproul *et al.* (2014) encontraram que o custo inicial de uma cobertura verde é 7,8 vezes maior em comparação com coberturas planas com membranas pretas e brancas (frias). De acordo com Ulubeyli e Arslan (2017), o custo inicial de coberturas verdes pode ser de até quase duas vezes o custo inicial de coberturas de madeira. Kim *et al.* (2018) reportaram que o custo inicial de uma cobertura verde é 5,6 vezes maior em comparação com uma cobertura plana constituída por uma membrana impermeabilizante.

Em todas as tipologias de coberturas e cidades analisadas, a parcela correspondente à aquisição de materiais e uso de equipamentos para instalação foi a mais representativa (aproximadamente 90,0% dos custos iniciais). A mão de obra correspondeu em média a 9,8%

e o transporte representou menos de 1,0% dos custos iniciais em todos os casos. A representatividade dos custos na fase inicial para cada tipologia de cobertura é apresentada no Apêndice I. Ressalta-se que a mão de obra incluiu as horas de trabalho de profissionais como montadores, serventes, pedreiros, etc., conforme a descrição dos serviços apresentada no Apêndice H. Atividades como içamento e transporte vertical de elementos foram inclusas em materiais e equipamentos. O custo de transporte incluiu apenas o combustível consumido. É importante destacar também que os custos foram calculados considerando a área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento em análise.

4.3.2. Custo operacional

A Tabela 18 apresenta a tarifa de energia elétrica atual (referente ao mês de agosto de 2023) nas três cidades, o reajuste das tarifas nos últimos cinco anos e a média dos reajustes (valor utilizado para reajustar as tarifas no período de análise de 40 anos). Na Tabela 19 é apresentado o custo operacional com energia elétrica nos ambientes de permanência prolongada do apartamento com as tipologias de cobertura no período de 40 anos para Florianópolis. Os custos referentes às cidades de Curitiba e Brasília encontram-se no Apêndice G.

Em Florianópolis, as coberturas fria e verde sem isolamento foram as que proporcionaram os menores custos operacionais, devido ao menor consumo de energia necessária para climatização. Em comparação com a cobertura convencional sem isolamento, o custo operacional seria reduzido em 16,7% e 14,7% com a utilização de cobertura fria e verde, respectivamente.

A utilização de uma camada de isolamento nas coberturas fria e verde aumentou o custo operacional em 11,7% e 10,1%, respectivamente. Na cobertura convencional, a presença do isolamento reduziu o custo em menos de 1,0%. Em todas as tipologias de cobertura, a camada de isolamento contribuiu com a redução do consumo de energia com aquecimento, e consequentemente do custo. Entretanto, o isolamento aumentou o consumo de energia com resfriamento com a utilização das coberturas fria e verde, e manteve consumo similar no caso da cobertura convencional.

Tabela 18 - Tarifas de energia elétrica e reajuste anual das tarifas para o subgrupo residencial normal (B1) em Florianópolis, Curitiba e Brasília

Cidade	Companhia	Tarifa (R\$/kWh)	Reajuste anual da tarifa (%)					Média
			2018	2019	2020	2021	2022	
Florianópolis	Celesc	0,57302	13,15	-9,16	8,42	5,83	8,17	5,28
Curitiba	Copel	0,63051	15,13	2,92	4,69	10,04	2,68	7,09
Brasília	CEB/Neoenergia	0,69871	6,15	-6,91	-0,49	11,85	21,58	6,44

Nota: Os valores das tarifas não incluem os tributos.

Fonte: ANEEL (2023)

Tabela 19 - Custo operacional com energia elétrica nos ambientes de permanência prolongada do apartamento com as coberturas convencional, fria e verde em Florianópolis (período de análise de 40 anos)

Tipologia de cobertura	Custo operacional	
	Total (R\$)	Por área de apartamento (R\$/m²)
CC00	42.449,04	942,27
CC04	42.327,73	939,57
CF00	35.344,27	784,56
CF04	39.484,15	876,45
CV00	36.209,08	803,75
CV04	39.849,88	884,57

Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Em Curitiba, a cobertura verde apresentou o menor custo operacional entre as tipologias avaliadas, reduzindo o custo em 28,2% em relação à cobertura convencional e em 7,6% em relação à cobertura fria. Curitiba apresenta maior necessidade de aquecimento em comparação com as demais cidades avaliadas, devido ao clima mais frio. Portanto, a cobertura verde apresentou melhor desempenho em comparação com a cobertura fria, que apesar de reduzir o custo com energia para resfriamento, aumentou o custo com energia para aquecimento.

A camada de isolamento térmico contribuiu para redução do custo operacional no apartamento com a cobertura convencional (-10,6%) e para o aumento do custo com as coberturas fria (2,5%) e verde (10,0%).

Em Brasília, o custo operacional foi significativamente maior em comparação com as demais cidades avaliadas (custo entre 79,3% e 116,4% maior, conforme a tipologia da cobertura e a cidade comparada). O custo operacional mais elevado deve-se ao maior consumo de energia com climatização no clima quente e seco e ao maior valor da tarifa de energia elétrica em

Brasília. Nesta cidade, a cobertura fria apresentou o menor custo operacional (valor 24,8% menor em comparação com a cobertura convencional), seguida da cobertura verde (valor 21,0% menor em comparação com a cobertura convencional).

A utilização de isolamento térmico não alterou o custo operacional da cobertura convencional (variação menor que 0,5%) e aumentou o custo em 20,6% e 16,1% no caso das coberturas fria e verde, respectivamente, devido ao aumento do custo com eletricidade para resfriamento dos ambientes.

Em localidades mais quentes, onde a energia elétrica consumida com resfriamento é muito maior que a energia consumida com aquecimento, como Florianópolis e Brasília, a cobertura fria proporciona maior economia que a cobertura verde. Por outro lado, em localidades onde a energia elétrica consumida para aquecer os ambientes é mais representativa (entre 9,8% e 25,7% da energia elétrica total, conforme a tipologia de cobertura), como em Curitiba, a penalidade de aquecimento no inverno reduz a economia com a utilização da cobertura fria. Nestes casos, a cobertura verde é mais vantajosa do ponto de vista de custo operacional. A representatividade da energia elétrica consumida com resfriamento e aquecimento na fase operacional em cada tipologia de cobertura é apresentada no Apêndice I. Resultados similares foram reportados por Shi *et al.* (2019). Os autores destacaram que os efeitos de evapotranspiração no verão e isolamento no inverno das coberturas verdes, contribuem para os menores custos de energia em localidades frias e que a alta refletância das coberturas frias possibilita menores custos em localidades mais quentes.

4.3.3. Custo de manutenção

A Tabela 20 apresenta a inflação e a taxa de reajuste do salário mínimo do Brasil nos últimos anos, e a médias destes valores. Os valores médios foram utilizados no cálculo dos custos futuros com manutenção (do ano um ao ano 40) e nos custos de desconstrução (ano 40). Na Tabela 21 é apresentado o custo de manutenção de cada tipologia de cobertura no apartamento em estudo no período de 40 anos, considerando o clima de Florianópolis.

Tabela 20 - Inflação e taxa de reajuste anual do salário mínimo no Brasil

Insumo	Ajuste	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Média
Material e transporte	Inflação	3,75%	4,31%	4,52%	10,06%	5,79%	-	5,69%
Mão de obra	Taxa de reajuste do salário mínimo	-	4,61%	4,11%	5,87%	10,18%	8,91%	6,74%

Fonte: IBGE (2023) e IPEA (2023)

Tabela 21 - Custo de manutenção das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Florianópolis (período de análise de 40 anos)

Tipologia de cobertura	Custo de manutenção				
	Materiais e equipamentos (R\$)	Transporte (R\$)	Mão de obra (R\$)	Total (R\$)	Por área de apartamento (R\$/m²)
CC00	37,69	0,00	4.028,79	4.066,48	90,27
CC04	37,69	0,00	4.028,79	4.066,48	90,27
CF00	37,69	0,00	4.028,79	4.066,48	90,27
CF04	37,69	0,00	4.028,79	4.066,48	90,27
CV00	2.320,80	2.994,10	34.513,63	39.828,54	884,10
CV04	2.320,80	2.994,10	34.513,63	39.828,54	884,10

Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Os custos de manutenção das coberturas em Curitiba e Brasília são apresentados no Apêndice G. Diferentemente do custo inicial, a mão de obra representou o custo mais significativo (mais de 87,0% do custo de manutenção em todas as tipologias de cobertura e cidades avaliadas). Nas coberturas convencional e fria, o custo com a hora produtiva do equipamento para lavagem representou menos de 1,0% do custo de manutenção. Com relação à cobertura verde, o transporte representou entre 6,4% e 7,5% e os materiais, entre 5,0% e 6,0% do custo de manutenção, conforme a cidade avaliada.

4.3.4. Custo de desconstrução

A Tabela 22 apresenta o custo de desconstrução de cada tipologia de cobertura no apartamento, considerando a cidade de Florianópolis. O custo de desconstrução é um custo futuro e, portanto, foi calculado considerando os valores médios de inflação e da taxa de reajuste do salário mínimo no ano 40 (fim da vida útil das coberturas). O custo de desconstrução das coberturas referente às cidades de Curitiba e Brasília encontra-se no Apêndice G.

O custo de desconstrução das coberturas convencional e fria é equivalente, tendo em vista que o mesmo volume de material é utilizado na construção destas tipologias. A cobertura verde apresenta custo de desconstrução entre 10,8% e 14,1% menor em comparação com as coberturas convencional e fria, conforme a cidade. Quando considerada a camada de isolamento nas coberturas, o custo de desconstrução da cobertura verde é entre 11,1% e 14,2% menor comparado às demais tipologias. Apesar da maior quantidade de materiais utilizada na construção de coberturas verdes (e por isso, maior custo de mão de obra, transporte e disposição

em aterro), não foram considerados equipamentos para sua desmontagem, apenas serviços manuais.

Tabela 22 - Custo de desconstrução das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Florianópolis

Tipologia de cobertura	Custo de desconstrução				Por área de apartamento (R\$/m ²)
	Equipamentos (R\$)	Mão de obra (R\$)	Transporte e disposição em aterro (R\$)	Total (R\$)	
CC00	7.981,30	15.766,21	1.540,78	25.288,28	561,34
CC04	7.981,30	17.054,61	2.773,40	27.809,31	617,30
CF00	7.981,30	15.766,21	1.540,78	25.288,28	561,34
CF04	7.981,30	17.054,61	2.773,40	27.809,31	617,30
CV00	0,00	17.252,67	4.930,49	22.183,15	492,41
CV04	0,00	18.497,17	5.854,95	24.352,12	540,56

Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Nas coberturas convencionais e frias sem isolamento, a mão de obra representou cerca de 61,7% do custo de desconstrução, o uso de equipamentos cerca de 31,9% e o transporte e a disposição em aterro, aproximadamente 6,4%. Considerando a camada de isolamento, os percentuais relativos à mão de obra, equipamentos e transporte e disposição em aterro são de, em média, 28,9%, 60,6% e 10,5%, respectivamente. Nas coberturas verdes, sem e com isolamento, o custo com mão de obra representou cerca de 75,6% do custo de desconstrução e o transporte e a disposição em aterro, cerca de 24,4%. O Apêndice I mostra a representatividade dos custos na fase de desconstrução para cada tipologia de cobertura.

4.3.5. Custo do ciclo de vida

A Tabela 23 apresenta o custo total do ciclo de vida das coberturas do apartamento, durante toda a vida útil de 40 anos, considerando o clima e os custos de Florianópolis. O custo total nas cidades de Curitiba e Brasília é apresentado no Apêndice G.

Em todos os contextos climáticos considerados, a cobertura fria sem isolamento foi a que apresentou o menor custo do ciclo de vida. Apesar do custo inicial mais alto da cobertura fria em comparação com a convencional sem isolamento (valor entre 6,7% e 7,6% maior, conforme a cidade), a economia de custo com consumo de energia (valor entre 16,7% e 24,8% menor) resulta em custo no ciclo de vida de 40 anos entre 7,4% e 15,9% menor. Os custos de

manutenção e demolição são equivalentes para estas coberturas. Resultados similares foram reportados por Sproul *et al.* (2014), que além da economia de energia, consideraram como benefícios econômicos das coberturas frias, a redução das emissões e a contribuição com o resfriamento global. A maior redução no custo do ciclo de vida foi observada em Brasília, tendo em vista o maior consumo de energia elétrica com climatização e a maior representatividade do custo operacional neste contexto climático em relação ao custo do ciclo de vida (Figura 23).

Tabela 23 - Custo total do ciclo de vida das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Florianópolis (período de análise de 40 anos)

Tipologia de cobertura	Custo total do ciclo de vida (R\$)	Custo total do ciclo de vida por área de apartamento (R\$/m ²)
CC00	84.274,60	1.870,69
CC04	88.201,13	1.957,85
CF00	78.047,08	1.732,45
CF04	86.234,80	1.914,20
CV00	114.433,56	2.540,15
CV04	121.721,57	2.701,92

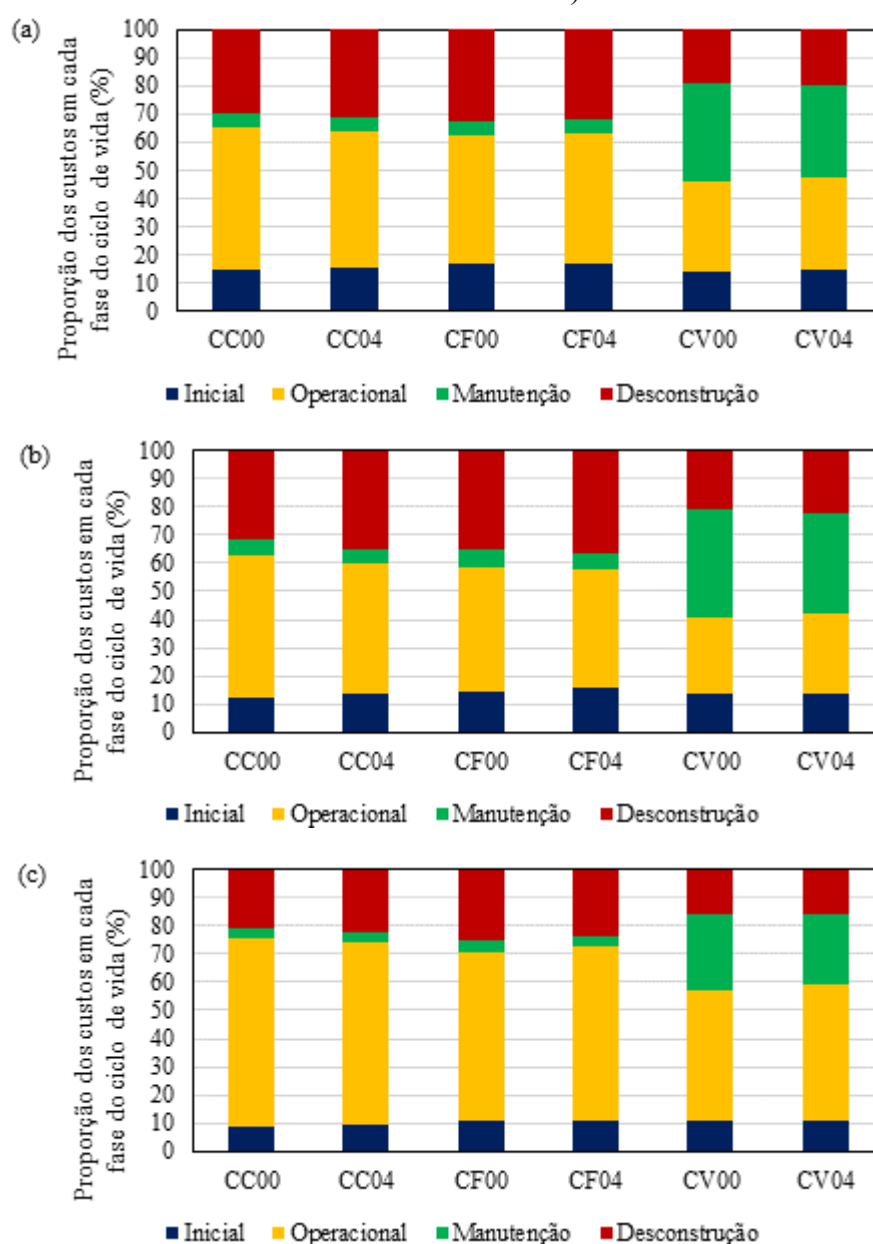
Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Os benefícios da cobertura verde em reduzir o custo com energia elétrica para climatização são ofuscados pelos custos iniciais e de manutenção (assim como observado por Sproul *et al.* (2014) e Ziogou *et al.* (2017)), principalmente em Florianópolis e Curitiba. Durante o ciclo de vida de 40 anos, o custo da cobertura verde, sem isolamento, é 35,8% maior que o custo da cobertura convencional em Florianópolis e 33,1% em Curitiba. Em Brasília, o custo do ciclo de vida é 15,9% maior que o custo da cobertura convencional, percentual menor devido à representatividade do custo operacional em relação ao custo do ciclo de vida (Figura 23).

Com base no exposto, ressalta-se que a viabilidade econômica de implantação de coberturas frias e verdes depende fortemente da localidade. Em locais onde há maior necessidade de energia para climatização e as tarifas de energia elétrica são maiores, as coberturas frias apresentam-se mais vantajosas e o custo das coberturas verdes pode não ultrapassar muito ou até mesmo compensar os custos iniciais e de manutenção elevados. É importante destacar também que este estudo teve como foco o ciclo de vida energético das coberturas, priorizando adotar benefícios que pudessem ser traduzidos em custos para os proprietários das coberturas, considerando a realidade brasileira. Outros benefícios como criação de habitat (Mahmoud *et al.*, 2017), redução das emissões (Shi *et al.*, 2019; Ziogou *et*

al., 2017), aumento de valor de propriedade, isolamento acústico (Ulubeyli; Arslan, 2017) e benefícios relacionados com a gestão de água pluvial (Sproul *et al.*, 2014; Shi *et al.*, 2019) são difíceis de quantificar e usualmente são considerados com base em valores reportados por outros estudos, nem sempre refletindo em economia financeira para o proprietário.

Figura 23 - Proporção dos custos em cada fase do ciclo de vida das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília (período de análise de 40 anos)



Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

A presença do isolamento térmico aumenta tanto os custos inicial e de desconstrução das coberturas (devido a maior quantidade de material), quanto o custo operacional considerando o custo anual com energia elétrica para climatização, exceto quando utilizado na cobertura convencional em Florianópolis e em Curitiba.

O custo do ciclo de vida das coberturas foi maior em Brasília (entre 22,8% e 49,3%, conforme a tipologia de cobertura), em comparação com Florianópolis e Curitiba, principalmente devido aos altos custos operacionais.

Shi *et al.* (2019) observaram uma tendência (em quatro das cinco cidades avaliadas) de melhoria do custo benefício de coberturas frias e verdes, em comparação com as convencionais, conforme o clima passa de frio para quente. Os autores avaliaram climas frios e secos e climas temperados e úmidos. Essa tendência não foi observada nesta pesquisa, que considerou um clima tropical e seco e climas temperados e úmidos. A cobertura fria apresentou maior redução percentual do custo total do ciclo de vida em comparação com a cobertura convencional na ordem: Brasília (-15,9%), Curitiba (-10,5%) e Florianópolis (-7,4%). Apesar da maior demanda de energia de climatização em Florianópolis em comparação com Curitiba, a maior tarifa e taxa de reajuste da energia elétrica em Curitiba fez com que ao longo dos 40 anos, a cobertura convencional apresentasse maior custo do ciclo de vida nesta cidade. Dessa forma, a diferença percentual entre o custo do ciclo de vida da cobertura fria com relação à convencional foi maior em Curitiba, apesar do clima mais frio em comparação com Florianópolis.

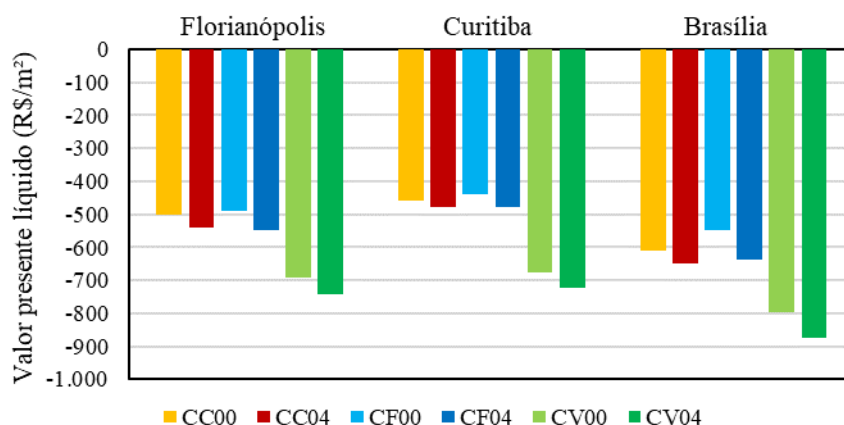
Com relação à cobertura verde, o menor aumento percentual do custo total do ciclo de vida em comparação com a cobertura convencional também ocorreu na ordem: Brasília (15,9%), Curitiba (33,1%) e Florianópolis (35,8%). Estes resultados enfatizam que o estudo de viabilidade econômica destas coberturas deve ser realizado em localidades específicas, uma vez que a tarifa de energia elétrica é tão influente no custo quanto a demanda de energia com climatização.

4.3.6. Valor presente líquido

A Figura 24 apresenta o valor presente líquido (VPL) das coberturas por área de apartamento em Florianópolis, Curitiba e Brasília. O VPL é um indicador financeiro que, quando positivo, indica a viabilidade de um investimento e quando negativo, indica que as despesas serão maiores que as receitas ao longo do período analisado em termos de valores presentes. Neste

trabalho, somente custos foram considerados durante a vida útil das coberturas (custo inicial, operacional, de manutenção e de desconstrução) e, portanto, em todos os casos, o VPL apresentou valor negativo durante o período de 40 anos. Dessa forma, quanto menor o valor (mais negativo), menos viável o investimento.

Figura 24 - Valor presente líquido das coberturas convencional, fria e verde, com e sem isolamento, por área de apartamento em Florianópolis, Curitiba e Brasília ao final do período de análise (40 anos)



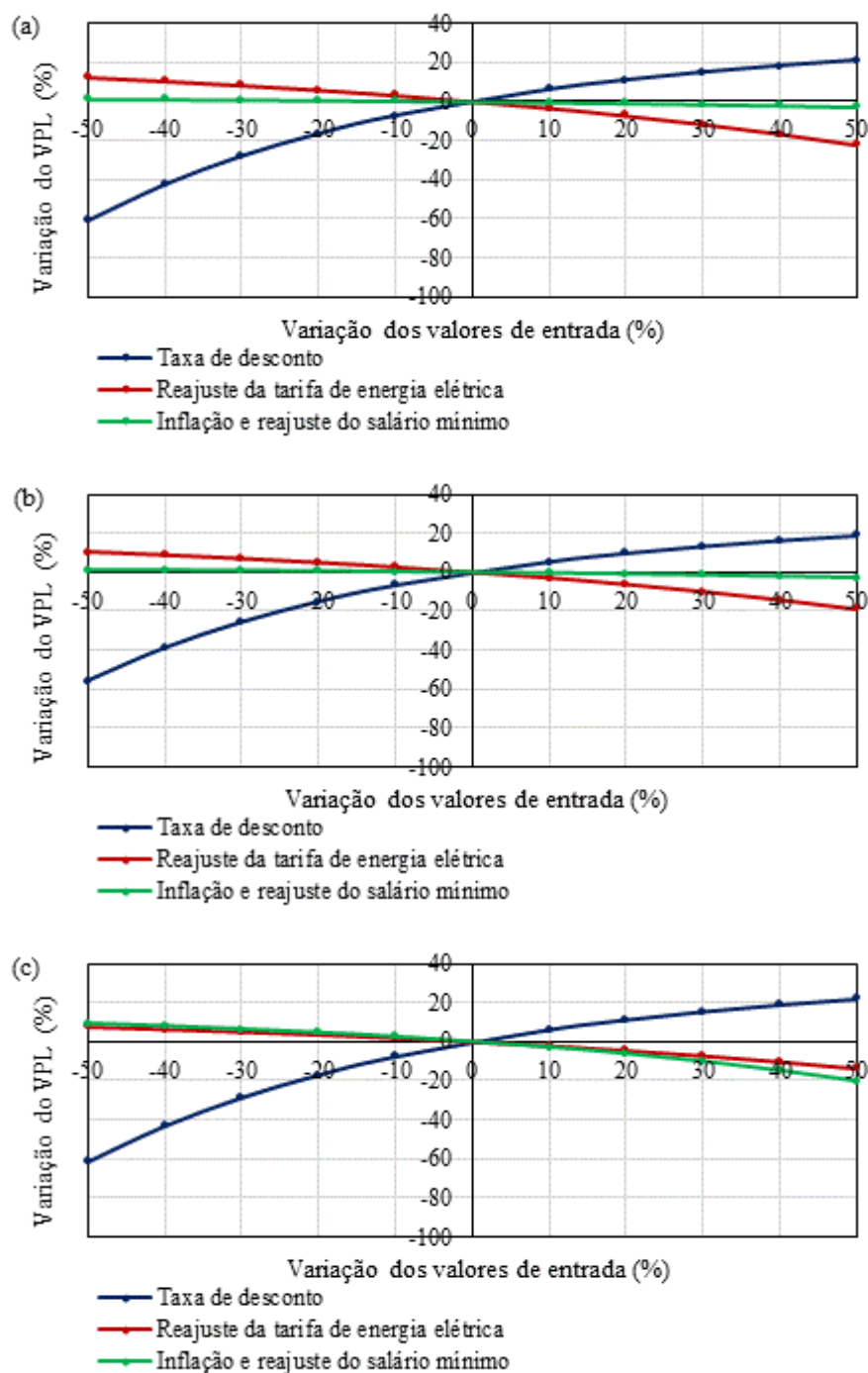
Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Em todos os contextos climáticos considerados, em termos de valor presente, a solução mais viável economicamente foi a cobertura fria sem isolamento (VPL entre -438,76 e -548,24 R\$/m²). Apesar do maior custo inicial em comparação com a cobertura convencional, essa solução proporcionou menor custo com energia elétrica durante os 40 anos de vida útil. Por outro lado, o VPL das coberturas verdes (valores entre -723,04 e -874,33 R\$/m² para as coberturas sem isolamento, conforme a cidade) as coloca como as soluções com menor viabilidade econômica, principalmente devido aos custos iniciais e de manutenção ao longo da vida útil.

A Figura 25 apresenta o efeito da variação da taxa de desconto, do reajuste da tarifa de energia elétrica e da inflação e do reajuste do salário mínimo no VPL das coberturas convencional, fria e verde, sem isolamento, em Florianópolis. A análise para as coberturas com isolamento foi suprimida tendo em vista que os resultados seguem a mesma tendência. A análise para as coberturas nas cidades de Curitiba e Brasília é apresentada no Apêndice J. A partir

destes resultados é possível analisar a viabilidade financeira das coberturas com custos futuros possíveis.

Figura 25 - Variação dos valores de entrada que influenciam o VPL das coberturas (a) convencional, (b) fria e (c) verde em Florianópolis



Como pode ser observado, quanto maior a tarifa de energia elétrica e a inflação e o reajuste do salário mínimo, menor o VPL. Isso acontece, pois não foram incluídos fluxos de caixa positivos (ou seja, apenas despesas foram consideradas na análise das coberturas). Por outro lado, quanto maior a taxa de desconto, maior o VPL. No caso deste estudo, a taxa de desconto foi considerada como sendo igual à taxa Selic, que é a taxa básica de juros da economia. Como não foram considerados fluxos de caixa positivos, o VPL indica em termos de valor presente, qual seria o valor empregado nas coberturas ao longo da vida útil de 40 anos.

Em todas as cidades e para todas as coberturas, o valor de entrada que mais influenciou o VPL foi a taxa de desconto. Variações de -50% a +50% na taxa de desconto ocasionaram variações no VPL entre -60,8% e 22,0% em Florianópolis, -72,2% e 23,7% em Curitiba e entre -81,7% e 28,7% em Brasília. As variações nos valores do reajuste da energia elétrica causaram aumentos de até 21,9% e reduções de até 46,8% no valor do VPL. Os valores de entrada que exerceram menor influência no VPL foram a inflação e o reajuste do salário mínimo, que representam as variações dos custos de manutenção e desconstrução. Mesmo assim, aumentos de até 10,6% e reduções de até 23,4% foram observadas variando o valor do reajuste entre -50% e +50%.

Com o aumento do valor do reajuste da tarifa de energia elétrica, o VPL da cobertura convencional sofre maior aumento (devido ao maior consumo de energia) em comparação com o VPL da cobertura verde. Entretanto, esse efeito não é suficiente para tornar as coberturas verdes mais viáveis economicamente. O VPL das coberturas verdes foi entre 14% e 28% menor em comparação com o da cobertura convencional mesmo com o aumento de 50% do valor do reajuste da tarifa de energia elétrica.

Observou-se que a situação econômica tem impacto significativo no VPL das coberturas. Dessa forma, os valores de entrada devem ser cuidadosamente analisados, principalmente em países como o Brasil, onde a taxa de juros da economia, as taxas de aumento e reajuste dos preços historicamente apresentam alta variação (BCB, 2024; IBGE, 2023; IPEA, 2023).

4.4. Definição da tipologia de cobertura mais sustentável em termos energéticos

Esta seção apresenta os pesos relativos dos parâmetros de avaliação das coberturas, obtidos a partir da aplicação do método AHP às respostas dos especialistas ao questionário aplicado, além da definição da cobertura mais adequada em termos energéticos em cada cidade. A seleção da

cobertura foi realizada a partir do desempenho das tipologias em cada parâmetro de avaliação e do seu respectivo peso relativo, por meio do método TOPSIS.

4.4.1. Ponderação dos parâmetros de avaliação por meio do método AHP

O valor de ponderação de cada parâmetro de avaliação foi obtido a partir das respostas consistentes dos especialistas ao questionário aplicado. Foram consideradas válidas as repostas com razão de consistência (CR) inferior a 0,10. Entretanto, houve dificuldade em obter respostas consistentes seguindo este rígido critério devido à complexidade de os participantes realizarem comparações par a par e distinguir termos como “extremamente mais relevante”, “fortemente mais relevante” e “essencialmente mais relevante”. Dos 66 questionários respondidos, somente vinte foram considerados consistentes, considerando valores de razão de consistência menores que 0,10.

A Tabela 24 apresenta os valores de ponderação dos parâmetros de avaliação determinados considerando as respostas do questionário que obtiveram razão de consistência inferior a 0,10. A razão de consistência média das respostas foi de 0,058. Ressalta-se que a pesquisa adotou a recomendação de Saaty (1990) de limitar o número de alternativas (coberturas) e critérios (parâmetros de avaliação) inferior a nove, considerando que a capacidade humana de processar simultaneamente um número maior de fatores é comprometida. O desafio de obter respostas consistentes também foi abordado na literatura (Jato-Espino *et al.*, 2018; Lima Junior; Osiro; Carpinetti, 2014).

Tabela 24 - Valor de ponderação dos parâmetros de avaliação das alternativas de cobertura

Energia consumida no ciclo de vida	Temperatura da superfície externa	Custo do ciclo de vida	Conforto térmico dos usuários
0,255	0,218	0,158	0,369

A fim de obter maior número de respostas válidas, tentou-se agrupar os extremos da escala de comparação do método AHP nas respostas do questionário (Apêndice C). Ou seja, os julgamentos 9, 7 e 5 (extremamente, fortemente e essencialmente mais relevante, respectivamente) foram agrupados em uma única escala e os julgamentos 1/9, 1/7 e 1/5 (extremamente, fortemente e essencialmente menos relevante, respectivamente) em outra escala. Os julgamentos 3, 1 e 1/3 (um pouco mais relevante, importância equivalente e um pouco menos relevante) foram mantidos, totalizando cinco escalas. Com o agrupamento, vinte

e uma respostas foram consideradas consistentes (apenas uma a mais em comparação com o caso utilizando a escala completa do método). Dessa forma, a tentativa foi descartada.

Outra alternativa para obter maior número de respostas válidas seria aceitar valores de razão de consistência menores que 0,20, como realizado por Lima Junior, Osiro e Carpinetti (2014). Neste caso, trinta e quatro questionários respondidos seriam considerados válidos. Observou-se semelhança entre os valores de ponderação dos parâmetros determinados considerando as respostas com razão de consistência inferior a 0,10 e 0,20 (diferenças máximas de 8,5%).

Optou-se por manter a metodologia original ($CR < 0,10$) para determinação das respostas válidas, tendo em vista que algumas pesquisas desenvolvidas com metodologias similares também consideraram grupos com menos de 30 especialistas (Canto-Perello *et al.*, 2015; Carrera *et al.*, 2022; Ekmekcioğlu, 2023; Loikkanen; Lahdelma; Salminen, 2017; Mahdiyar *et al.*, 2019). Dessa forma, os pesos dos parâmetros determinados pelas respostas de vinte profissionais (60% pesquisadores/docentes, 30% arquitetos e 10% engenheiros) foram utilizados no método TOPSIS. O parâmetro conforto térmico dos usuários foi considerado o mais importante para o grupo de especialistas, seguido da energia consumida no ciclo de vida, temperatura da superfície externa (indicativo da influência das coberturas na mitigação dos efeitos das ilhas de calor) e custo do ciclo de vida.

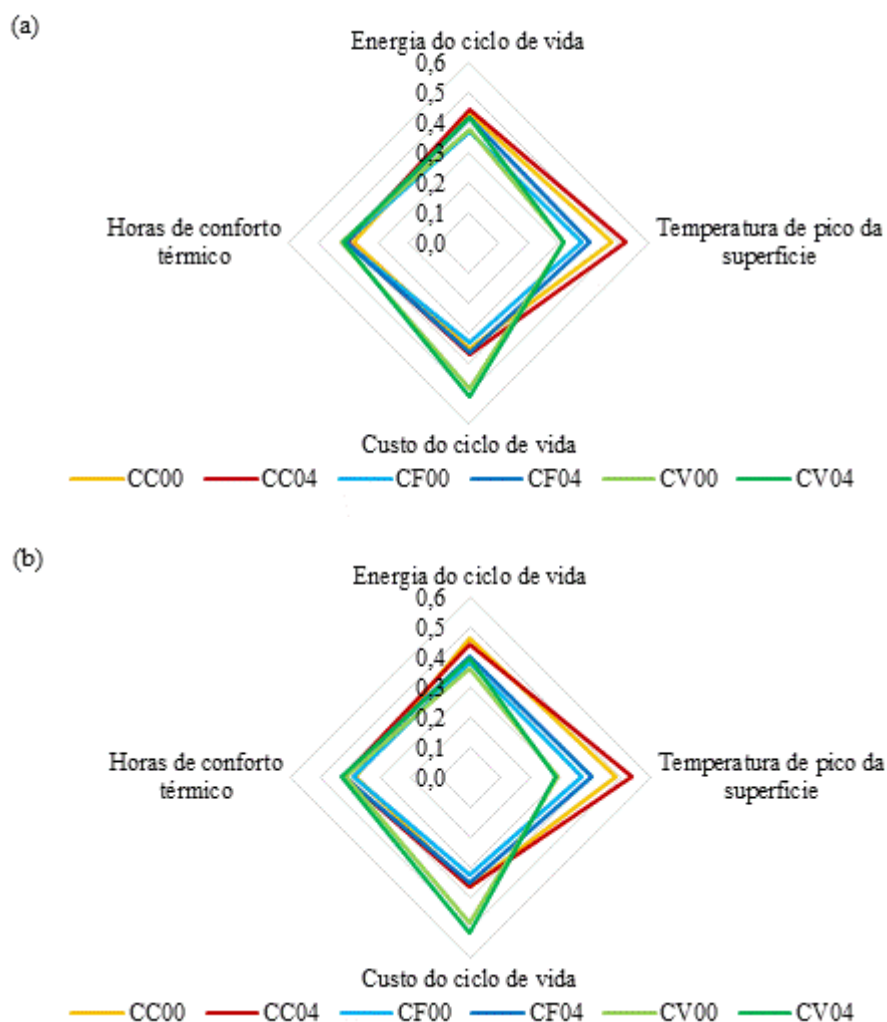
Ressalta-se que estes pesos refletem a opinião de um número limitado de profissionais e suas escolhas podem estar relacionadas com a sua área de atuação. Em setores onde a redução de custos é prioritária, esse parâmetro poderia assumir maior peso. Esta mesma metodologia pode ser aplicada a outros grupos e respostas diferentes podem ser obtidas. Assim, considera-se que o método é dinâmico e pode ser facilmente adaptado a diferentes contextos.

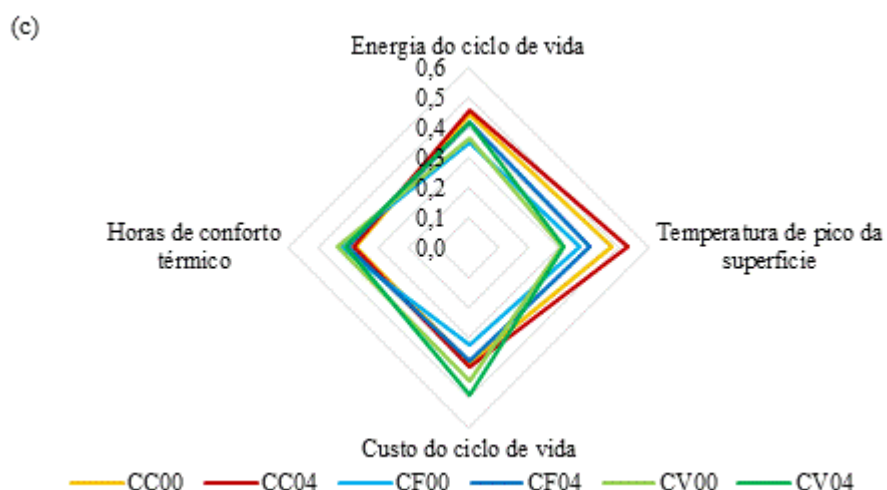
4.4.2. Seleção da alternativa mais adequada por meio do TOPSIS

O desempenho das tipologias de coberturas em cada parâmetro de avaliação foi analisado conjuntamente para identificar a alternativa mais sustentável em termos energéticos para cada cidade. Foram considerados os resultados de energia consumida no ciclo de vida de 40 anos (kWh/m^2), temperatura de pico da superfície das coberturas no ano simulado ($^{\circ}\text{C}$), custo das coberturas no ciclo de vida de 40 anos ($\text{R\$/m}^2$) e número de horas de conforto térmico nos períodos ocupados dos ambientes de permanência prolongada (sala e dormitórios) durante o ano simulado.

A aplicação do método TOPSIS consiste em normalizar os resultados de desempenho (uma vez que os parâmetros de avaliação apresentam diferentes unidades de medida e valores em diferentes escalas) e multiplicá-los pelo peso relativo de cada parâmetro, bem como classificar as alternativas com base na proximidade com a solução ideal. A Figura 26 sintetiza o desempenho das coberturas nos quatro parâmetros de forma conjunta em Florianópolis, Curitiba e Brasília. Os valores estão normalizados a fim de facilitar a visualização dos resultados de cada parâmetro em uma única imagem.

Figura 26 - Desempenho normalizado das coberturas convencional, fria e verde com base nos parâmetros de avaliação em (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília



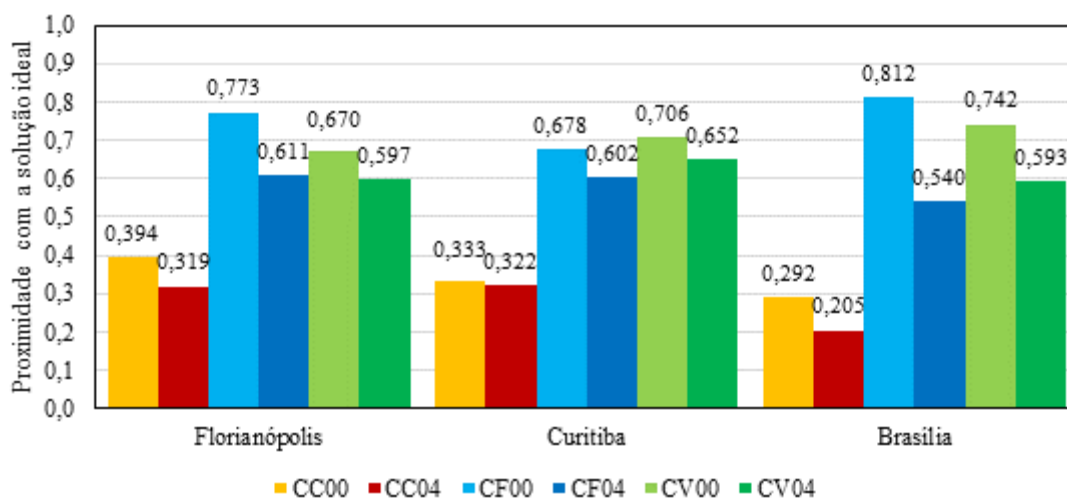


Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Percebe-se a dificuldade em definir a alternativa de cobertura mais adequada para cada cidade. A melhor tipologia seria aquela com menor consumo de energia no ciclo de vida, menor temperatura de pico da superfície, menor custo do ciclo de vida e maior número de horas de conforto térmico simultaneamente. Entretanto, não há uma única solução que apresente o melhor desempenho em todos os parâmetros de avaliação. Por exemplo, na cidade de Florianópolis, a cobertura fria apresentou o melhor desempenho nos parâmetros de energia e custo, enquanto a cobertura verde apresentou os melhores resultados de temperatura da superfície e conforto térmico. A escolha se torna ainda mais difícil em situações em que os parâmetros de avaliação não apresentam igual importância.

Dessa forma, o método TOPSIS considera os pesos relativos de cada parâmetro para classificar as alternativas. A Figura 27 apresenta os valores de proximidade de cada alternativa de cobertura com a solução ideal. A alternativa mais sustentável é aquela mais próxima da solução ideal.

Figura 27 - Proximidade das coberturas convencional, fria e verde com a solução ideal em Florianópolis, Curitiba e Brasília



Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Os dados apresentados na Figura 27 mostram que a cobertura fria sem isolamento foi a alternativa de cobertura mais sustentável nas cidades de Florianópolis e Brasília, seguida pela cobertura verde sem isolamento. Apesar de a cobertura fria resultar em menor número de horas de conforto térmico (parâmetro que obteve maior peso) e maior temperatura de pico da superfície externa em comparação com a cobertura verde, apresentou menor consumo de energia no ciclo de vida e custo do ciclo de vida significativamente menor.

Em Curitiba, a cobertura verde sem isolamento foi identificada como a melhor solução. Apesar do maior custo do ciclo de vida, apresentou o menor consumo de energia no ciclo de vida, a menor temperatura de pico da superfície externa e maior número de horas de conforto térmico em comparação com as coberturas convencional e fria sem isolamento. As coberturas convencionais, com e sem isolamento, ficaram com as últimas posições em todas as cidades devido ao pior desempenho nos parâmetros que representam aspectos ambientais e sociais, aos quais foi dado maior peso.

O isolamento térmico diminuiu a proximidade com a solução ideal em todas as cidades. De modo geral, a consideração do isolamento aumentou a temperatura de pico da superfície das coberturas ou foi irrelevante (no caso das coberturas verdes) e aumentou a energia consumida e o custo do ciclo de vida. Uma exceção foi observada quanto à cobertura convencional em Curitiba, em que o isolamento reduziu a energia consumida e o custo do ciclo

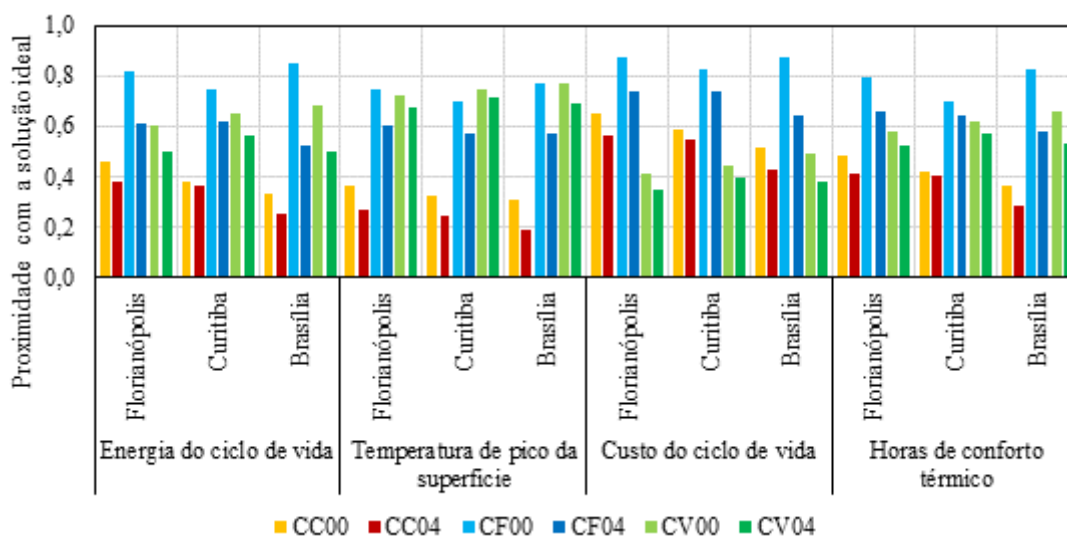
de vida devido à redução do consumo de energia com climatização na fase operacional. Quanto ao número de horas de conforto térmico nos ambientes de permanência prolongada, o efeito do isolamento variou conforme a tipologia de cobertura e o contexto climático. Entretanto, em nenhum caso, a utilização do isolamento foi considerada adequada a partir do indicador fornecido pelo método multicritério.

Os resultados permitiram uma leitura clara e objetiva, facilitando a escolha das soluções de cobertura em relação aos quatro parâmetros de avaliação a partir de um único indicador. Além disso, esta avaliação mostrou que ainda há espaço para melhorias nos sistemas de cobertura, uma vez que os valores de proximidade com a solução ideal alcançados pelas coberturas fria e verde estão longe de uma alternativa completamente ideal (proximidade igual a um).

O método proposto permitiu a realização de uma análise ampla das tipologias de cobertura, considerando o desempenho das alternativas em contextos brasileiros específicos. Entretanto, deve ser ressaltado que os valores de proximidade com a solução ideal que ordenam as coberturas são afetados pelo peso dos parâmetros de avaliação definidos com base na opinião de um grupo de profissionais, que consiste em uma fonte de incerteza. Dessa forma, foi conduzida uma análise de sensibilidade para investigar como variações nas ponderações dos parâmetros influenciam os resultados. Para esta análise, os pesos dos parâmetros (Tabela 24) foram modificados, considerando um dos parâmetros como preponderante. A Figura 28 apresenta os resultados da reaplicação do método TOPSIS considerando estes cenários.

Nos quatro cenários de ponderação alternativos, a cobertura fria sem isolamento foi considerada a melhor solução nas três cidades, com exceção do cenário em que a temperatura de pico da superfície foi considerada como o parâmetro mais relevante. Neste cenário, a cobertura verde sem isolamento se manteve como a melhor solução para a cidade de Curitiba. As coberturas frias reduzem o consumo de energia do ciclo de vida e a temperatura de pico da superfície com relação às coberturas convencionais, sem representar um aumento relevante do custo, como as coberturas verdes.

Figura 28 - Proximidade das coberturas convencional, fria e verde com a solução ideal sob os cenários de ponderação alternativos em Florianópolis, Curitiba e Brasília



Nota: o parâmetro indicado em cada cenário representa aquele que foi considerado preponderante (peso 0,40). Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Nos cenários que consideraram preponderantes os parâmetros que representam aspectos ambientais e sociais, a segunda posição foi ocupada pela cobertura fria com isolamento ou pela cobertura verde sem isolamento. No cenário que considerou custo como o critério mais relevante, as coberturas verdes ocuparam as últimas posições do ordenamento.

Esta análise mostra a superioridade da cobertura fria em diferentes cenários e reforça que mais investigações e investimentos devem ser realizados para reduzir o custo das coberturas verdes, principalmente durante a fase de manutenção, que representa parcela significativa do custo do ciclo de vida desta tipologia. Ressalta-se que o desempenho das coberturas frias depende significativamente de sua refletância solar (considerada 0,58 neste estudo). Este valor pode ser considerado conservador, tendo em vista que materiais com refletâncias superiores a 0,80 podem ser utilizados. Entretanto, a refletância solar reduz rapidamente no primeiro ano de vida útil devido ao desgaste e à sujeira e esse aspecto deve ser considerado.

4.5. Síntese dos resultados

Com o intuito de reunir os principais achados desta pesquisa e proporcionar uma compreensão clara do desempenho das coberturas em relação aos parâmetros de avaliação e ao indicador fornecido pelo método multicritério, o Quadro 3 apresenta a síntese dos resultados.

Quadro 3 - Síntese dos resultados da pesquisa

Parâmetro de avaliação	Principais resultados quanto à tipologia de cobertura	Principais resultados quanto ao isolamento térmico
Energia de resfriamento e aquecimento	As coberturas fria e verde sem isolamento apresentaram melhor desempenho. As coberturas frias reduziram o consumo de energia com climatização em 16,7% em Florianópolis e em 24,8% em Brasília. Em Curitiba, a cobertura verde foi mais eficiente, reduzindo o consumo anual em 28,2% em comparação com a cobertura convencional.	A utilização do isolamento térmico reduziu o consumo anual de energia apenas na cobertura convencional em Curitiba. Nos demais casos, a presença do isolamento aumentou o consumo com climatização, pois apesar de reduzir a necessidade de aquecimento, aumentou a demanda de resfriamento, predominante nos contextos avaliados.
Temperatura da superfície externa	Quanto às coberturas sem isolamento, a cobertura convencional registrou os maiores valores de temperatura de pico da superfície externa (61,9°C a 65,5°C) e a verde, os menores (39,1°C a 41,4°C).	A adição de isolamento aumentou as temperaturas de pico das coberturas convencional e fria em até 7,2°C, e não exerceu impacto nas coberturas verdes.
Conforto térmico dos usuários	A cobertura verde resultou nos maiores percentuais de conforto térmico em todos os climas considerados.	Na cobertura convencional, o isolamento aumentou as horas de conforto térmico. Nas coberturas fria e verde, de modo geral, o isolamento reduziu as horas de conforto térmico em ambientes e climas onde o desconforto ocorre predominantemente por calor.
Avaliação do ciclo de vida energético (ACVE)	Em um horizonte de 40 anos, a cobertura fria apresentou o menor consumo energético em Florianópolis e Brasília, com reduções de 14,0% e 21,3%, respectivamente, em comparação à cobertura convencional. Em Curitiba, a cobertura verde foi mais eficiente, reduzindo em 22,1% o consumo ao longo do ciclo de vida.	O isolamento térmico reduziu o consumo de energia ao longo do ciclo de vida apenas na cobertura convencional em Curitiba, alinhando-se com a tendência verificada na fase de energia operacional (energia de resfriamento e aquecimento).
Análise do custo do ciclo de vida (ACCV)	Em todos os climas, a cobertura fria sem isolamento foi a que apresentou o menor custo do ciclo de vida de 40 anos, com reduções entre 7,4% e 15,9% em comparação com a cobertura convencional e entre 27,5% e 32,8% em comparação com a verde.	A inclusão de isolamento térmico aumentou o custo do ciclo de vida em todos os cenários, exceto na cobertura convencional em Curitiba.
Método multicritério para determinação da tipologia de cobertura mais sustentável em termos energéticos	Considerando o desempenho das coberturas simultaneamente em todos os parâmetros de avaliação e a opinião de um grupo de especialistas, a cobertura fria foi considerada a mais sustentável em Florianópolis e Brasília e a cobertura verde, em Curitiba.	A partir do indicador único que contempla os quatro parâmetros de avaliação do desempenho das coberturas, fornecido pelo método multicritério, a utilização do isolamento térmico não foi considerada adequada em nenhum caso.

5. Conclusões

Esta pesquisa propôs um método abrangente de avaliação de coberturas, integrado ao ciclo de vida, que incorporou critérios ambientais, econômicos e sociais, com ênfase no desempenho termoenergético de edificações residenciais. Foram avaliadas as coberturas convencional, fria e verde, com e sem isolamento térmico, por meio de uma abordagem multidisciplinar a fim de identificar a tipologia mais sustentável em termos energéticos. Os parâmetros de avaliação adotados foram energia consumida no ciclo de vida (ACVE), temperatura da superfície externa, custo do ciclo de vida (ACCV) e conforto térmico. Para alcançar os objetivos propostos, um apartamento localizado no último andar de uma edificação residencial multifamiliar foi avaliado considerando as diferentes tipologias de cobertura em três cidades brasileiras: Florianópolis, Curitiba e Brasília.

Adicionalmente, durante o período de doutorado-sanduíche, foi conduzida uma pesquisa sobre a evapotranspiração em coberturas verdes e sua relação com a redução da temperatura superficial destas coberturas. As análises foram realizadas considerando os contextos climáticos de Florianópolis (Brasil) e Lisboa (Portugal). As principais conclusões deste estudo podem ser encontradas em Scolari, Ghisi e Silva (2024).

Para avaliar o desempenho das coberturas, uma análise detalhada foi conduzida para cada parâmetro considerado. Quanto ao consumo de energia no ciclo de vida, em um horizonte de 40 anos, a pesquisa identificou que coberturas frias são mais eficientes em termos de consumo de energia em climas quentes, como Florianópolis e Brasília, enquanto coberturas verdes são mais eficientes em climas frios, como Curitiba. O isolamento térmico reduziu o consumo de energia em coberturas convencionais em climas frios, mas apresentou efeito limitado ou adverso em climas quentes e em coberturas frias e verdes. A energia operacional, que constitui a maior parte do ciclo de vida energético (64,7% a 84,0%), foi determinante para esses resultados.

Com relação ao consumo de energia na fase operacional, recomenda-se o uso de coberturas frias em climas quentes, como Florianópolis e Brasília, onde podem reduzir o consumo de eletricidade em até 24,8% em relação às coberturas convencionais. Em climas mais frios, como em Curitiba, as coberturas verdes demonstraram maior eficiência, reduzindo o consumo de energia em 28,2% comparado à cobertura convencional. A energia embutida inicial, principalmente associada aos materiais utilizados, também mostrou relevância, representando entre 15,7% e 34,6% do total. Nesse contexto, os materiais adotados que

necessitam de alternativas de menor consumo energético foram destacados. As energias de manutenção e desconstrução não apresentaram impacto significativo.

As temperaturas superficiais das coberturas foram utilizadas como indicativo da influência de cada tipologia na mitigação dos efeitos das ilhas de calor. Coberturas verdes e frias demonstraram ser eficazes na redução dessas temperaturas. Considerando as temperaturas horárias da superfície externa, as coberturas convencionais alcançaram os valores mais altos, com máximas horárias entre 61,9°C e 65,5°C, conforme a cidade. As coberturas verdes apresentaram as temperaturas mais baixas, com máximas entre 39,1°C e 41,4°C, enquanto as coberturas frias exibiram valores intermediários, entre 47,8°C e 49,9°C. A temperatura da superfície externa das coberturas convencionais e frias aumentou com o isolamento térmico, e a da cobertura verde não foi afetada. Portanto, do ponto de vista de mitigação das ilhas de calor, o isolamento térmico não é recomendado.

O parâmetro custo do ciclo de vida representou o aspecto econômico do método. Em todos os climas analisados, a cobertura fria sem isolamento apresentou o menor custo de ciclo de vida. Embora seu custo inicial seja superior ao da cobertura convencional, a economia de energia ao longo de 40 anos resulta em uma redução de custo total entre 6,6% e 14,9%. A maior redução foi observada em Brasília, devido ao elevado consumo de energia para climatização e ao valor da tarifa de energia elétrica, que torna o custo operacional mais relevante nesse contexto. Os benefícios da cobertura verde em reduzir o custo com energia para climatização são ofuscados pelos seus custos iniciais e de manutenção, resultando em custo total entre 20,3% e 40,1% maior que o das coberturas convencionais. A adição de isolamento térmico aumentou o custo do ciclo de vida em todos os cenários. A fase operacional foi a mais representativa no custo de ciclo de vida das coberturas convencionais e frias, enquanto nas coberturas verdes, a fase de manutenção também se destacou, principalmente devido aos altos índices de inflação e reajuste do salário mínimo. Na fase inicial, aproximadamente 90,0% dos custos foram atribuídos à aquisição de materiais e uso de equipamentos para instalação. Nas fases de manutenção e demolição, o custo da mão de obra foi predominante.

O conforto térmico dos usuários representou o aspecto social. As horas de conforto térmico dos usuários do apartamento com as diferentes coberturas foram avaliadas considerando ventilação natural durante os períodos ocupados. As coberturas verdes resultaram nos maiores percentuais de horas de conforto em todos os climas (entre 57,3% e 82,2% na sala e entre 69,8% e 96,3% nos dormitórios, dependendo do contexto climático). A adição de

isolamento térmico na cobertura convencional aumentou o percentual de horas de conforto térmico em todos os casos. Entretanto, em coberturas frias e verdes, o isolamento térmico reduziu o conforto em ambientes e climas onde o desconforto térmico é causado principalmente pelo calor, como na sala e no clima de Brasília. A modificação na configuração de ventilação natural não impactou a seleção da tipologia de cobertura mais adequada. Em todos os cenários analisados, a cobertura verde se manteve como a solução que proporcionou o maior percentual de horas de conforto térmico.

Os resultados obtidos pelas coberturas isoladamente em cada parâmetro de avaliação não permitiram determinar a cobertura considerada mais adequada. Nesse sentido, o método de tomada de decisão com base em múltiplos critérios possibilitou a escolha da alternativa mais sustentável em cada cidade. O questionário aplicado aos especialistas da construção civil mostrou a importância dos parâmetros sociais e ambientais nas escolhas dos profissionais. A determinação da melhor alternativa de cobertura mostrou ser sensível às condições de cada cidade. A cobertura fria sem isolamento mostrou-se a opção mais sustentável em Florianópolis e Brasília, enquanto a cobertura verde sem isolamento foi considerada a melhor escolha em Curitiba. As coberturas convencionais, com ou sem isolamento, tiveram o pior desempenho em todas as cidades devido à menor eficiência nos aspectos ambientais e sociais. O uso de isolamento térmico reduziu o desempenho geral das coberturas em todas as cidades. Ressalta-se que estes resultados são influenciados pelos pesos atribuídos aos parâmetros de avaliação, definidos a partir da opinião de um grupo de profissionais. Uma análise de sensibilidade realizada considerando cenários alternativos de ponderação dos parâmetros mostrou a superioridade das coberturas frias, enquanto as coberturas verdes perderam posições em cenários em que o custo foi o critério mais relevante.

O método proposto viabilizou uma análise abrangente das tipologias de cobertura em contextos específicos do Brasil, utilizando uma abordagem multicritério integrada ao ciclo de vida. Os resultados obtidos oferecem um suporte valioso para a escolha da tipologia de cobertura mais sustentável em termos energéticos. O método apresentado é aplicável a outras edificações e contextos climáticos, e permite que os modelos de cobertura sejam ajustados conforme as condições locais.

5.1. Limitações do trabalho

Algumas limitações podem ser identificadas na pesquisa:

- As análises foram realizadas somente em edificações residenciais multifamiliares, e as conclusões obtidas são específicas para essa tipologia e para as características consideradas.
- Nas simulações das coberturas convencional e fria, considerou-se o valor de absortância solar após degradação de três anos constante em todo o horizonte de análise. Ou seja, não foi considerada a degradação gradual, nem a restauração da absortância solar após os ciclos de lavagem, tendo em vista sua frequência quinquenal.
- Somente uma tipologia de cobertura verde foi avaliada. A consideração de outros materiais e camadas pode levar a diferentes resultados.
- Na avaliação do ciclo de vida energético (ACVE), foram utilizadas bases de dados nacionais ou internacionais, conforme disponibilidade. A ausência de uma base de dados ampla nacional é um fator limitante para pesquisas brasileiras.
- A análise do ciclo de vida considerou apenas o consumo de energia como categoria de impacto. A seleção de diferentes categorias de impacto pode influenciar significativamente a definição das alternativas de coberturas mais sustentáveis.
- Para a ponderação dos parâmetros de avaliação por meio do método AHP, foram utilizadas vinte respostas de especialistas por não ter sido obtido um número maior de respostas válidas considerando a razão de consistência inferior a 0,10. Essa limitação ocorreu devido à dificuldade dos participantes em realizar comparações par a par e distinguir níveis de julgamento da escala de comparação.
- Esta pesquisa limitou-se à avaliação integrada ao ciclo de vida com foco no desempenho termoenergético das coberturas. Apesar de considerar parâmetros ambientais, econômicos e sociais, critérios como gestão de água pluvial, emissões, isolamento acústico e criação de habitat não foram abordados.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

A partir das limitações levantadas, são sugestões para trabalhos futuros:

- Aplicar o método proposto em diferentes tipologias de edificação, como comercial e industrial.

- Investigar a viabilidade de lavagem mais frequente das coberturas convencional e fria para recuperação da absorção solar.
- Aplicar o método proposto considerando condições climáticas futuras.
- Avaliar diferentes materiais nas camadas da cobertura verde que apresentaram maior energia embutida e custo e verificar a influência destes materiais nos demais parâmetros de avaliação.
- Desenvolver uma base de dados nacional de energia embutida para os principais materiais de construção.
- Investigar como a inclusão de outras categorias de impacto ambiental influencia na escolha das coberturas, tanto do ponto de vista do proprietário, quanto do construtor.
- Aplicar o questionário utilizado para ponderação dos parâmetros para uma amostra maior de especialistas, buscando identificar se há distinção nas opiniões de profissionais da engenharia, arquitetura e pesquisa/docência. Sugere-se reduzir os níveis de julgamento da escala de comparação do método AHP, tendo em vista a dificuldade em obter respostas consistentes.
- Desenvolver uma metodologia multicritério abordando parâmetros relevantes não relacionados diretamente com o desempenho energético que possam interferir na escolha da tipologia de cobertura mais sustentável.

Referências

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: 2005.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: 2021.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16401-2**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro: 2008.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 10456**: Materiais e produtos de construção - Propriedades higrotérmicas - Valores e procedimentos de projeto tabulados para determinar valores térmicos declarados e de projeto. Rio de Janeiro: 2022.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: 2009a.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: 2009b.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **TR 15220-3-1**: Desempenho térmico de edificações Parte 3-1: Zoneamento bioclimático por desempenho - Lista de cidades brasileiras. Rio de Janeiro: 2024.
- AL-BUSAIDI, A.; YAMAMOTO, T.; TANAK, S.; MORITANI, S. Evapotranspiration of Succulent Plant. Evapotranspiration-An Overview. In: ALEXANDRIS, S. G. **Evapotranspiration - An Overview**. IntechOpen, 2013.
- ALLA, S. A.; BIANCO, V.; TAGLIAFICO, L. A.; SCARPA, F. Life-cycle approach to the estimation of energy efficiency measures in the buildings sector. **Applied Energy**, v. 264, p. 114745, 2020.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tarifa**. 2023. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes_liferay/tarifa/. Acesso em: 30 ago. 2023.
- ASCIONE, F.; BIANCO, N.; DE' ROSSI, F.; TURNI, G.; VANOLI, G. P. Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning?. **Applied Energy**, v. 104, p. 845–859, 2013.

ASCIONE, F.; DE MASI, R. F.; DE ROSSI, F.; RUGGIERO, S.; VANOLI, G. P. Optimization of building envelope design for nZEBs in Mediterranean climate: Performance analysis of residential case study. **Applied Energy**, v. 183, p. 938–957, 2016.

ASHRAE. **Standard 55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: 2020.

BALVEDI, B. F.; SCHAEFER, A.; BAVARESCO, M. V.; ECCEL, J. V.; GHISI, E. Identificação de perfis de comportamento do usuário para edificações residenciais multifamiliares e naturalmente ventiladas em Florianópolis. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 149–160, 2018.

BALVEDI, B. F.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. A review of occupant behaviour in residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 174, p. 495–505, 2018.

BALVEDI, N.; GIGLIO, T. Influence of green roof systems on the energy performance of buildings and their surroundings. **Journal of Building Engineering**, v. 70, 2023.

BANSAL, D.; SINGH, R.; SAWHNEY, R. L. Effect of construction materials on embodied energy and cost of buildings—A case study of residential houses in India up to 60 m² of plinth area. **Energy and Buildings**, v. 69, p. 260–266, 2014.

BCB, Banco Central do Brasil. **Taxas de juros básicas - Histórico**. 2024. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em: 24 maio 2024.

BESIR, A. B.; CUCE, E. Green roofs and facades: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 915–939, 2018.

BEVILACQUA, P. The effectiveness of green roofs in reducing building energy consumptions across different climates. A summary of literature results. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 151, p. 111523, 2021.

BLISS, D. J.; NEUFELD, R. D.; RIES, R. J. Storm Water Runoff Mitigation Using a Green Roof. **Environmental Engineering Science**, v. 26, n. 2, 2009.

BRACHET, A.; SCHIOPU, N.; CLERGEAU, P. Biodiversity impact assessment of building's roofs based on Life Cycle Assessment methods. **Building and Environment**, v. 158, p. 133–144, 2019.

BRETZ, S. E.; AKBARI, H. Long-term performance of high-albedo roof coatings. **Energy and Buildings**, v. 25, n. 2, p. 159–167, 1997.

CABEZA, L. F.; RINCÓN, L.; VILARIÑO, V.; PÉREZ, G.; CASTELL, A. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 394–416, 2014.

CANTO-PERELLO, J.; MARTINEZ-GARCIA, M. P.; CURIEL-ESPARZA, J.; MARTIN-UTRILLAS, M. Implementing Sustainability Criteria for Selecting a Roof Assembly Typology in Medium Span Buildings. **Sustainability**, v. 7, p. 6854–6871, 2015.

CARMINATTI JÚNIOR, R. **Análise do ciclo de vida energético de projeto de habitação de interesse social concebido em light steel framing**. 2012. 164 f. Universidade Federal de São Carlos, 2012.

CARPENTER, C. M. G.; TODOROV, D.; DRISCOLL, C. T.; MONTESDEOCA, M. Water quantity and quality response of a green roof to storm events: Experimental and monitoring observations. **Environmental Pollution**, v. 218, p. 664–672, 2016.

CARPENTER, J.; ZHOU, J. Life cycle analysis of a st. louis flat roof residential retrofit for improved energy efficiency. *In: ICSDEC 2012: Developing the Frontier of Sustainable Design, Engineering, and Construction - Proceedings of the 2012 International Conference on Sustainable Design and Construction*. **Anais [...]** 2013. p. 20–28.

CARRERA, D.; LOMBILLO, I.; CARPIO-GARCÍA, J.; BLANCO, H. Assessment of different combinations of substrate-filter membrane in green roofs. **Journal of Building Engineering**, v. 45, p. 103455, 2022.

CASAGRANDE, T. **O desempenho de telhados verdes intensivos em termos de controle de temperaturas superficiais e retenção de águas pluviais na cidade de Curitiba - PR**. 2020. 144 f. Universidade Federal do Paraná, 2020.

CASCONE, S.; CATANIA, F.; GAGLIANO, A.; SCIUTO, G. A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings. **Building and Environment**, v. 136, p. 227–239, 2018.

CASTLETON, H. F.; STOVIN, V.; BECK, S. B. M.; DAVISON, J. B. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1582–1591, 2010.

CHENANI, S. B.; LEHVÄVIRTA, S.; HÄKKINEN, T. Life cycle assessment of layers of green roofs. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 153–162, 2015.

CIRRINCIONE, L.; MARVUGLIA, A.; SCACCIANOCE, G. Assessing the effectiveness of green roofs in enhancing the energy and indoor comfort resilience of urban buildings to climate change: Methodology proposal and application. **Building and Environment**, v. 205, p. 108198, 2021.

COLLIER Z.A., WANG D., VOGEL J.T., TATHAM E.K., Linkov I. Sustainable roofing technology under multiple constraints: A decision-analytical approach. **Environment Systems and Decisions**, v. 33, n. 2, p. 261–271, 2013.

COMA, J.; CHÀFER, M.; PÉREZ, G.; CABEZA, L. F. How internal heat loads of buildings affect the effectiveness of vertical greenery systems? An experimental study. **Renewable Energy**, v. 151, p. 919–930, 2020.

COMA, J.; PÉREZ, G.; CABEZA, L. F. Life cycle assessment of green roofs. *In: PÉREZ, G; PERINI, K. Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*. Butterworth-Heinemann, 2018.

COSTANZO, V.; EVOLA, G.; MARLETTA, L. Energy savings in buildings or UHI mitigation? Comparison between green roofs and cool roofs. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 247–255, 2016.

CRAWLEY, D.; LAWRIE, L. **Repository of free climate data for building performance simulation: Brazil, Region 3 - South America**. 2022. Disponível em: http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html. Acesso em: 23 ago. 2022.

CRRC, Cool Roof Rating Council. **What is a Cool Roof?**. 2022.

D’ORAZIO, M.; DI PERNA, C.; DI GIUSEPPE, E. The effects of roof covering on the thermal performance of highly insulated roofs in Mediterranean climates. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1619–1627, 2010.

DABBAGHIAN, M.; HEWAGE, K.; REZA, B.; CULVER, K.; SADIQ, R. Sustainability performance assessment of green roof systems using fuzzy-analytical hierarchy process (FAHP). **International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development**, v. 5, n. 4, p. 260–276, 2014.

DASCALAKI, E. G.; ARGIROPOULOU, P.; BALARAS, C. A.; DROUTSA, K. G.; KONTOYIANNIDIS, S. Analysis of the embodied energy of construction materials in the life cycle assessment of Hellenic residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 232, p. 110651, 2021.

DIAS, A. E. **O desempenho térmico de uma cobertura verde em simulações computacionais em três cidades brasileiras**. 2016. 195 f. Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

DOMINGUEZ-DELGADO, A.; DOMÍNGUEZ-TORRES, H.; DOMÍNGUEZ-TORRES, C. Energy and Economic Life Cycle Assessment of Cool Roofs Applied to the Refurbishment of Social Housing in Southern Spain. **Sustainability**, v. 12, n. 14, p. 5602, 2020.

DOMÍNGUEZ, M. V. S.; GONZÁLEZ, E.; FABIÁN, D.; SALVO, A.; FENOGLIO, M. S. Arthropod diversity and ecological processes on green roofs in a semi-rural area of Argentina: Similarity to neighbor ground habitats and landscape effects. **Landscape and Urban Planning**, v. 199, p. 103816, 2020.

DWAIKAT, L. N.; ALI, K. N. Green buildings life cycle cost analysis and life cycle budget development: Practical applications. **Journal of Building Engineering**, v. 18, p. 303–311, 2018.

EKMEKCIOĞLU, Ö. On the identification of most appropriate green roof types for urbanized cities using multi-tier decision analysis: A case study of Istanbul, Turkey. **Sustainable Cities and Society**, v. 96, p. 104707, 2023.

EKSI, M.; SEVGI, O.; AKBURAK, S.; YURTSEVEN, H.; ESIN, İ. Assessment of recycled or locally available materials as green roof substrates. **Ecological Engineering**, v. 156, p. 105966, 2020.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional**. Ano base 2023. 2024.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Nota técnica EPE 030/2018**: Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. 2018.

FERRANTE, P.; LA GENNUSA, M.; PERI, G.; RIZZO, G.; SCACCIANOCE, G. Vegetation growth parameters and leaf temperature: Experimental results from a six plots green roofs' system. **Energy**, v. 115, p. 1723–1732, 2016.

FLL. **Green Roof Guidelines**. Guidelines for the planning, construction and maintenance of green roofs. 2018.

FRANCESQUETT, J. Z.; COSTA, A. B.; FERRAO, M.; MARDER, L.; VIERA, M. S. Quantificação do poder calorífico da gasolina utilizando infravermelho próximo e análise multivariada. *In*: XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Belo Horizonte. **Anais [...]** 2011.

FRANCO, L. A.; MONTIBELLER, G. Problem Structuring for Multicriteria Decision Analysis Interventions. *In*: COCHRAN, J. J. **Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science**. John Wiley & Sons: 2011.

GAGLIANO, A.; DETOMMASO, M.; NOCERA, F.; EVOLA, G. A multi-criteria methodology for comparing the energy and environmental behavior of cool, green and traditional roofs. **Building and Environment**, v. 90, p. 71–81, 2015.

GAGLIANO, A.; DETOMMASO, M.; NOCERA, F.; BERARDI, U. The adoption of green roofs for the retrofitting of existing buildings in the Mediterranean climate. **International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development**, v. 7, n. 2, p. 116–129, 2016.

GOMES, R.; SILVESTRE, J. D.; DE BRITO, J. Environmental, economic and energy life cycle assessment “from cradle to cradle” (3E-C2C) of flat roofs. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101436, 2020.

GUO, R.; GAO, Y.; ZHUANG, C.; HEISELBERG, P.; LEVINSON, R.; ZHAO, X.; SHI, D. Optimization of cool roof and night ventilation in office buildings: A case study in Xiamen, China. **Renewable Energy**, v. 147, p. 2279–2294, 2020.

GUZMÁN-SÁNCHEZ, S.; JATO-ESPINO, D.; LOMBILLO, I.; DIAZ-SARACHAGA, J. M. Assessment of the contributions of different flat roof types to achieving sustainable development. **Building and Environment**, v. 141, p. 182–192, 2018.

HAMMOND, G.; JONES, C. A BSRIA Guide. **Embodied Carbon**: The Inventory of Carbon and Energy. Ice, 2011.

HAPPLE, G.; FONSECA, J. A.; SCHLUETER, A. A review on occupant behavior in urban building energy models. **Energy and Buildings**, v. 174, p. 276–292, 2018.

HEIDARINEJAD, G.; ESMAILI, A. Numerical simulation of the dual effect of green roof thermal performance. **Energy Conversion and Management**, v. 106, p. 1418–1425, 2015.

HERNÁNDEZ-PÉREZ, I.; ÁLVAREZ, G.; XAMÁN, J.; ZAVALA-GUILLÉN, I.; ARCE, J.; SIMÁ, E. Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components - A review. **Energy and Buildings**, v. 80, p. 81–105, 2014.

HERRERA, J. A. Q. **Quantificação e correlação das variáveis do ciclo de vida energético da edificação: energia incorporada na envolvente arquitetônica e consumo energético pelo comportamento térmico, caso de estudo: moradia**. 2013. 172 f. Universidade de São Paulo, 2013.

HONG, T.; YAN, D.; D'OCA, S.; CHEN, C. F. Ten questions concerning occupant behavior in buildings: The big picture. **Building and Environment**, v. 114, p. 518–530, 2017.

HWANG, C.L., YOON, K. Methods for Multiple Attribute Decision Making. In: BECKMANN, M.; KUNZI, H.P. (org.). **Multiple Attribute Decision Making. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems**. Berlin: Springer, 1981.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IPCA - Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo. Séries históricas. Variação acumulada no ano durante o Plano Real (%), dezembro 1995 - dezembro 2022**. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html?t=series-historicas>. Acesso em: 28 ago. 2023.

IEA, International Energy Agency. **Buildings: A source of enormous untapped efficiency potential**. 2020.

IEA, International Energy Agency. **Buildings**. 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/buildings>. Acesso em: 02 set. 2024.

IMRAN, H. M.; KALA, J.; NG, A. W. M.; MUTHUKUMARAN, S. E. Effectiveness of green and cool roofs in mitigating urban heat island effects during a heatwave event in the city of Melbourne in southeast Australia. *J. Clean. Prod.* 2018, 197, 393–405, doi:. **Journal of Cleaner Production**, v. 197, p. 393–405, 2018.

INMETRO. **Anexo II da Portaria INMETRO N° 309/2022. Instrução Normativa Inmetro para a eficiência energética das edificações residenciais**. 2022.

INVIDIATA, A.; LAVAGNA, M.; GHISI, E. Selecting design strategies using multi-criteria decision making to improve the sustainability of buildings. **Building and Environment**, v. 139, p. 58–68, 2018.

IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Salário Mínimo**. 2023. Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/ExibeSerie.aspx?serid=1739471028>. Acesso em: 28 ago. 2023.

ISLAM, H.; JOLLANDS, M.; SETUNGE, S. Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 129–140, 2015.

ISO, International Organization for Standardization. **EN 15251**: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. 2007.

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 14040**: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. 2006a.

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 14044**: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. 2006b.

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 15686-5**: Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 5: Life-cycle costing. 2017.

JAMEI, E.; CHAU, H. W.; SEYEDMAHMOUDIAN, M.; STOJCEVSKI, A. Review on the cooling potential of green roofs in different climates. **Science of The Total Environment**, v. 791, p. 148407, 2021.

JATO-ESPINO, D.; INDACOECHEA-VEGA, I.; GÁSPÁR, L.; CASTRO-FRESNO, D. Decision support model for the selection of asphalt wearing courses in highly trafficked roads. **Soft Computing**, v. 22, n. 22, 2018.

KALBUSCH, A.; GHISI, E. Método para quantificação do consumo energético no ciclo de vida de equipamentos hidrossanitários. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 3, p. 57–73, 2012.

KAMIMURA, A. M.; RUPP, R. F.; FOSSATI, M.; LAMBERTS, R. CB3E. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações. **Relatório**: Fatores de conversão de energia elétrica e térmica em energia primária e em emissões de dióxido de carbono a serem usados na etiquetagem de nível de eficiência energética de edificações, 2020.

KARACHALIOU, P.; SANTAMOURIS, M.; PANGALOU, H. Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 256–264, 2016.

KARIMPOUR, M.; BELUSKO, M.; XING, K.; BRUNO, F. Minimising the life cycle energy of buildings: Review and analysis. **Building and Environment**, v. 73, p. 106–114, 2014.

KIM, E.; JUNG, J.; HAPSARI, G.; KANG, S.; KIM, K.; YOON, S.; LEE, M.; HAN, M.; CHOI, Y.; CHOE, J. K. Economic and environmental sustainability and public perceptions of rooftop farm versus extensive garden. **Building and Environment**, v. 146, p. 206–215, 2018.

KOLOKOTSA, D.; SANTAMOURIS, M.; ZEREFOS, S. C. Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions. **Solar Energy**, v. 95, p. 118–130, 2013.

KOROL, E.; SHUSHUNOVA, N. Benefits of a Modular Green Roof Technology. **Procedia Engineering**, v. 161, p. 1820–1826, 2016.

KOROXENIDIS, E.; THEODOSIOU, T. Comparative environmental and economic evaluation of green roofs under Mediterranean climate conditions – Extensive green roofs a potentially preferable solution. **Journal of Cleaner Production**, v. 311, p. 127563, 2021.

LANGEMEYER, J.; WEDGWOOD, D.; MCPHEARSON, T.; BARÓ, F.; MADSEN, A. L.; BARTON, D. N. Creating urban green infrastructure where it is needed – A spatial ecosystem service-based decision analysis of green roofs in Barcelona. **Science of The Total Environment**, v. 707, p. 135487, 2020.

LASKARI, M.; DE MASI, R. F.; KARATASOU, S.; SANTAMOURIS, M.; ASSIMAKOPOULOS, M. N. On the impact of user behaviour on heating energy consumption and indoor temperature in residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 255, p. 111657, 2022.

LI, X. X.; NORFORD, L. K. Evaluation of cool roof and vegetations in mitigating urban heat island in a tropical city, Singapore. **Urban Climate**, v. 16, p. 59–74, 2016.

LIMA JUNIOR, F. R.; OSIRO, L.; CARPINETTI, L. C. R. A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection. **Applied Soft Computing Journal**, v. 21, 2014.

LOIKKANEN, O.; LAHDELMA, R.; SALMINEN, P. Multicriteria evaluation of sustainable energy solutions for Colosseum. **Sustainable Cities and Society**, v. 35, p. 289–297, 2017.

LOPES, T. V. **Telhado verde, energia embutida e emissão de CO₂: Uma análise comparativa a sistemas de cobertura convencionais**. 2014. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

MAHDIYAR, A.; TABATABAEE, S.; DURDYEV, S.; ISMAIL, S.; ABDULLAH, A.; RANI, W. M. W. N. M. A prototype decision support system for green roof type selection: A cybernetic fuzzy ANP method. **Sustainable Cities and Society**, v. 48, p. 101532, 2019.

MAHMOUD, A. S.; ASIF, M.; HASSANAIN, M. A.; BABSAIL, M. O.; SANNI-ANIBIRE, M. O. Energy and economic evaluation of green roofs for residential buildings in hot-humid climates. **Buildings**, v. 7, n. 2, 2017.

MARQUES, V. M.; GOMES, L. P.; KERN, A. P. Avaliação ambiental do ciclo de vida de telhas de fibrocimento com fibras de amianto ou com fibras de polipropileno. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 187–201, 2016.

MARSHALL, E.; STEINBERGER, J. K.; DUPONT, V.; FOXON, T. J. Combining energy efficiency measure approaches and occupancy patterns in building modelling in the UK residential context. **Energy and Buildings**, v. 111, p. 98–108, 2016.

MARSZAL, A. J.; HEISELBERG, P.; LUND JENSEN, R.; NØRGAARD, J. On-site or off-site renewable energy supply options? Life cycle cost analysis of a Net Zero Energy Building in Denmark. **Renewable Energy**, v. 44, p. 154–165, 2012.

MAURER, B.; LIENERT, J.; COOK, L. M. Comparing PV-green and PV-cool roofs to diverse rooftop options using decision analysis. **Building and Environment**, v. 245, p. 110922, 2023.

MEESTER, T.; MARIQUE, A. F.; DE HERDE, A.; REITER, S. Impacts of occupant behaviours on residential heating consumption for detached houses in a temperate climate in the northern part of Europe. **Energy and Buildings**, v. 57, p. 313–323, 2013.

MITHRARATNE, N.; VALE, B. Life cycle analysis model for New Zealand houses. **Building and Environment**, v. 39, n. 4, 2004.

MOTLAGH, S. H.B.; PONS, O.; HOSSEINI, S. M.A. Sustainability model to assess the suitability of green roof alternatives for urban air pollution reduction applied in Tehran. **Building and Environment**, v. 194, p. 107683, 2021.

MOTUZIENE, V.; ROGOŽA, A.; LAPINSKIENE, V.; VILUTIENE, T. Construction solutions for energy efficient single-family house based on its life cycle multi-criteria analysis: a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 532–541, 2016.

MYRANS, K. **Comparative Energy and Carbon Assessment of Three Green Technologies for a Toronto Roof**. 2009. University of Toronto, 2009.

OPPIO, A.; CAPRIOLI, C.; DELL'OVO, M.; BOTTERO, M. Assessing Ecosystem Services through a multimethodological approach based on multicriteria analysis and cost-benefits analysis: A case study in Turin (Italy). **Journal of Cleaner Production**, v. 472, p. 143472, 2024.

PARIZOTTO, S.; LAMBERTS, R. Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 7, p. 1712–1722, 2011.

PAULSEN, J. S.; SPOSTO, R. M. A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “MY HOUSE MY LIFE”. **Energy and Buildings**, v. 57, p. 95–102, 2013.

PEDROSO, G. M.. **Avaliação de Ciclo de Vida Energético (ACVE) de sistemas de vedação de habitações**. 2015. 288 f. Universidade de Brasília, 2015.

PEREIRA, C. D. **Influência da refletância e da emitância de superfícies externas no desempenho térmico de edificações**. 2014. 207 f. Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

PISELLI, C.; PISELLO, A. L.; SAFFARI, M.; GARCIA, A.; COTANA, F.; CABEZA, L. Cool roof impact on building energy need: The role of thermal insulation with varying climate conditions. **Energies**, v. 12, n. 17, 2019.

PISELLI, C.; SAFFARI, M.; DE GRACIA, A.; PISELLO, A. L.; COTANA, F.; CABEZA, L. F. Optimization of roof solar reflectance under different climate conditions, occupancy, building configuration and energy systems. **Energy and Buildings**, v. 151, p. 81–97, 2017.

PISELLO, A. L. State of the art on the development of cool coatings for buildings and cities. **Solar Energy**, v. 144, p. 660–680, 2017.

PISELLO, A. L.; PISELLI, C.; COTANA, F. Influence of human behavior on cool roof effect for summer cooling. **Building and Environment**, v. 88, p. 116–128, 2015.

RAHMAN, S.; PERERA, S.; ODEYINKA H., BI, Y. A conceptual knowledge-based cost model for optimizing the selection of materials and technology for building design. *In*: Dainty, A (Ed) Procs 24th Annual ARCOM Conference. **Anais** [...]. Cardiff: Association of Researchers in Construction Management, 2008. p. 217-225.

RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1592–1600, 2010.

RAMOS, G.; LAMBERTS, R.; ABRAHÃO, K. C. F. J.; BANDEIRA, F. B.; BARBOSA TEIXEIRA, C. F.; BRITO DE LIMA, M.; BRODAY, E. E.; CASTRO, A. P. A. S.; DE QUEIROZ LEAL, L.; DE VECCHI, R.; DE ZORZI, L. M.; DORNELLES, K. A.; DUARTE, S.; FAISCA, R. G.; FONTENELLE, M.; FREITAS, T.; GREGORIO ATEM, C.; GRIGOLETTI, G.; MACIEL, L.; MORAES, C. M.; MUELLER, C. M.; SARTORI, T.; SILVA, B.; SILVA, C.; VILAR DA SILVA, M.; SILVEIRA, A. L.; SOUZA, R. V. G.; XAVIER, A. A. Adaptive behaviour and air conditioning use in Brazilian residential buildings. **Building Research & Information**, v. 49, n. 5, p. 496–511, 2021.

REDDY, B. V. V.; JAGADISH, K. S. Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 2, p. 129–137, 2003.

ROMAN, K. K.; O'BRIEN, T.; ALVEY, J. B.; WOO, O. J. Simulating the effects of cool roof and PCM (phase change materials) based roof to mitigate UHI (urban heat island) in prominent US cities. **Energy**, v. 96, p. 103–117, 2016.

ROSADO, P. J.; FAULKNER, D.; SULLIVAN, D. P.; LEVINSON, R. Measured temperature reductions and energy savings from a cool tile roof on a central California home. **Energy and Buildings**, v. 80, p. 57–71, 2014.

ROSASCO, P.; PERINI, K. Selection of (green) roof systems: A sustainability-based multi-criteria analysis. **Buildings**, v. 9, n. 5, 2019.

ROSSI, F.; CASTELLANI, B.; PRESCIUTTI, A.; MORINI, E.; ANDERINI, E.; FILIPPONI, M.; NICOLINI, A. Experimental evaluation of urban heat island mitigation potential of retro-reflective pavement in urban canyons. **Energy and Buildings**, v. 126, p. 340–352, 2016.

RUÁ, J.; PITARCH, A. M.; ARÍN, I.; REIG, L. A Roof Refurbishment Strategy to Improve the Sustainability of Building Stock: A Case Study. **Sustainability (Switzerland)**, v. 16, n. 5, 2024.

SAADATIAN, O.; SOPIAN, K.; SALLEH, E.; LIM, C. H.; RIFFAT, S.; SAADATIAN, E.; TOUDESHPKI, A.; SULAIMAN, M. Y. A review of energy aspects of green roofs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 155–168, 2013.

SAAFI, K.; DAOUAS, N. A life-cycle cost analysis for an optimum combination of cool coating and thermal insulation of residential building roofs in Tunisia. **Energy**, v. 152, p. 925–938, 2018.

SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9–26, 1990.

SAILOR, D. J. A green roof model for building energy simulation programs. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 8, p. 1466–1478, 2008.

SAILOR, D.J.; ELLEY, T. B.; GIBSON, M. Exploring the building energy impacts of green roof design decisions-a modeling study of buildings in four distinct climates. **Journal of Building Physics**, v. 35, n. 4, 2012.

SAILOR, D. J.; HUTCHINSON, D.; BOKOVOY, L. Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 7, p. 1246–1251, 2008.

SANTAMOURIS, M.; PAVLOU, C.; DOUKAS, P.; MIHALAKAKOU, G.; SYNNEFA, A.; HATZIBIROU, A.; PATARGIAS, P. Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece. **Energy**, v. 32, n. 9, 2007.

SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. **Solar energy**, v. 85, n. 12, p. 3085–3102, 2011.

SARTORI, T.; CALMON, J. L. Analysis of the impacts of retrofit actions on the life cycle energy consumption of typical neighbourhood dwellings. **Journal of Building Engineering**, v. 21, p. 158–172, 2019.

SARTORI, I.; HESTNES, A. G. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 3, p. 249–257, 2007.

SCOLARO, T. P.; GHISI, E. Desempenho térmico de coberturas verdes com diferentes configurações em Florianópolis – SC. In: XVI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e XII Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais [...]**. 2021. p. 801–810.

SCOLARO, T. P.; GHISI, E. Life cycle assessment of green roofs: A literature review of layers materials and purposes. **Science of The Total Environment**, v. 829, p. 154650, 2022.

SCOLARO, T. P.; GHISI, E.; SILVA, C. M. Assessing the impact of evapotranspiration from green roofs on reducing surface temperatures. **Journal of Building Engineering**, v. 95, p. 110095, 2024.

SHAFIQUE, M.; AZAM, A.; RAFIQ, M.; ATEEQ, M.; LUO, X. An overview of life cycle assessment of green roofs. **Journal of Cleaner Production**, v. 250, 2020.

SHI, D.; GAO, Y.; GUO, R.; LEVINSON, R.; SUN, Z.; LI, B. Life cycle assessment of white roof and sedum-tray garden roof for office buildings in China. **Sustainable Cities and Society**, v. 46, p. 101390, 2019.

SHIRAKAWA, M. A.; DE LIMA, L. N.; GAYLARDE, C.; FERNANDES-HACHICH, V.; JUNIOR, J. D. A. S.; JOHN, V. M. Effects of natural aging on the properties of a cool surface exposed in different Brazilian environments. **Energy and Buildings**, v. 221, p. 110031, 2020.

SIDAC, Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção. **Conteúdo Técnico**. 2024. Disponível em: https://sidac.org.br/conteudo_tecnico. Acesso em: 15 jul. 2024.

SILVA, L. P. **Análise do ciclo de vida energético de habitações de interesse social**. 2012. 185 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

SILVA, M. P. **Simulação termoenergética e análise econômica do uso de telhados de alta refletância solar em uma residência unifamiliar**. 2019. 162 f. Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

SILVA, A. L. G.; ETULAIN, C. R. **Avaliação do Impacto Econômico da Proibição do Uso do Amianto na Construção Civil no Brasil**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2010.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Uncertainty analysis of user behaviour and physical parameters in residential building performance simulation. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 381–391, 2014.

SILVA, C. M.; GOMES, M. G.; SILVA, M. Green roofs energy performance in Mediterranean climate. **Energy and Buildings**, v. 116, p. 318–325, 2016.

SINAPI. **Referências de preços e custos - DF 05/2023 não desonerado**. 2023a. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 6 jul. 2023.

SINAPI. **Referências de preços e custos - PR 05/2023 não desonerado**. 2023b. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 6 jul. 2023.

SINAPI. **Referências de preços e custos - SC 05/2023 não desonerado**. 2023c. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 6 jul. 2023.

SONETTI, G.; LOMBARDI, P. Multi-criteria decision analysis of a building element integrating energy use, environmental, economic and aesthetic parameters in its life cycle. In: MONDINI, Giulio *et al.* (org.). **Values and Functions for Future Cities**. Cham: Springer, 2020. p. 463–477.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 1–13, 2016.

SPROUL, J.; WAN, M. P.; MANDEL, B. H.; ROSENFELD, A. H. Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States. **Energy and Buildings**, v. 71, p. 20–27, 2014.

SYNNEFA, A.; SALIARI, M.; SANTAMOURIS, M. Experimental and numerical assessment of the impact of increased roof reflectance on a school building in Athens. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 7–15, 2012.

SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; AKBARI, H. Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 11, p. 1167–1174, 2007.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 2006. 225 f. - Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

TAVARES, S.F.; BRAGANÇA, L. Índices de CO₂ para materiais de construção em edificações brasileiras. *In: SBE16 Brazil & Portugal. Anais [...]*. 2016.

TCPO. **Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos**. 13a. ed. São Paulo: Pini, 2010.

TEEMUSK, A.; MANDER, U. Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: A case study from Estonia. **Building and Environment**, v. 44, n. 3, p. 643–650, 2009.

TEOTÓNIO, I.; OLIVEIRA CRUZ, C.; MATOS SILVA, C.; LOPES, R. F. R. Bridging CBA and MCA for evaluating green infrastructure: Proposal of a new evaluation model (MAGICA). **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 85, 2023.

TEOTÓNIO, I.; CABRAL, M.; CRUZ, C. O.; SILVA, C. M. Decision support system for green roofs investments in residential buildings. **Journal of Cleaner Production**, v. 249, p. 119365, 2020.

TONIETTO, T. L. **Telhado verde e telhado frio e suas contribuições para a redução da temperatura ambiente em construções na cidade de Cascavel no Oeste do estado do Paraná**. 2021. 72 f. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2021.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy Policy**, v. 87, p. 524–541, 2015.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Sustainable energy performance in Brazilian social housing: A proposal for a Sustainability Index in the energy life cycle considering climate change. **Energy and Buildings**, v. 242, p. 110845, 2021.

TRIANAPHYLLOU, E. **Multi-criteria decision making methods: A comparative study**. Springer, 2000.

UN-HABITAT. **World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities**. 2022.

U.S., Department of Energy. **Engineering Reference. EnergyPlus™ Version 9.3.0 Documentation**. 2021.

ULUBEYLI, S.; ARSLAN, V. Economic viability of extensive green roofs through scenario and sensitivity analyses: Clients' perspective. **Energy and Buildings**, v. 139, p. 314–325, 2017.

VACEK, P.; STRUHALA, K.; MATĚJKA, L. Life-cycle study on semi intensive green roofs. **Journal of Cleaner Production**, v. 154, p. 203–213, 2017.

VAHMANI, P.; SUN, F.; HALL, A.; BAN-WEISS, G. Investigating the climate impacts of urbanization and the potential for cool roofs to counter future climate change in Southern California. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 12, 2016.

VERA, S.; PINTO, C.; VICTORERO, F.; BUSTAMANTE, W.; BONILLA, C.; GIRONÁS, J.; ROJAS, V. Influence of Plant and Substrate Characteristics of Vegetated Roofs on a Supermarket Energy Performance Located in a Semiarid Climate. **Energy Procedia**, v. 78, p. 1171–1176, 2015.

VERA, S.; PINTO, C.; TABARES-VELASCO, P. C.; BUSTAMANTE, W.; VICTORERO, F.; GIRONÁS, J.; BONILLA, C. A. Influence of vegetation, substrate, and thermal insulation of an extensive vegetated roof on the thermal performance of retail stores in semiarid and marine climates. **Energy and Buildings**, v. 146, p. 312–321, 2017.

VILA, A.; PÉREZ, G.; SOLÉ, C.; FERNÁNDEZ, A. I.; CABEZA, L. F. Use of rubber crumbs as drainage layer in experimental green roofs. **Building and Environment**, v. 48, n. 1, p. 101–106, 2012.

VILČEKOVÁ, S.; BUDAJOVÁ, J.; HARČÁROVÁ, K.; MÉSÁROŠ, P.; KRÍDLOVÁ BURDOVÁ, E.; ZIMERMANN, R. The impact of green roofs' composition on its overall life cycle. **Journal of Environmental Management**, v. 369, p. 122363, 2024.

WARK, C.; WARK, W. Green roofs specifications and standards. **The Construction Editor**, v. 56, n. 8, p. 76–82, 2003.

WEERASINGHE, A.; RAMACHANDRA, T.; ROTIMI, J. O.B. Comparative life-cycle cost (LCC) study of green and traditional industrial buildings in Sri Lanka. **Energy and Buildings**, v. 234, p. 110732, 2021.

WONG, N. H.; CHEN, Y.; ONG, C. L.; SIA, A. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. **Building and Environment**, v. 38, n. 2, p. 261–270, 2003.

YAN, D.; HONG, T.; DONG, B.; MAHDAVI, A.; D'OCA, S.; GAETANI, I.; FENG, X. IEA EBC Annex 66: Definition and simulation of occupant behavior in buildings. **Energy and Buildings**, v. 156, p. 258–270, 2017.

YAO, L.; WU, Z.; WANG, Y.; SUN, S.; WEI, W.; XU, Y. Does the spatial location of green roofs affects runoff mitigation in small urbanized catchments?. **Journal of Environmental Management**, v. 268, p. 110707, 2020.

YOSHINO, H.; HONG, T.; NORD, N. IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings—Analysis and evaluation methods. **Energy and Buildings**, v. 152, p. 124–136, 2017.

ZANGENEH, M.; OMID, M.; AKRAM, A. A comparative study on energy use and cost analysis of potato production under different farming technologies in Hamadan province of Iran. **Energy**, v. 35, n. 7, 2010.

ZENG, C.; BAI, X.; SUN, L.; ZHANG, Y.; YUAN. Optimal parameters of green roofs in representative cities of four climate zones in China: A simulation study. **Energy and Buildings**, v. 150, p. 118–131, 2017.

ZINGRE, K. T.; WAN, M. P.; WONG, S. K.; TOH, W. B. T.; LEE, I. Y. L. Modelling of cool roof performance for double-skin roofs in tropical climate. **Energy**, v. 82, p. 813–826, 2015.

ZIOGOU, I.; MICHPOPOULOS, A.; VOULGARI, V.; ZACHARIADIS, T. Energy, environmental and economic assessment of electricity savings from the operation of green roofs in urban office buildings of a warm Mediterranean region. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 346–356, 2017.

ZUO, J.; PULLEN, S.; RAMEEZDEEN, R.; BENNETTS, H.; WANG, Y.; MAO, G.; ZHOU, Z.; DU, H.; DUAN, H. Green building evaluation from a life-cycle perspective in Australia: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 358–368, 2017.

Apêndice A - Trabalhos que utilizaram MCDM para escolha de coberturas

Quadro 4 - Trabalhos que utilizaram método de tomada de decisão multicritério para escolha de coberturas

Autor	Alternativas	Critérios	Avaliação das alternativas	Método	Principais resultados
Rahman, Perera e Odeyinka (2009)	Telha solar, de concreto e de cerâmica.	Custo, estética, durabilidade e desempenho energético.	Escala de proporção determinada pelos autores.	<i>Technique of ranking Preferences by Similarity to the Ideal Solution (TOPSIS).</i>	A telha solar foi solução com melhor desempenho.
Collier <i>et al.</i> (2013)	Cobertura fria, vegetada e solar.	Econômico: construção e uso. Ambiental: uso de recursos e impactos ambientais. Social: missão da organização e bem estar. Em cada um desses subcritérios, foram elencados vários indicadores.	Literatura.	<i>Multi-Attribute Value Theory (MAVT).</i>	Na ponderação de critérios “industrial”, a cobertura fria foi a mais apropriada. Nas ponderações de critérios “ambientalista” e “humanista”, a cobertura vegetada apresentou a melhor pontuação.
Dabbaghian <i>et al.</i> (2014)	Cobertura convencional e verde extensiva e verde intensiva.	Econômico: custo de capital, custo de manutenção e custo de renovação. Ambiental: mudanças climáticas, gestão de águas pluviais, qualidade da água de escoamento, esgotamento de recursos, gestão de resíduos e riscos ambientais. Social: peso, segurança contra incêndio, durabilidade e vulnerabilidade da área.	Análise do ciclo de vida, literatura, informações de fabricantes, empresas que realizam manutenção e proprietários de telhados.	<i>Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP).</i>	A cobertura verde extensiva foi a alternativa mais sustentável.

(Continuação)

Autor	Alternativas	Critérios	Avaliação das alternativas	Método	Principais resultados
Gagliano <i>et al.</i> (2015)	Cobertura convencional, fria e verde.	Consumo de energia para aquecimento, consumo de energia para resfriamento, conforto térmico de verão no caso de edifícios não condicionados, mitigação do efeito das ilhas de calor urbano, estresse térmico no telhado e uso de recursos naturais.	Simulação computacional e peso da camada de isolamento.	A pontuação total foi calculada como a soma de todas as pontuações em cada critério.	Os cenários de cobertura verde apresentaram as melhores pontuações. Uma análise mais aprofundada poderia considerar outras questões importantes, como gestão e demanda de água, análise do ciclo de vida, custos e impacto no conforto urbano.
Guzmán-Sánchez <i>et al.</i> (2018)	Cobertura plana com autoproteção, com acabamento em cascalho, com piso flutuante e verde.	Albedo, energia solar, sequestro de carbono, carbono embutido, energia embutida, atenuação de escoamento, purificação da água, controle de umidade relativa, biodiversidade e produtividade agrícola, materiais recicláveis, isolamento térmico, controle de ruído, custo do ciclo de vida, estética, carga morta e proteção do telhado.	Aplicação de cálculos analíticos e estruturais e valores encontrados na literatura especializada.	<i>Analytic Hierarchy Process</i> (AHP): para definir os pesos dos critérios. <i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i> (TOPSIS): para definir a contribuição das coberturas em cada critério.	A cobertura verde foi a alternativa considerada mais sustentável.

(Continuação)

Autor	Alternativas	Critérios	Avaliação das alternativas	Método	Principais resultados
Mahdiyar <i>et al.</i> (2019)	Cobertura verde extensiva, semi-intensiva e intensiva.	Gestão de água, espaço recreativo, economia de energia, benefícios ambientais, incentivos governamentais, estética, criação de habitat para a vida selvagem urbana, certificado de construção verde, absorção de ruído, aumento do valor do imóvel, tipo de acesso necessário, considerações estruturais, custo inicial necessário adicional, período de retorno, valor presente líquido e custos de manutenção.	Especialistas foram selecionados para ponderar as alternativas de cobertura verde em relação a cada critério.	<i>Fuzzy Delphi Method</i> (FDM): para a escolha dos critérios que afetam a decisão. <i>Cybernetic Fuzzy Analytic Network Process</i> (CFANP): para definir os pesos dos critérios.	Cenário condomínio: três em cada cinco usuários apontaram a cobertura verde intensiva como a mais adequada. Cenário apartamento: para os usuários que priorizaram critérios como estética e economia de energia, a cobertura verde ideal foi a intensiva. No entanto, para os usuários que consideraram outros critérios como custos de manutenção, o tipo mais adequado pode ser a cobertura semi-intensiva. Cenário bangalô: três em cada cinco usuários consideraram a cobertura verde extensiva como a alternativa ótima.
Rosasco e Perini (2019)	Cobertura convencional e verde.	Econômico: custo de instalação, custos de manutenção e descarte, incentivos fiscais, benefício imobiliário e economia de energia (aquecimento, refrigeração). Ambiental: qualidade do ar e redução da ilha de calor, redução de escoamento, energia embutida e emissão de carbono e sustentabilidade de recursos Social: estética do edifício, estética urbana e biodiversidade, adequação ao local e saúde. Desempenho: longevidade do telhado, redução de ruído acústico, peso do sistema e propriedades de isolamento.	Literatura e legislação.	<i>Analytic Hierarchy Process</i> (AHP).	A cobertura verde foi a solução mais adequada, tanto para acadêmicos, quanto para profissionais.

(Continuação)

Autor	Alternativas	Critérios	Avaliação das alternativas	Método	Principais resultados
Langemeyer <i>et al.</i> (2020)	Cobertura verde extensiva, semi-intensiva, intensiva, naturalizada, e loteamento.	Regulação térmica (regulação climática micro e regional), controle de escoamento de águas pluviais, habitats para polinizadores, produção de alimentos, oportunidades recreativas e facilitação da coesão social.	Uma avaliação com especialistas foi realizada para estimar a provisão dos serviços ecossistêmicos (critérios) pelas diferentes alternativas de cobertura verde.	Os pesos relativos dos indicadores foram estabelecidos pelos analistas, com base na literatura e no conhecimento pessoal.	As coberturas naturalizadas foram selecionadas como o projeto ideal para a maior parte de Barcelona, representando 87,5% da área do telhado. Coberturas intensivas foram escolhidas para a maior parte do restante da cidade.
Teotónio <i>et al.</i> (2020)	Coberturas verdes extensivas, semi-intensivas e intensivas, acessíveis e não acessíveis.	Custos, valor agregado na estética, valor agregado ao espaço de lazer, segurança contra incêndio, isolamento térmico e isolamento acústico.	O desempenho de cada alternativa de cobertura verde foi determinado com base na literatura. Os tomadores de decisão julgaram a diferença de atratividade entre esses desempenhos.	<i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique</i> (MACBETH)	A cobertura verde intensiva foi identificada como a melhor solução.
Gomes, Silvestre e Brito (2020)	Coberturas planas invertidas e convencionais com acesso limitado e acessíveis a pessoas e invertidas com acesso a veículos.	Custos ambientais, custos econômicos e custos com energia de aquecimento/ resfriamento.	Empresas, pesquisa de mercado, fornecedores de materiais de construção e regulamentação portuguesa.	<i>Costs of environmental, economic and energy from “cradle to cradle”</i> (3E cost-C2C)	A melhor solução foi uma cobertura plana com acesso limitado, principalmente devido aos seus menores custos de aquisição e manutenção.
Sonetti e Lombardi (2020)	Cobertura verde, isolada e simplesmente impermeabilizada.	Desempenho térmico, custo de construção, desempenho estético, utilidade social e impacto ambiental.	Análise do ciclo de vida, dados regionais e opinião de projetistas.	<i>Analytic Hierarchy Process</i> (AHP)	Cenário neutro (pesos iguais aos critérios): o desempenho da cobertura verde foi superior. Cenário eco social (critérios estéticos, sociais e contextuais foram ponderados): o melhor desempenho foi o da cobertura verde. <i>Business as usual</i> (critérios de desempenho térmico e custo foram considerados): a cobertura isolada apresentou a melhor pontuação.

(Continuação)

Autor	Alternativas	Critérios	Avaliação das alternativas	Método	Principais resultados
Motlagh, Pons e Hosseini (2021)	Cobertura verde extensiva, semi-intensiva e intensiva.	Econômico: custo e tempo. Ambiental: consumo de recursos e emissões. Social: segurança e compatibilidade.	Literatura, bases de dados, informações de empresas e profissionais.	<i>Multi-criteria decision-making method</i> (MIVES) com <i>Analytic Hierarchy Process</i> (AHP).	Os resultados demonstram que, para Teerã, a cobertura verde intensiva é a alternativa mais adequada, com o maior índice de sustentabilidade.
Carrera <i>et al.</i> (2022)	Combinações de substrato e manta geotêxtil (filtro) em coberturas verdes: um componente comum, um componente reciclado e um material novo.	Permeabilidade, custo do ciclo de vida, perfuração dinâmica, perfuração estática, isolamento térmico, resistência à hidrólise, resistência à oxidação, densidade, abertura característica, pegada de carbono, composição da matéria orgânica, conteúdo de matéria orgânica do efluente e massa por unidade de área de superfície.	Testes laboratoriais e ferramentas descritas na literatura.	ELECTRE.	O substrato incluindo material reutilizado ou reciclado geralmente apresentou melhor desempenho. Foram destacadas as combinações tanto com geotêxtil de polipropileno tecido, quanto com geotêxtil não tecido feito com polipropileno reciclado.
Teotónio <i>et al.</i> (2023)	Coberturas verdes com diferentes tipos de vegetação, com ou sem acessibilidade e com ou sem o uso de materiais reciclados.	Estética (tipo de vegetação), possibilidade de incorporação de material reciclado e possibilidade de uso da cobertura para lazer e estudo (acessibilidade).	Julgamento de professores, alunos e funcionários da instituição onde foi realizada a pesquisa.	Os pesos dos critérios foram estabelecidos pelos entrevistados e computados por meio do método <i>Analytic Hierarchy Process</i> (AHP). Uma das entrevistas foi selecionada como a mais representativa da amostra.	A cobertura verde acessível, com vegetação <i>sea thrift</i> e <i>thymus red creeping</i> e com incorporação de resíduos de construção e demolição no substrato foi a melhor colocada.

(Continuação)

Autor	Alternativas	Critérios	Avaliação das alternativas	Método	Principais resultados
Maurer, Lienert e Cook (2023)	Coberturas planas pretas, de cascalho, frias, verdes extensivas e semi-intensivas, com ou sem instalação fotovoltaica.	Baixa energia e pegada de carbono: demanda de aquecimento, demanda de resfriamento e emissão de gases de efeito estufa. Baixo impacto no meio ambiente: escoamento de águas pluviais, aquecimento urbano e alta biodiversidade. Baixo custo: investimento, manutenção e eletricidade.	Simulação de energia do edifício, modelagem hidrológica e pesquisa bibliográfica.	<i>Multi-Attribute Value Theory</i> (MAVT).	De acordo com as preferências de um planejador urbano e ambientalista, as coberturas verdes semi-intensivas com instalação fotovoltaica integrada são a opção de melhor desempenho.
Ekmekcioğlu (2023)	Coberturas verdes extensiva e intensiva.	Financeiro: custo inicial e operacional, economia de energia, vida útil e oportunidades de negócios. Técnico: carga estrutural, suporte estrutural adicional, complexidade operacional e de instalação e resistência às forças do vento. Ambiental: retenção de águas pluviais, melhoria da qualidade do ar e da água e redução de ruídos, mitigação das ilhas de calor e adaptação climática em termos de plantas, flora e fauna.	Um grupo de especialistas atribuiu as pontuações referentes aos dois tipos de cobertura verde com base nos critérios considerados.	<i>Fuzzy Analytic Hierarchy Process</i> (FAHP) a <i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i> (TOPSIS).	A cobertura verde extensiva foi considerada a configuração ideal para o estudo de caso.
Ruá et al. (2024)	Cobertura existente, verde não transitável, de cascalho não transitável, invertida com pavimentação elevada, aderida e permeável.	Meio ambiente: isolamento térmico e reciclagem. Econômico: custo do investimento inicial e manutenção. Fatores de desempenho: facilidade de execução, isolamento acústico, peso, vedação contra infiltração de água e estética.	Ferramentas de simulação foram usadas para estimar a economia de energia, os períodos de retorno e o impacto ambiental para um edifício representativo na área de estudo.	O peso dos critérios foi determinado de acordo com especialistas. O índice final foi dado pela multiplicação do peso de cada critério pelo valor atribuído a cada critério.	A cobertura de cascalho foi considerada como a mais adequada.

(Continuação)

Autor	Alternativas	Critérios	Avaliação das alternativas	Método	Principais resultados
Oppio <i>et al.</i> (2024)	Cobertura plana convencional e cobertura verde	Atividades ao ar livre, locais para meditação e bem-estar psicofísico, atividades educacionais, percepção estética, escala de relevância do projeto, espécies de arbustos, plantas terapêutico-oficinais, plantas nativas, oportunidades de emprego, atratividade social, oportunidades de relações sociais, acessibilidade, ODSs e visitantes	Avaliações qualitativas e quantitativas foram realizadas considerando a cobertura no contexto sem e com intervenção (cobertura plana convencional e verde, respectivamente).	<i>Multi-Attribute Value Theory</i> (MAVT).	A cobertura verde apresentou o melhor desempenho em todos os cenários considerados (neutro, cidadãos, clientes, município e escritório de projeto).
Vilčeková <i>et al.</i> (2024)	Composições de coberturas verdes (diferentes materiais nas camadas)	Potencial de aquecimento global (total, fóssil, biogênico e uso da terra e mudança no uso da terra), potencial de destruição do ozônio, potencial de acidificação, potencial de eutrofização da água doce, potencial de eutrofização da água do mar, potencial de eutrofização terrestre, potencial de formação de ozônio troposférico, potencial de esgotamento abiótico para recursos não fósseis, potencial de esgotamento abiótico para recursos fósseis, privação de água e custo do ciclo de vida.	Avaliação do ciclo de vida e do custo do ciclo de vida.	Ferramenta MCA7. Foram incluídos os métodos estatísticos: <i>Concordance Discordance Analysis</i> (CDA), <i>Ideal Points Analysis</i> (IPA), <i>Weighted Sum Approach</i> (WSA) e <i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i> (TOPSIS)	A composição de cobertura verde considerada a melhor alternativa apresentou o melhor desempenho utilizando os métodos IPA, WSA e TOPSIS.

Apêndice B - Temperatura do ar, umidade relativa e precipitação das cidades avaliadas

Figura 29 - Temperatura do ar ao longo do ano nas cidades de (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília

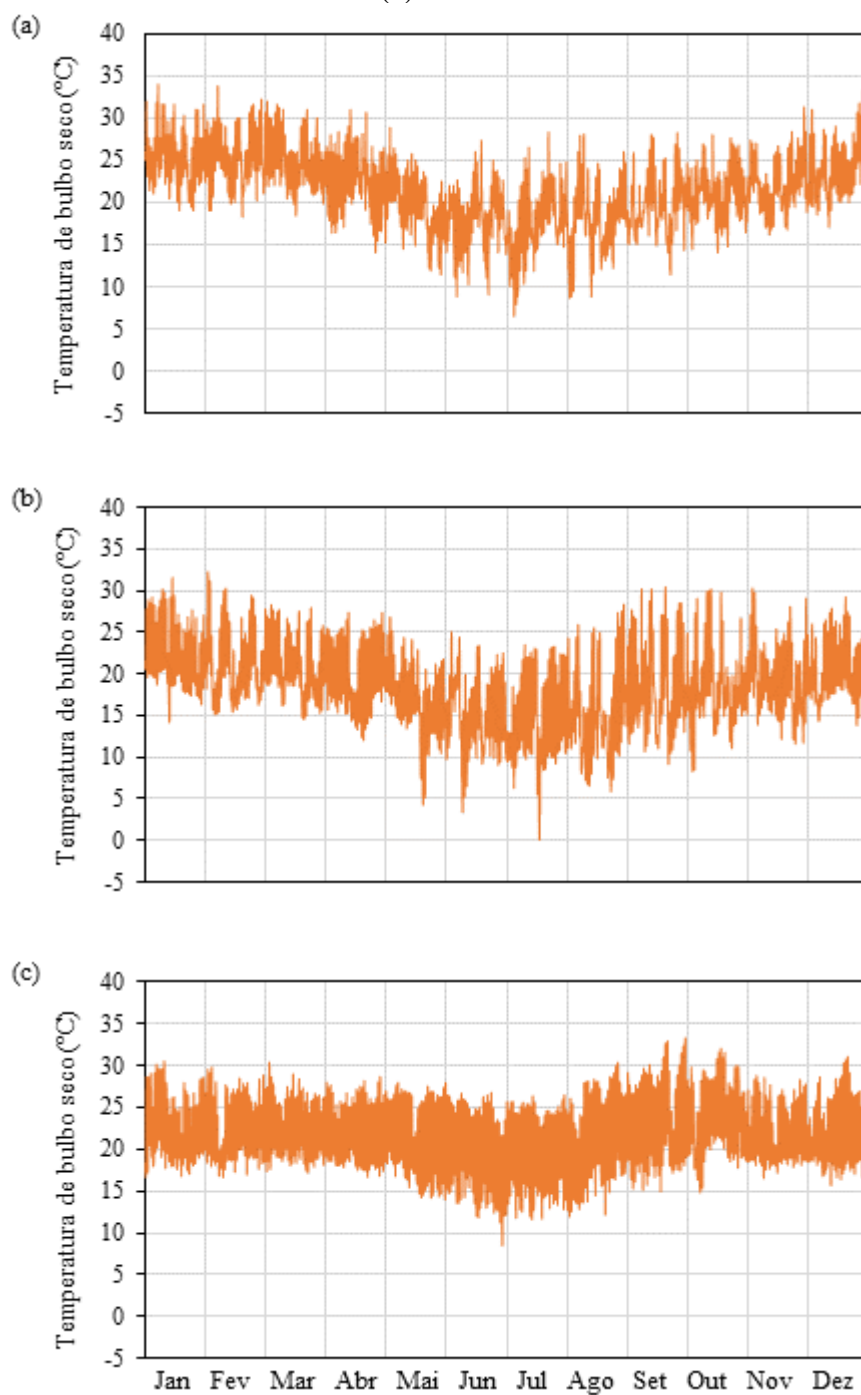


Figura 30 - Umidade relativa ao longo do ano nas cidades de (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília

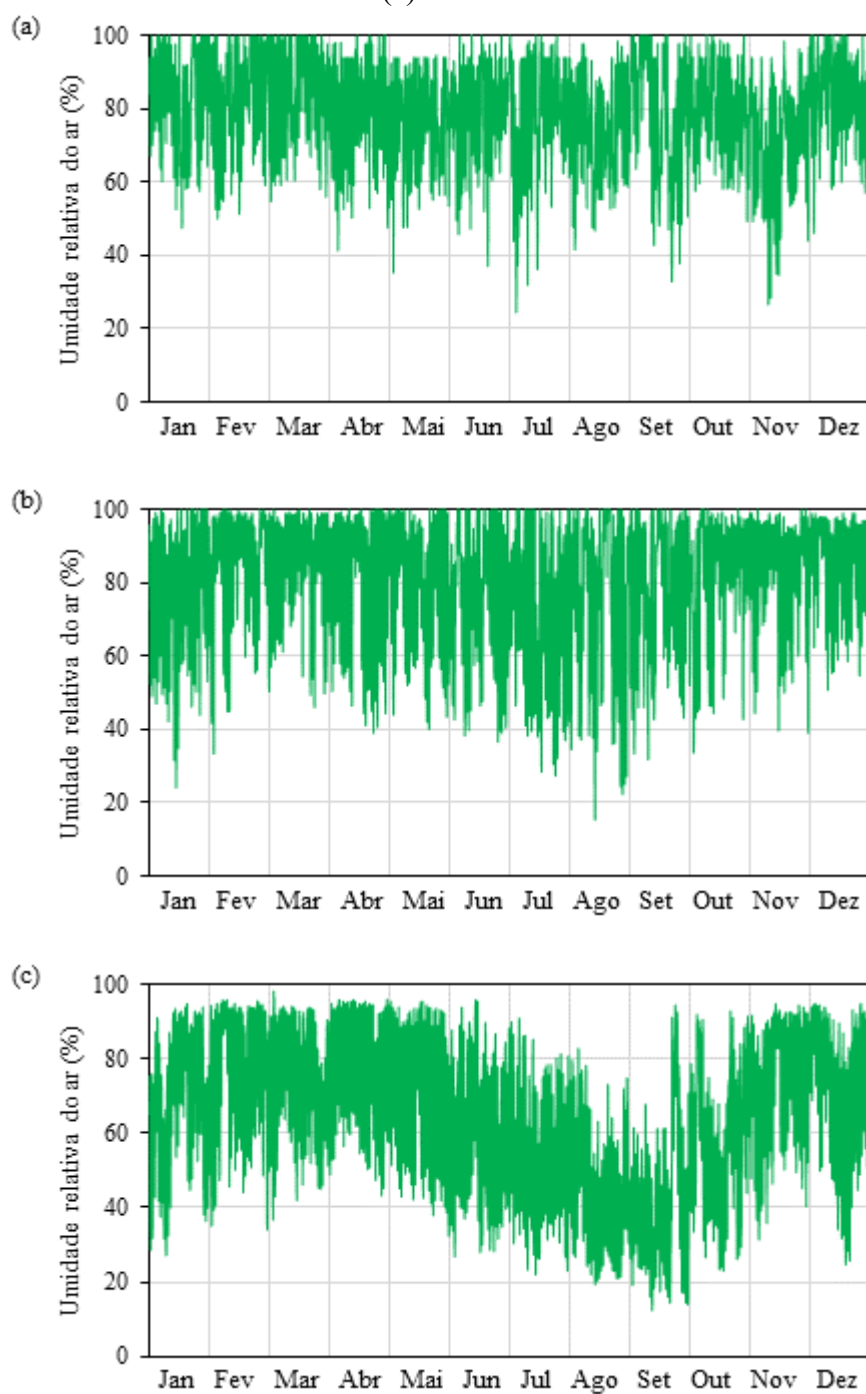
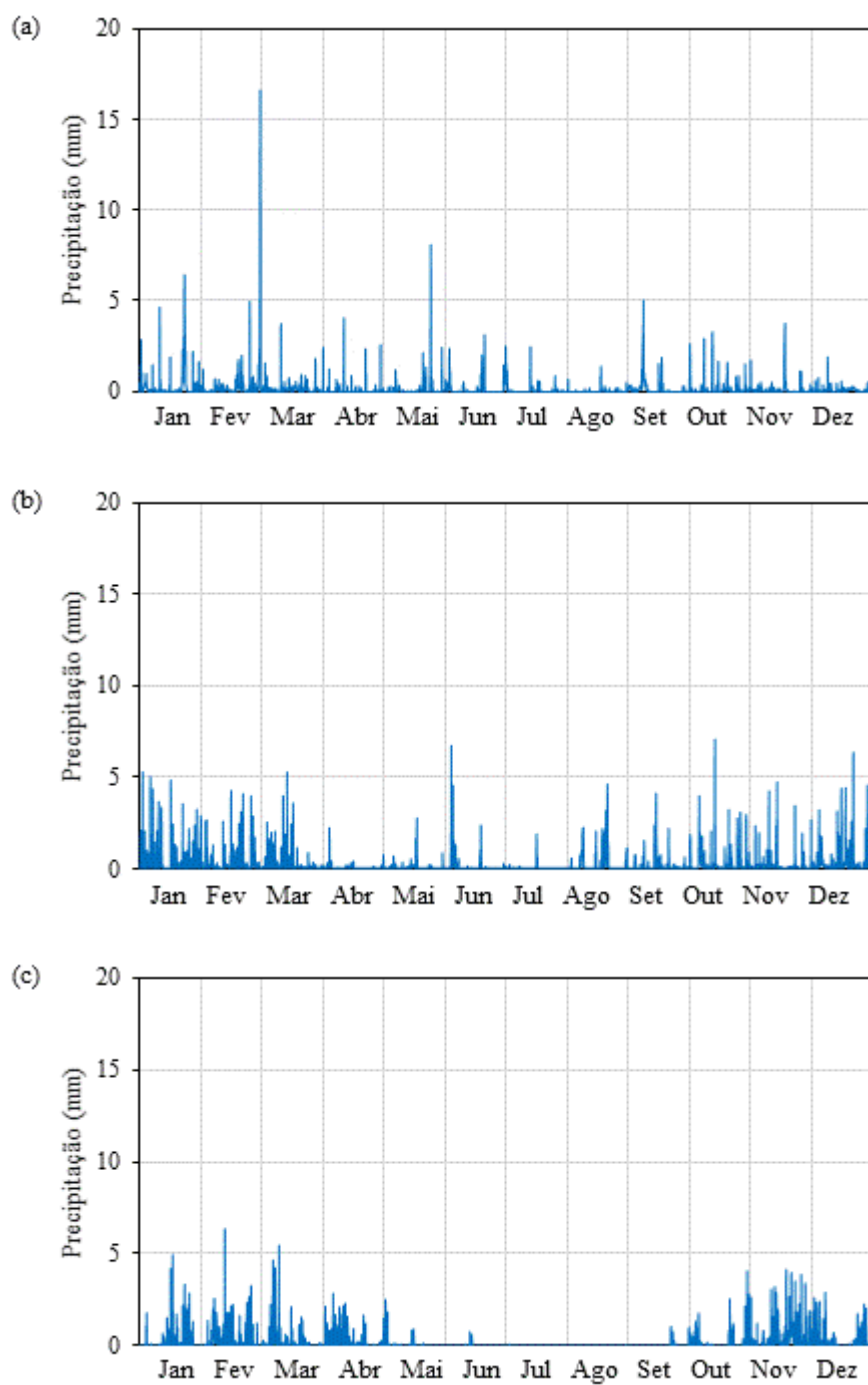


Figura 31 - Precipitação anual nas cidades de (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília



Apêndice C - Questionário aplicado aos profissionais da construção civil

Termo de consentimento livre e esclarecido

Caro(a) participante, você está sendo convidado(a) a participar de uma pesquisa que avalia a importância relativa de determinados parâmetros na seleção da tipologia de cobertura mais adequada para uma edificação residencial multifamiliar. A pesquisa intitulada “Avaliação ambiental, econômica e social de coberturas verdes, frias e convencionais: Uma metodologia multicritério integrada ao ciclo de vida com foco no desempenho termoenergético” é desenvolvida junto ao Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE/ UFSC). A pesquisa está sendo conduzida pela doutoranda Taylana Piccinini Scolari, aluna do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC, sob a orientação do Prof. Enedir Ghisi, PhD. O objetivo do estudo é avaliar diferentes tipologias de cobertura (convencional de fibrocimento, fria e verde extensiva) para uma edificação residencial por meio de uma metodologia multicritério, que envolve parâmetros ambientais econômicos e sociais. Esta pesquisa tomará cerca de 5 minutos do seu tempo.

Ao concordar em participar da pesquisa, você será solicitado(a) a responder perguntas sobre os parâmetros considerados pela pesquisa que apresentam maior influência nas suas decisões profissionais. Os riscos ao participar desta pesquisa são baixos, entretanto, caso você sinta algum desconforto como cansaço ou constrangimento durante a realização, você pode optar por não responder as perguntas. Existe a possibilidade, ainda que remota, de quebra de sigilo, mesmo que involuntária e não intencional, tendo como potencial consequência a divulgação das opiniões profissionais dos participantes. Os benefícios de sua participação nesta pesquisa são de ordem educacional e científica. Você estará auxiliando na identificação dos parâmetros mais relevantes para a escolha de tipologias de cobertura para uma edificação residencial multifamiliar. Nenhuma informação individual será divulgada. Não haverá qualquer tipo de remuneração pela sua participação nesta pesquisa, assim como não será gerado qualquer tipo de gasto para você. Em caso de eventuais danos ou despesas, comprovadamente decorrentes de sua participação nesta pesquisa, haverá ressarcimento e/ou indenização. O prazo de guarda dos dados de pesquisa será de no mínimo cinco anos, conforme o item XI.2.f da res. 466/12 e art. 28o., inc. IV da res. 510/16.

Em caso de dúvidas, o contato com os pesquisadores pode ser feito por meio dos e-mails taylanaps@gmail.com e enedir.ghisi@ufsc.br ou no endereço Rua João Pio Duarte Silva, s/n, Córrego Grande, Florianópolis/ SC, CEP: 88.040-900 - Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Civil, Sala 112. Ao selecionar a opção “eu concordo”, você estará autorizando os pesquisadores a utilizar seus dados na pesquisa e declarando que recebeu uma via do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido. A pesquisa atende as especificações da Resolução CNS 510/2016. Muito obrigado!

Conforme o Art. 17º., inc. IX da res. 510/16, o CEPESH é um órgão colegiado interdisciplinar, deliberativo, consultivo e educativo, vinculado à Universidade Federal de Santa Catarina, mas independente na tomada de decisões, criado para defender os interesses dos participantes da pesquisa em sua integridade e dignidade e para contribuir no desenvolvimento da pesquisa dentro de padrões éticos.

Se você tiver alguma consideração ou dúvida sobre a ética desta pesquisa, entre em contato: CEPESH-UFSC – Prédio Reitoria II, 4º andar, sala 401, Rua Desembargador Vitor Lima, nº 222, Trindade, Florianópolis. Telefone para contato: 3721-6094. E-mail: cep.propesq@contato.ufsc.br.

Instruções

As perguntas permitirão que os pesquisadores entendam melhor quais dos parâmetros considerados pela pesquisa apresentam maior influência nas suas decisões profissionais. Dessa forma, os parâmetros serão comparados par a par por meio de uma escala de importância que vai de 1/9 (extremamente menos relevante) até 9 (extremamente mais relevante). A seguir, uma breve definição dos parâmetros considerados:

Energia consumida no ciclo de vida: corresponde à energia consumida na extração de matérias-primas, fabricação dos materiais utilizados na cobertura, instalação da cobertura, operação (energia consumida com ar-condicionado na edificação com determinada tipologia de cobertura), manutenção (como substituição de materiais) e desconstrução da cobertura (demolição e disposição em aterro).

Mitigação dos efeitos das ilhas de calor: o efeito das ilhas de calor está relacionado com as maiores temperaturas nos centros urbanos em comparação com as áreas rurais. Nesse

sentido, algumas tipologias de cobertura podem ser consideradas como estratégias para mitigar os efeitos das ilhas de calor devido à redução na temperatura da superfície do telhado e do ar.

Custo do ciclo de vida: corresponde ao custo com a construção da cobertura, operação (custo da energia elétrica utilizada para o funcionamento do ar-condicionado na edificação com determinada tipologia de cobertura), manutenção (como substituição de materiais) e desconstrução da cobertura (demolição e disposição em aterro).

Conforto térmico dos usuários: representado pelo número de horas em que os usuários da edificação se sentiriam confortáveis termicamente somente com a utilização de ventilação natural (sem ar-condicionado) em uma edificação com determinada tipologia de cobertura.

Questionário

1. Selecione “eu concordo” se você deseja participar da pesquisa.

☐ Eu concordo

2. Em qual área do setor da construção você atua?

☐ Engenharia

☐ Arquitetura

☐ Pesquisa/ docência

3. Nas suas escolhas profissionais quais aspectos, entre os apresentados a seguir, tem maior influência em suas decisões?

☐ Ambiental (impactos no meio ambiente)

☐ Econômico (custo)

☐ Social (conforto e bem-estar do usuário)

4. Na escolha da tipologia de cobertura para uma edificação residencial multifamiliar, o quanto você considera o parâmetro **energia consumida no ciclo de vida** mais ou menos relevante que o parâmetro **mitigação dos efeitos das ilhas de calor**?

☐ 9 (extremamente mais relevante)

☐ 7 (fortemente mais relevante)

☐ 5 (essencialmente mais relevante)

- ☐ 3 (um pouco mais relevante)
- ☐ 1 (importância equivalente)
- ☐ 1/3 (um pouco menos relevante)
- ☐ 1/5 (essencialmente menos relevante)
- ☐ 1/7 (fortemente menos relevante)
- ☐ 1/9 (extremamente menos relevante)

5. Na escolha da tipologia de cobertura para uma edificação residencial multifamiliar, o quanto você considera o parâmetro **energia consumida no ciclo de vida** mais ou menos relevante que o parâmetro **custo do ciclo de vida**?

- ☐ 9 (extremamente mais relevante)
- ☐ 7 (fortemente mais relevante)
- ☐ 5 (essencialmente mais relevante)
- ☐ 3 (um pouco mais relevante)
- ☐ 1 (importância equivalente)
- ☐ 1/3 (um pouco menos relevante)
- ☐ 1/5 (essencialmente menos relevante)
- ☐ 1/7 (fortemente menos relevante)
- ☐ 1/9 (extremamente menos relevante)

6. Na escolha da tipologia de cobertura para uma edificação residencial multifamiliar, o quanto você considera o parâmetro **energia consumida no ciclo de vida** mais ou menos relevante que o parâmetro **conforto térmico dos usuários**?

- ☐ 9 (extremamente mais relevante)
- ☐ 7 (fortemente mais relevante)
- ☐ 5 (essencialmente mais relevante)
- ☐ 3 (um pouco mais relevante)
- ☐ 1 (importância equivalente)
- ☐ 1/3 (um pouco menos relevante)
- ☐ 1/5 (essencialmente menos relevante)
- ☐ 1/7 (fortemente menos relevante)
- ☐ 1/9 (extremamente menos relevante)

7. Na escolha da tipologia de cobertura para uma edificação residencial multifamiliar, o quanto você considera o parâmetro **mitigação dos efeitos das ilhas de calor** mais ou menos relevante que o parâmetro **custo do ciclo de vida**?

- ☐ 9 (extremamente mais relevante)
- ☐ 7 (fortemente mais relevante)
- ☐ 5 (essencialmente mais relevante)
- ☐ 3 (um pouco mais relevante)
- ☐ 1 (importância equivalente)
- ☐ 1/3 (um pouco menos relevante)
- ☐ 1/5 (essencialmente menos relevante)
- ☐ 1/7 (fortemente menos relevante)
- ☐ 1/9 (extremamente menos relevante)

8. Na escolha da tipologia de cobertura para uma edificação residencial multifamiliar, o quanto você considera o parâmetro **mitigação dos efeitos das ilhas de calor** mais ou menos relevante que o parâmetro **conforto térmico dos usuários**?

- ☐ 9 (extremamente mais relevante)
- ☐ 7 (fortemente mais relevante)
- ☐ 5 (essencialmente mais relevante)
- ☐ 3 (um pouco mais relevante)
- ☐ 1 (importância equivalente)
- ☐ 1/3 (um pouco menos relevante)
- ☐ 1/5 (essencialmente menos relevante)
- ☐ 1/7 (fortemente menos relevante)
- ☐ 1/9 (extremamente menos relevante)

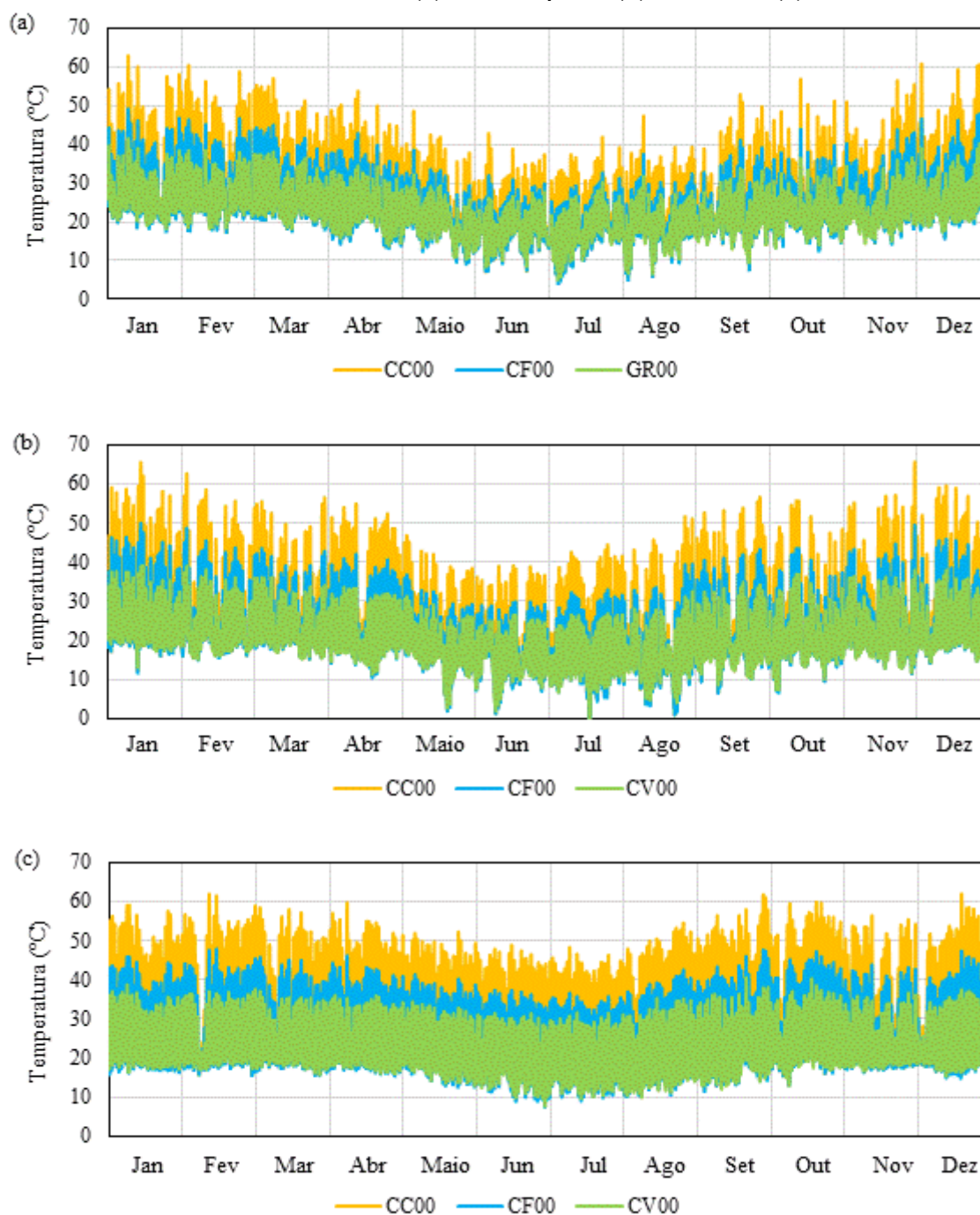
9. Na escolha da tipologia de cobertura para uma edificação residencial multifamiliar, o quanto você considera o parâmetro **custo do ciclo de vida** mais ou menos relevante que o parâmetro **conforto térmico dos usuários**?

- ☐ 9 (extremamente mais relevante)
- ☐ 7 (fortemente mais relevante)
- ☐ 5 (essencialmente mais relevante)

- () 3 (um pouco mais relevante)
- () 1 (importância equivalente)
- () 1/3 (um pouco menos relevante)
- () 1/5 (essencialmente menos relevante)
- () 1/7 (fortemente menos relevante)
- () 1/9 (extremamente menos relevante)

Apêndice D - Perfis horários da temperatura da superfície externa das coberturas

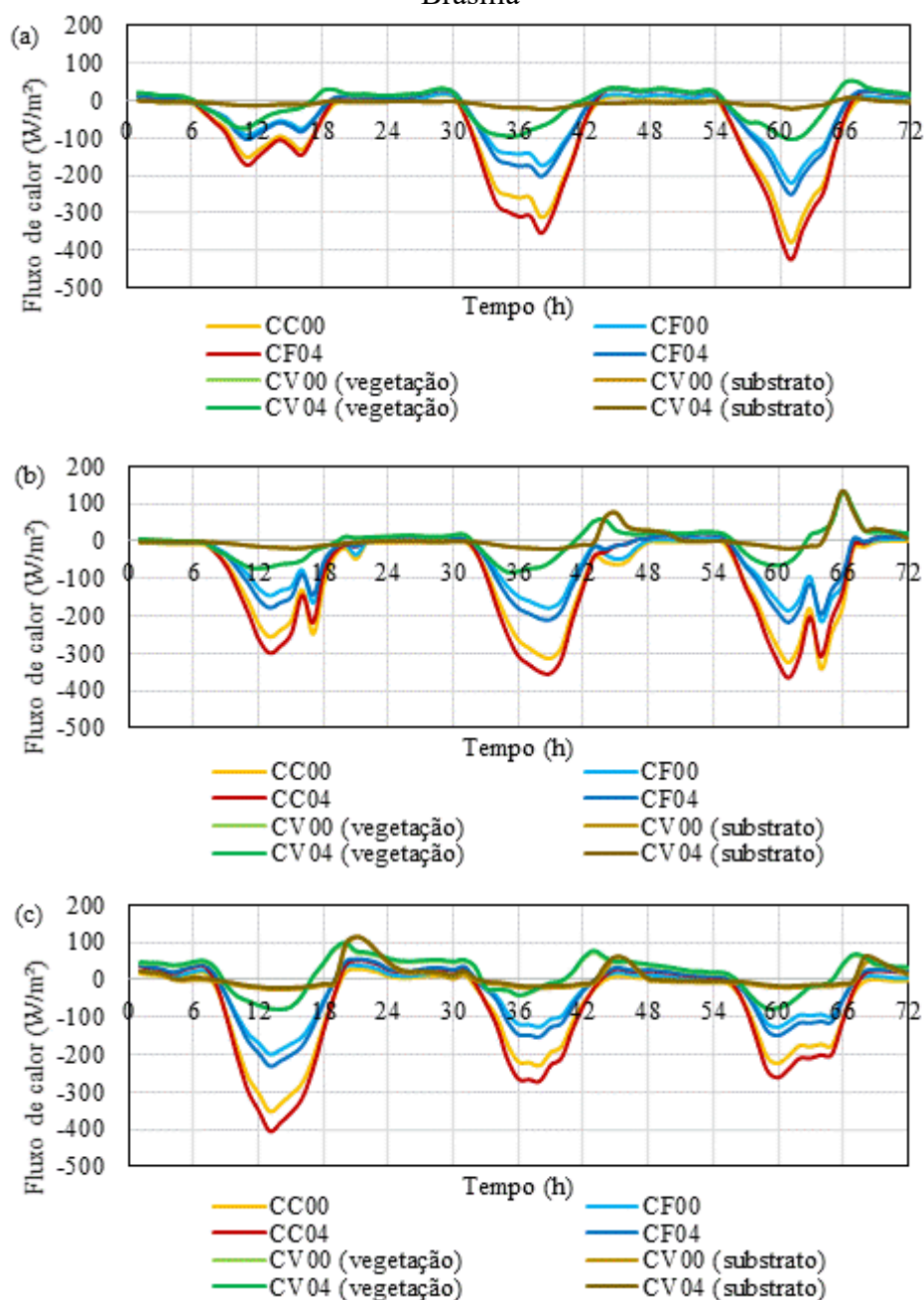
Figura 32 - Temperatura horária da superfície externa das coberturas convencional, fria e verde, sem isolamento, em (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília



Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura fria sem isolamento (CF00) e cobertura verde sem isolamento (CV00).

Apêndice E - Fluxo de calor por convecção entre a superfície externa das coberturas e o ambiente externo

Figura 33 - Fluxo de calor por convecção entre a superfície externa das coberturas e o ambiente externo em três dias de verão nos climas de (a) Florianópolis, (b) Curitiba e (c) Brasília



Nota: a hora 0 representa o horário 00:00. Valores positivos de fluxo de calor indicam calor sendo adicionado à superfície da cobertura e valores negativos, calor sendo liberado da cobertura para o ambiente externo. Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Apêndice F - Avaliação do ciclo de vida energético (ACVE)

Tabela 25 - Energia embutida inicial necessária para a construção das coberturas convencional e fria com isolamento térmico

Elemento	Componente	Material	Massa de material (kg)	Energia embutida por unidade (kWh/kg)	Energia embutida inicial necessária para a construção das coberturas (kWh)	Referência
Tesoura	Cantoneira	Aço	807,90	9,72	7.855,21	Tavares e Bragança (2016)
	Eletrodo	Aço	7,83	9,72	76,13	Tavares e Bragança (2016)
	Perfil U	Aço galvanizado	2.000,70	9,39	18.785,85	Tavares (2006)
Terças	Perfil U	Aço galvanizado	1.916,98	9,39	17.999,79	Tavares (2006)
Telhamento	Telha	Fibrocimento	6.825,36	1,67	11.376,51	Tavares (2006)
Cumeeira	Cumeeira	Fibrocimento	312,00	1,67	520,04	Tavares (2006)
Calha	Selante	Poliuretano (PU)	4,10	20,56	84,30	Tavares (2006)
	Solda	Estanho-chumbo	14,79	38,23	565,35	Hammond e Jones (2011)
	Calha	Aço galvanizado	448,59	9,39	4.212,13	Tavares (2006)
Rufo	Rufo	Fibrocimento	158,40	1,67	264,02	Tavares (2006)
Isolamento térmico	Placas	Poliestireno expandido	278,70	31,11	8.671,36	Tavares (2006)
Total edifício (kWh)					70.410,69	
Total apartamento (kWh)					7.422,67	

Tabela 26 - Energia consumida no transporte de materiais até a obra das coberturas convencional e fria com isolamento térmico

Consumo energético do transporte (kWh/kg.km)	Massa de material (kg)	Distância entre fábrica e obra (km)	Energia consumida no transporte de materiais até a obra (kWh)	Referência
0,00045	12.775,35	160,00	919,83	Tavares (2006)
Total edifício (kWh)			919,83	
Total apartamento (kWh)			96,97	

Tabela 27 - Energia consumida por equipamentos na obra das coberturas convencional e fria com isolamento térmico

Elemento	Potência (kW)	Tempo de uso (h)	Fator de conversão de conversão de eletricidade em energia primária	Energia consumida por equipamentos na obra (kWh)
Terças	0,92	3,01	1,60	4,42
Telhamento	0,92	2,21	1,60	3,25
Cumeeira	0,92	0,07	1,60	0,10
Calha	0,92	1,08	1,60	1,59
Rufo	0,92	0,46	1,60	0,68
Total edificio (kWh)				10,05
Total apartamento (kWh)				1,06

Tabela 28 - Energia embutida inicial necessária para a construção da cobertura verde com isolamento térmico

Camada	Componente	Material	Massa de material (kg)	Energia embutida por unidade (kWh/kg)	Energia embutida inicial necessária para a construção das coberturas (kWh)	Referência
Impermeabilização	Primer	Emulsão asfáltica	262,81	14,17	3.723,50	Tavares (2006)
	Manta asfáltica	Asfalto	2.163,41	14,17	30.650,74	Tavares (2006)
	Gás de cozinha	GPL	111,11	11,03	1.225,99	Francesquett <i>et al.</i> (2011)
Isolamento térmico	Placas	Poliestireno expandido	269,25	31,11	8.377,34	Tavares (2006)
Anti-raiz	Lona plástica	PEBD	44,44	21,70	964,25	Hammond e Jones (2011)
Drenagem	Módulo	PEAD	448,71	26,39	11.841,83	Tavares (2006)
Filtro	Geotêxtil	Poliéster	44,87	28,84	1.294,25	Hammond e Jones (2011)
Substrato	Vermiculita	Vermiculita expandida	2.350,37	2,00	4.701,12	Hammond e Jones (2011)
	Areia	Areia	25.640,40	0,01	356,15	Tavares (2006)
	Composto	Composto orgânico	2.846,08	0,27 ¹	759,02	Myrans (2009)
Total edificio (kWh)					63.894,18	
Total apartamento (kWh)					6.735,70	

¹ A matéria-prima energética (*feedstock energy*) é de 5,28 kWh/kg para o composto orgânico e não foi incluída.

Tabela 29 - Energia consumida no transporte de materiais até a obra da cobertura verde com isolamento térmico

Consumo energético do transporte (kWh/kg.km)	Massa de material (kg)	Distância entre fábrica e obra (km)	Energia consumida no transporte de materiais até a obra (kWh)	Referência
0,00045	34.181,46	160,00	2.461,06	Tavares (2006)
Total edifício (kWh)			2.461,06	
Total apartamento (kWh)			259,44	

Tabela 30 - Energia consumida por equipamentos na atividade de manutenção das coberturas convencional e fria (período de análise de 40 anos)

Atividade	Potência (kW)	Tempo de uso (h)	Fator de conversão de conversão de eletricidade em energia primária	Número de manutenções	Energia consumida por equipamentos na manutenção (kWh)
Lavagem	1,70	6,64	1,60	8	144,40
Total edifício (kWh)					144,40
Total apartamento (kWh)					15,22

Tabela 31 - Energia embutida nos materiais utilizados na manutenção da cobertura verde (período de análise de 40 anos)

Camada	Atividade	Material	Massa de material (kg)	Energia embutida por unidade (kWh/kg)	Número de manutenções	Energia embutida na manutenção (kWh)	Referência
Substrato	Adubação	Nitrogênio (N)	0,50	18,37	80	728,65	Zangeneh, Omid e Akram (2010)
		Fósforo (P)	0,26	3,46	80	70,89	Zangeneh, Omid e Akram (2010)
		Potássio (K)	0,53	3,10	80	131,31	Zangeneh, Omid e Akram (2010)
	Aplicação de substrato	Vermiculita expandida	58,76	2,00	8	940,22	Hammond e Jones (2011)
		Areia	641,01	0,01	8	71,23	Tavares (2006)
		Composto orgânico	71,15	0,27 ¹	8	151,80	Myrans (2009)
Total edifício (kWh)						2.094,10	
Total apartamento (kWh)						220,76	

¹ A matéria-prima energética (*feedstock energy*) é de 5,28 kWh/kg para o composto orgânico e não foi incluída.

Tabela 32 - Energia consumida no transporte de materiais para as atividades de manutenção da cobertura verde

Consumo energético do transporte (kWh/kg.km)	Massa de material (kg)	Distância entre fábrica e obra (km)	Energia consumida no transporte de materiais até a obra (kWh)	Referência
0,00045	6.269,93	160,00	451,44	Tavares (2006)
Total edificio (kWh)			451,44	
Total apartamento (kWh)			47,59	

Tabela 33 - Energia consumida no transporte de materiais das coberturas convencional e fria com isolamento térmico até o aterro

Consumo energético do transporte (kWh/kg.km)	Massa de material (kg)	Distância entre fábrica e obra (km)	Energia consumida no transporte de materiais até a obra (kWh)	Referência
0,00045	12.775,35	100,00	574,89	Tavares (2006)
Total edificio (kWh)			574,89	
Total apartamento (kWh)			60,60	

Tabela 34 - Energia consumida por equipamentos para a desconstrução das coberturas convencional e fria com isolamento

Elemento	Potência (kW)	Tempo de uso (h)	Fator de conversão de conversão de eletricidade em energia primária	Energia consumida por equipamentos na manutenção (kWh)
Telhamento	260,00	0,27	1,60	110,43
Tesouras	260,00	1,30	1,60	539,14
Total edificio (kWh)				649,56
Total apartamento (kWh)				68,48

Tabela 35 - Energia consumida no transporte de materiais da cobertura verde com isolamento térmico até o aterro

Consumo energético do transporte (kWh/kg.km)	Massa de material (kg)	Distância entre fábrica e obra (km)	Energia consumida no transporte de materiais até a obra (kWh)	Referência
0,00045	34.070,35	100,00	1.533,17	Tavares (2006)
Total edifício (kWh)			1.533,17	
Total apartamento (kWh)			161,63	

OBS: Os valores de energia embutida inicial e energia de desconstrução dessa seção referem-se às coberturas com isolamento térmico. Para obter o consumo de energia para as coberturas sem isolamento térmico, basta remover a massa de poliestireno expandido do cálculo das parcelas de energia embutida nos materiais e consumida pelo transporte. A energia embutida na manutenção é a mesma nas coberturas com e sem isolamento.

Apêndice G - Análise do custo do ciclo de vida (ACCV)

Tabela 36 - Custo inicial das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Curitiba e Brasília

Tipologia de cobertura	Custo inicial				Por área de apartamento (R\$/m²)
	Materiais e equipamentos (R\$)	Transporte (R\$)	Mão de obra (R\$)	Total (R\$)	
Curitiba					
CC00	9.690,70	57,69	1.252,95	11.001,34	244,20
CC04	11.106,46	144,21	1.264,67	12.515,34	277,81
CF00	10.425,83	57,69	1.252,95	11.736,47	260,52
CF04	11.841,59	144,21	1.264,67	13.250,47	294,13
CV00	13.987,87	115,37	1.979,27	16.082,51	356,99
CV04	15.355,39	201,90	1.990,59	17.547,87	389,52
Brasília					
CC00	9.631,39	60,05	1.055,68	10.747,12	238,56
CC04	11.047,15	150,12	1.065,90	12.263,16	272,21
CF00	10.450,96	60,05	1.055,68	11.566,69	256,75
CF04	11.866,72	150,12	1.065,90	13.082,73	290,40
CV00	14.342,07	120,09	1.777,38	16.239,54	360,48
CV04	15.709,59	210,16	1.787,25	17.707,00	393,05

Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Tabela 37 - Custo operacional com energia elétrica no apartamento com as coberturas convencional, fria e verde em Curitiba e Brasília

Tipologia de cobertura	Custo operacional	
	Total (R\$)	Por área de apartamento (R\$/m²)
Curitiba		
CC00	45.210,08	1.003,55
CC04	40.407,05	896,94
CF00	35.109,56	779,35
CF04	35.981,10	798,69
CV00	32.443,53	720,17
CV04	35.683,37	792,08
Brasília		
CC00	84.243,43	1.870,00
CC04	84.371,51	1.872,84
CF00	63.365,93	1.406,57
CF04	76.408,67	1.696,09
CV00	66.520,87	1.476,60
CV04	77.231,45	1.714,35

Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Tabela 38 - Custo de manutenção das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Curitiba e Brasília

Tipologia de cobertura	Custo de manutenção				Por área de apartamento (R\$/m²)
	Materiais e equipamentos (R\$)	Transporte (R\$)	Mão de obra (R\$)	Total (R\$)	
Curitiba					
CC00	35,34	0,00	4.711,51	4.746,84	105,37
CC04	35,34	0,00	4.711,51	4.746,84	105,37
CF00	35,34	0,00	4.711,51	4.746,84	105,37
CF04	35,34	0,00	4.711,51	4.746,84	105,37
CV00	2.252,10	2.861,48	39.926,63	45.040,21	999,78
CV04	2.252,10	2.861,48	39.926,63	45.040,21	999,78
Brasília					
CC00	37,69	0,00	4.109,44	4.147,13	92,06
CC04	37,69	0,00	4.109,44	4.147,13	92,06
CF00	37,69	0,00	4.109,44	4.147,13	92,06
CF04	37,69	0,00	4.109,44	4.147,13	92,06
CV00	2.407,73	2.841,08	34.935,78	40.184,59	892,00
CV04	2.407,73	2.841,08	34.935,78	40.184,59	892,00

Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Tabela 39 - Custo de desconstrução das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Curitiba e Brasília

Tipologia de cobertura	Custo de desconstrução				Por área de apartamento (R\$/m²)
	Equipamentos (R\$)	Mão de obra (R\$)	Transporte e disposição em aterro (R\$)	Total	
Curitiba					
CC00	8.555,24	17.896,41	1.813,62	28.265,27	627,42
CC04	8.555,24	19.358,87	3.264,52	31.178,63	692,09
CF00	8.555,24	17.896,41	1.813,62	28.265,27	627,42
CF04	8.555,24	19.358,87	3.264,52	31.178,63	692,09
CV00	0,00	19.416,77	5.803,59	25.220,36	559,83
CV04	0,00	20.829,39	6.891,77	27.721,16	615,34
Brasília					
CC00	8.998,17	15.862,02	1.797,57	26.657,76	591,74
CC04	8.998,17	17.158,24	3.235,63	29.392,04	652,43
CF00	8.998,17	15.862,02	1.797,57	26.657,76	591,74
CF04	8.998,17	17.158,24	3.235,63	29.392,04	652,43
CV00	0,00	17.148,63	5.752,23	22.900,86	508,34
CV04	0,00	18.400,69	6.830,78	25.231,47	560,08

Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Tabela 40 - Custo total do ciclo de vida das coberturas convencional, fria e verde do apartamento em Curitiba e Brasília

Tipologia de cobertura	Custo total do ciclo de vida (R\$)	Custo total do ciclo de vida por área de apartamento (R\$/m²)
Curitiba		
CC00	89.223,54	1.980,54
CC04	88.847,85	1.972,21
CF00	79.858,14	1.772,66
CF04	85.157,04	1.890,28
CV00	118.786,61	2.636,77
CV04	125.992,61	2.796,73
Brasília		
CC00	125.795,43	2.792,35
CC04	130.173,85	2.889,54
CF00	105.737,51	2.347,11
CF04	123.030,57	2.730,98
CV00	145.845,86	3.237,42
CV04	160.354,50	3.559,48

Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Apêndice H - Quantitativo e custo dos insumos das coberturas

Tabela 41 - Custos iniciais das coberturas convencional e fria em Florianópolis

Código SINAPI/TCPO	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
92620	Fabricação e instalação de tesoura inteira em aço, vão de 12 m, para telha ondulada de fibrocimento, metálica, plástica ou termoacústica, incluso içamento	un	15,00		46.581,73
4777	Cantoneira aço abas iguais (qualquer bitola), espessura entre 1/8" e 1/4"	kg	807,90	13,61	10.995,52
10997	Eletrodo revestido aws - e7018, diâmetro igual a 4,00 mm	kg	7,83	39,43	308,74
40598	Perfil udc ("u" dobrado de chapa) simples de aço laminado, galvanizado, astm a36, 127 x 50 mm, e= 3 mm	kg	2.000,70	14,33	28.670,03
88278	Montador de estrutura metálica com encargos complementares	h	42,66	24,90	1.062,23
88316	Servente com encargos complementares	h	9,84	21,48	211,36
92258	Instalação de tesoura (inteira ou meia), em aço, para vãos maiores ou iguais a 10,0 m e menores que 12,0 m, incluso içamento	un	15,00	355,59	5.333,85
92580	Trama de aço composta por terças para telhados de até 2 águas para telha ondulada de fibrocimento, metálica, plástica ou termoacústica, incluso transporte vertical	m²	442,41		32.539,30
40549	Parafuso, comum, astm a307, sextavado, diâmetro 1/2" (12,7 mm), comprimento 1" (25,4 mm)	cento	3,10	265,60	822,54
43083	Perfil "u" enrijecido de aço galvanizado, dobrado, 150 x 60 x 20 mm, e = 3,00 mm ou 200 x 75 x 25 mm, e = 3,75 mm	kg	1.916,98	14,69	28.160,50
88278	Montador de estrutura metálica com encargos complementares	h	94,23	24,90	2.346,44
88316	Servente com encargos complementares	h	46,90	21,48	1.007,33
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno	chp	3,01	28,73	86,43
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno	chi	4,16	27,91	116,07
94207	Telhamento com telha ondulada de fibrocimento e = 6 mm, com recobrimento lateral de 1/4 de onda para telhado com inclinação maior que 10°, com até 2 águas, incluso içamento	m²	442,41		19.297,43
1607	Conjunto arruelas de vedação 5/16" para telha fibrocimento (uma arruela metálica e uma arruela pvc - cônicas)	cj	562,00	0,22	123,64
4302	Parafuso zincado rosca soberba, cabeça sextavada, 5/16 " x 250 mm, para fixação de telha em madeira	un	562,00	3,31	1.860,22
7194	Telha de fibrocimento ondulada e = 6 mm, de 2,44 x 1,10 m (sem amianto)	m²	564,08	25,26	14.248,64
88316	Servente com encargos complementares	h	66,36	21,48	1.425,46
88323	Telhadista com encargos complementares	h	50,88	29,30	1.490,72
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno	chp	2,21	28,73	63,55
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno	chi	3,05	27,91	85,20
94223	Cumeeira para telha de fibrocimento ondulada e = 6 mm, incluso acessórios de fixação e içamento	m	37,32		2.767,14
1607	Conjunto arruelas de vedação 5/16" para telha fibrocimento (uma arruela metálica e uma arruela pvc - cônica)	cj	157,00	0,22	34,54
4302	Parafuso zincado rosca soberba, cabeça sextavada, 5/16 " x 250 mm, para fixação de telha em madeira	un	157,00	3,31	519,67
7219	Cumeeira universal para telha ondulada de fibrocimento, e = 6 mm, aba 210 mm, comprimento 1100 mm (sem amianto)	un	39,00	53,44	2.084,16
88316	Servente com encargos complementares	h	2,72	21,48	58,52
88323	Telhadista com encargos complementares	h	2,24	29,30	65,61
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno	chp	0,07	28,73	1,93
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno.	chi	0,10	27,91	2,71

(Continuação)

94229	Calha em chapa de aço galvanizado número 24, desenvolvimento de 100 cm, incluso transporte vertical	m	82,16		14.405,82
142	Selante elástico monocomponente a base de poliuretano (pu) para juntas diversas	310ml	13,23	33,04	437,05
5061	Prego de aço polido com cabeça 18 x 27 (2 1/2 x 10)	kg	2,05	19,69	40,44
5104	Rebite de alumínio vazado de repuxo, 3,2 x 8 mm (1kg = 1025 unidades)	kg	0,40	97,04	39,07
13388	Solda em barra de estanho-chumbo 50/50	kg	14,79	191,88	2.837,67
40784	Calha quadrada de chapa de aço galvanizada num 24, corte 100 cm	m	86,27	99,27	8.563,82
88316	Servente com encargos complementares	h	52,01	21,48	1.117,12
88323	Telhadista com encargos complementares	h	44,28	29,30	1.297,53
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno	chp	1,08	28,73	31,16
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno	chi	1,50	27,91	41,96
100435	Rufo em fibrocimento para telha ondulada e = 6 mm, aba de 26 cm, incluso transporte vertical, exceto contrarrufo	m	35,18		2.066,47
7237	Rufo para telha ondulada de fibrocimento, e = 6 mm, aba *260* mm, comprimento 1100 mm (sem amianto)	un	36,00	50,32	1.811,52
88316	Servente com encargos complementares	h	6,33	21,48	136,02
88323	Telhadista com encargos complementares	h	2,99	29,30	87,62
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno	chp	0,46	28,73	13,34
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno	chi	0,64	27,91	17,97
07220.8.1.7	Isolamento térmico em laje ou piso empregando poliestireno expandido em placas de 5 cm	m²	442,41		13.524,76
01270.0.45.1/ 88316	Servente com encargos complementares	h	4,42	21,48	95,03
07210.3.3.1/ Mercado	Poliestireno expandido em placa (e = 50,00 mm/ comprimento = 1,00 m/ largura = 0,50m)	m²	464,54	28,91	13.429,73
-	Transporte de materiais das coberturas CC00 e CF00 com caminhão basculante				638,93
4221	Óleo diesel combustível comum	l	106,67	5,99	638,93
-	Transporte de materiais das coberturas CC04 e CF04 com caminhão basculante				1.597,33
4221	Óleo diesel combustível comum	l	266,67	5,99	1.597,33

Fonte: Adaptado de SINAPI (2023c) e TCPO (2010). Nota: esses valores referem-se ao custo dos insumos da área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento. No caso da cobertura fria, foi adotado valor unitário de mercado para a telha de fibrocimento branca de 40,01 R\$/m².

Tabela 42 - Custos iniciais da cobertura convencional em Curitiba

Código SINAPI/TCPO	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
92620	Fabricação e instalação de tesoura inteira em aço, vão de 12 m, para telha ondulada de fibrocimento, metálica, plástica ou termoacústica, incluso içamento	un	15,00		38.218,33
4777	Cantoneira aço abas iguais (qualquer bitola), espessura entre 1/8" e 1/4"	kg	807,90	10,43	8.426,40
10997	Eletrodo revestido aws - e7018, diâmetro igual a 4,00 mm	kg	7,83	32,99	258,31
40598	Perfil udc ("u" dobrado de chapa) simples de aço laminado, galvanizado, astm a36, 127 x 50 mm, e= 3 mm	kg	2.000,70	10,98	21.967,69
88278	Montador de estrutura metálica com encargos complementares	h	42,66	29,70	1.267,00
88316	Servente com encargos complementares	h	9,84	25,12	247,18
92258	Instalação de tesoura (inteira ou meia), em aço, para vãos maiores ou iguais a 10,0 m e menores que 12,0 m, incluso içamento	un	15,00	403,45	6.051,75

(Continuação)

92580	Trama de aço composta por terças para telhados de até 2 águas para telha ondulada de fibrocimento, metálica, plástica ou termoacústica, incluso transporte vertical	m²	442,41		26.398,96
40549	Parafuso, comum, astm a307, sextavado, diâmetro 1/2" (12,7 mm), comprimento 1" (25,4 mm)	cento	3,10	199,63	618,24
43083	Perfil "u" enrijecido de aço galvanizado, dobrado, 150 x 60 x 20 mm, e = 3,00 mm ou 200 x 75 x 25 mm, e = 3,75 mm	kg	1.916,98	11,26	21.585,24
88278	Montador de estrutura metálica com encargos complementares	h	94,23	29,70	2.798,76
88316	Servente com encargos complementares	h	46,90	25,12	1.178,03
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno	chp	3,01	30,96	93,14
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno	chi	4,16	30,19	125,55
94207	Telhamento com telha ondulada de fibrocimento e = 6 mm, com recobrimento lateral de 1/4 de onda para telhado com inclinação maior que 10°, com até 2 águas, incluso içamento	m²	442,41		20.560,27
1607	Conjunto arruelas de vedação 5/16" para telha fibrocimento (uma arruela metálica e uma arruela pvc - cônicas)	cj	562,00	0,16	89,92
4302	Parafuso zincado rosca soberba, cabeça sextavada, 5/16 " x 250 mm, para fixação de telha em madeira	un	562,00	2,54	1.427,48
7194	Telha de fibrocimento ondulada e = 6 mm, de 2,44 x 1,10 m (sem amianto)	m²	564,08	27,65	15.596,79
88316	Servente com encargos complementares	h	66,36	25,12	1.667,02
88323	Telhadista com encargos complementares	h	50,88	31,81	1.618,42
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno	chp	2,21	30,96	68,49
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno	chi	3,05	30,19	92,16
94223	Cumeeira para telha de fibrocimento ondulada e = 6 mm, incluso acessórios de fixação e içamento	m	37,32		2.849,29
1607	Conjunto arruelas de vedação 5/16" para telha fibrocimento (uma arruela metálica e uma arruela pvc - cônica)	cj	157,00	0,16	25,12
4302	Parafuso zincado rosca soberba, cabeça sextavada, 5/16 " x 250 mm, para fixação de telha em madeira	un	157,00	2,54	398,78
7219	Cumeeira universal para telha ondulada de fibrocimento, e = 6 mm, aba 210 mm, comprimento 1100 mm (sem amianto)	un	39,00	58,48	2.280,72
88316	Servente com encargos complementares	h	2,72	25,12	68,44
88323	Telhadista com encargos complementares	h	2,24	31,81	71,23
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno	chp	0,07	30,96	2,08
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno.	chi	0,10	30,19	2,93
94229	Calha em chapa de aço galvanizado número 24, desenvolvimento de 100 cm, incluso transporte vertical	m	82,16		13.513,06
142	Selante elástico monocomponente a base de poliuretano (pu) para juntas diversas	310ml	13,23	36,78	486,52
5061	Prego de aço polido com cabeça 18 x 27 (2 1/2 x 10)	kg	2,05	17,00	34,92
5104	Rebite de alumínio vazado de repuxo, 3,2 x 8 mm (1kg = 1025 unidades)	kg	0,40	72,14	29,04
13388	Solda em barra de estanho-chumbo 50/50	kg	14,79	160,54	2.374,19
40784	Calha quadrada de chapa de aço galvanizada num 24, corte 100 cm	m	86,27	90,35	7.794,31
88316	Servente com encargos complementares	h	52,01	25,12	1.306,42
88323	Telhadista com encargos complementares	h	44,28	31,81	1.408,68
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno	chp	1,08	30,96	33,58
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno	chi	1,50	30,19	45,39
100435	Rufo em fibrocimento para telha ondulada e = 6 mm, aba de 26 cm, incluso transporte vertical, exceto contrarrufo	m	35,18		2.270,52
7237	Rufo para telha ondulada de fibrocimento, e = 6 mm, aba *260* mm, comprimento 1100 mm (sem amianto)	un	36,00	55,07	1.982,52
88316	Servente com encargos complementares	h	6,33	25,12	159,07

(Continuação)

88323	Telhadista com encargos complementares	h	2,99	31,81	95,12
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno	chp	0,46	30,96	14,38
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno	chi	0,64	30,19	19,44
07220.8.1.7	Isolamento térmico em laje ou piso empregando poliestireno expandido em placas de 5 cm	m²	442,41		13.540,86
01270.0.45.1/ 88316	Servente com encargos complementares	h	4,42	25,12	111,13
07210.3.3.1/ Mercado	Poliestireno expandido em placa (e = 50,00 mm/ comprimento = 1,00 m/ largura = 0,50m)	m²	464,54	28,91	13.429,73
-	Transporte de materiais das coberturas CC00 e CF00 com caminhão basculante				547,20
4221	Óleo diesel combustível comum	l	106,67	5,13	547,20
-	Transporte de materiais das coberturas CC04 e CF04 com caminhão basculante				1.368,00
4221	Óleo diesel combustível comum	l	266,67	5,13	1.368,00

Fonte: Adaptado de SINAPI (2023b) e TCPO (2010). Nota: esses valores referem-se ao custo dos insumos da área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento. No caso da cobertura fria, foi adotado valor unitário de mercado para a telha de fibrocimento branca de 40,01 R\$/m².

Tabela 43 - Custos iniciais da cobertura convencional em Brasília

Código SINAPI/TCPO	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
92620	Fabricação e instalação de tesoura inteira em aço, vão de 12 m, para telha ondulada de fibrocimento, metálica, plástica ou termoacústica, incluso içamento	un	15,00		35.785,01
4777	Cantoneira aço abas iguais (qualquer bitola), espessura entre 1/8" e 1/4"	kg	807,90	10,09	8.151,71
10997	Eletrodo revestido aws - e7018, diâmetro igual a 4,00 mm	kg	7,83	40,00	313,20
40598	Perfil udc ("u" dobrado de chapa) simples de aço laminado, galvanizado, astm a36, 127 x 50 mm, e= 3 mm	kg	2.000,70	10,62	21.247,43
88278	Montador de estrutura metálica com encargos complementares	h	42,66	22,49	959,42
88316	Servente com encargos complementares	h	9,84	21,91	215,59
92258	Instalação de tesoura (inteira ou meia), em aço, para vãos maiores ou iguais a 10,0 m e menores que 12,0 m, incluso içamento	un	15,00	326,51	4.897,65
92580	Trama de aço composta por terças para telhados de até 2 águas para telha ondulada de fibrocimento, metálica, plástica ou termoacústica, incluso transporte vertical	m²	442,41		24.805,95
40549	Parafuso, comum, astm a307, sextavado, diâmetro 1/2" (12,7 mm), comprimento 1" (25,4 mm)	cento	3,10	197,91	612,91
43083	Perfil "u" enrijecido de aço galvanizado, dobrado, 150 x 60 x 20 mm, e = 3,00 mm ou 200 x 75 x 25 mm, e = 3,75 mm	kg	1.916,98	10,89	20.875,96
88278	Montador de estrutura metálica com encargos complementares	h	94,23	22,49	2.119,33
88316	Servente com encargos complementares	h	46,90	21,91	1.027,49
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno	chp	3,01	24,22	72,86
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno	chi	4,16	23,42	97,40
94207	Telhamento com telha ondulada de fibrocimento e = 6 mm, com recobrimento lateral de 1/4 de onda para telhado com inclinação maior que 10°, com até 2 águas, incluso içamento	m²	442,41		20.390,58
1607	Conjunto arruelas de vedação 5/16" para telha fibrocimento (uma arruela metálica e uma arruela pvc - cônicas)	cj	562,00	0,28	157,36
4302	Parafuso zincado rosca soberba, cabeça sextavada, 5/16 " x 250 mm, para fixação de telha em madeira	un	562,00	4,25	2.388,50
7194	Telha de fibrocimento ondulada e = 6 mm, de 2,44 x 1,10 m (sem amianto)	m²	564,08	26,23	14.795,80
88316	Servente com encargos complementares	h	66,36	21,91	1.454,00
88323	Telhadista com encargos complementares	h	50,88	28,89	1.469,86

(Continuação)

93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno	chp	2,21	24,22	53,58
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno	chi	3,05	23,42	71,49
94223	Cumeeira para telha de fibrocimento ondulada e = 6 mm, incluso acessórios de fixação e içamento	m	37,32		3.003,60
1607	Conjunto arruelas de vedação 5/16" para telha fibrocimento (uma arruela metálica e uma arruela pvc - cônica)	cj	157,00	0,28	43,96
4302	Parafuso zincado rosca soberba, cabeça sextavada, 5/16 " x 250 mm, para fixação de telha em madeira	un	157,00	4,25	667,25
7219	Cumeeira universal para telha ondulada de fibrocimento, e = 6 mm, aba 210 mm, comprimento 1100 mm (sem amianto)	un	39,00	55,49	2.164,11
88316	Servente com encargos complementares	h	2,72	21,91	59,69
88323	Telhadista com encargos complementares	h	2,24	28,89	64,69
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno	chp	0,07	24,22	1,63
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno.	chi	0,10	23,42	2,27
94229	Calha em chapa de aço galvanizado número 24, desenvolvimento de 100 cm, incluso transporte vertical	m	82,16		15.258,93
142	Selante elástico monocomponente a base de poliuretano (pu) para juntas diversas	310ml	13,23	41,63	550,67
5061	Prego de aço polido com cabeça 18 x 27 (2 1/2 x 10)	kg	2,05	21,50	44,16
5104	Rebite de alumínio vazado de repuxo, 3,2 x 8 mm (1kg = 1025 unidades)	kg	0,40	64,57	25,99
13388	Solda em barra de estanho-chumbo 50/50	kg	14,79	194,66	2.878,79
40784	Calha quadrada de chapa de aço galvanizada num 24, corte 100 cm	m	86,27	107,56	9.278,99
88316	Servente com encargos complementares	h	52,01	21,91	1.139,48
88323	Telhadista com encargos complementares	h	44,28	28,89	1.279,37
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno	chp	1,08	24,22	26,27
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno	chi	1,50	23,42	35,21
100435	Rufo em fibrocimento para telha ondulada e = 6 mm, aba de 26 cm, incluso transporte vertical, exceto contrarrufo	m	35,18		2.132,46
7237	Rufo para telha ondulada de fibrocimento, e = 6 mm, aba *260* mm, comprimento 1100 mm (sem amianto)	un	36,00	52,25	1.881,00
88316	Servente com encargos complementares	h	6,33	21,91	138,74
88323	Telhadista com encargos complementares	h	2,99	28,89	86,39
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno	chp	0,46	24,22	11,25
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno	chi	0,64	23,42	15,08
07220.8.1.7	Isolamento térmico em laje ou piso empregando poliestireno expandido em placas de 5 cm	m²	442,41		13.526,66
01270.0.45.1/88316	Servente com encargos complementares	h	4,42	21,91	96,93
07210.3.3.1/Mercado	Poliestireno expandido em placa (e = 50,00 mm/ comprimento = 1,00 m/ largura = 0,50m)	m²	464,54	28,91	13.429,73
-	Transporte de materiais das coberturas CC00 e CF00 com caminhão basculante				569,62
4221	Óleo diesel combustível comum	l	106,67	5,34	569,62
-	Transporte de materiais das coberturas CC04 e CF04 com caminhão basculante				1.424,00
4221	Óleo diesel combustível comum	l	266,67	5,34	1.424,00

Fonte: Adaptado de SINAPI (2023a) e TCPO (2010). Nota: esses valores referem-se ao custo dos insumos da área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento. No caso da cobertura fria, foi adotado valor unitário de mercado para a telha de fibrocimento branca de 40,01 R\$/m².

Tabela 44 - Custos iniciais da cobertura verde em Florianópolis

Código SINAPI/TCPO	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
98546	Impermeabilização de superfície com manta asfáltica, uma camada, inclusive aplicação de primer asfáltico, e=3mm	m²	427,34		47.724,50
511	Primer para manta asfáltica a base de asfalto modificado diluído em solvente, aplicação a frio	l	262,81	12,50	3.285,18
4014	Manta asfáltica elastomérica em poliéster 3 mm, tipo III, classe B, acabamento PP (NBR 9952)	m²	480,76	59,96	28.826,22
4226	Gás de cozinha - GLP	kg	111,11	9,39	1.043,31
88243	Ajudante especializado com encargos complementares	h	82,05	23,03	1.889,59
88270	Impermeabilizador com encargos complementares	h	405,12	31,30	12.680,20
07220.8.1.7	Isolamento térmico em laje ou piso empregando poliestireno expandido em placas de 5 cm	m²	427,34		13.063,91
01270.0.45.1/88316	Servente com encargos complementares	h	4,27	21,48	91,79
07210.3.3.1/Mercado	Poliestireno expandido em placa (e = 50,00 mm/ comprimento = 1,00 m/ largura = 0,50m)	m²	448,71	28,91	12.972,12
97087	Camada separadora para execução de radier, piso de concreto ou laje sobre solo, em lona plástica (camada anti-raiz)	m²	427,34		1.299,80
42408	Lona plástica extra forte preta, e = 200 micra	m²	444,43	2,40	1.066,64
88309	Pedreiro com encargos complementares	h	5,98	31,30	187,26
88316	Servente com encargos complementares	h	2,14	21,48	45,90
-	Drenagem em PEAD	m²	427,34		29.257,75
Mercado	Módulo em PEAD	m²	448,71	65,00	29.165,96
01270.0.45.1/88316	Servente com encargos complementares	h	4,27	21,48	91,79
02625.8.2.1	Geotêxtil em colchão drenante usado como filtro e distribuidor de carga (camada filtrante)	m²	427,34		3.492,99
01270.0.45.1/88316	Servente com encargos complementares	h	4,27	21,48	91,79
02342.3.2.1/4013	Geotêxtil não tecido agulhado de filamentos contínuos 100% poliéster, resistência a tração = 09 kN/m	m²	448,71	7,58	3.401,20
98505	Plantio de forração	m²	427,34		69.863,97
360/ Mercado	Muda de rasteira/forração (<i>Sedum</i>)	un	10.684,00	4,25	45.371,39
Mercado	Vermiculita	m³	21,37	762,77	16.298,04
38125	Fertilizante orgânico composto, classe a	m³	4,27	840,00	3.589,66
370	Areia media - posto jazida/fornecedor (sem transporte)	m³	17,09	125,00	2.136,70
88316	Servente com encargos complementares	h	90,17	21,48	1.936,82
88441	Jardineiro com encargos complementares	h	22,56	23,55	531,37
Mercado	Instalações hidrossanitárias	m²	427,34		876,17
Mercado	Porta tampa para caixa sifonada PVC BR 250mm ESG	un	10,00	19,91	199,13
Mercado	Tampa cega redonda PVC BR 250mm esgoto	un	10,00	38,54	385,40
Mercado	Tubo 250mm esgoto	m	1,20	166,50	199,80
15 155.8.1/88248	Auxiliar de encanador	h	4,00	22,96	91,84
-	Transporte de materiais da cobertura CV00 com caminhão				1.277,87
4221	Óleo diesel combustível comum	l	213,33	5,99	1.277,87
-	Transporte de materiais da cobertura CV04 com caminhão				2.236,27
4221	Óleo diesel combustível comum	l	373,33	5,99	2.236,27

Fonte: Adaptado de SINAPI (2023c) e TCPO (2010). Nota: esses valores referem-se ao custo dos insumos da área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento. A atividade de fertilização foi considerada a cada seis meses e a de adição de substrato, a cada cinco anos. Estes custos foram recalculados anualmente, considerando a inflação, conforme 0.

Tabela 45 - Custos iniciais da cobertura verde em Curitiba

Código SINAPI/TCPO	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
98546	Impermeabilização de superfície com manta asfáltica, uma camada, inclusive aplicação de primer asfáltico, e=3mm	m²	427,34		46.839,39
511	Primer para manta asfáltica a base de asfalto modificado diluído em solvente, aplicação a frio	l	262,81	12,25	3.219,47
4014	Manta asfáltica elastomérica em poliéster 3 mm, tipo III, classe B, acabamento PP (NBR 9952)	m²	480,76	57,02	27.412,79
4226	Gás de cozinha - GLP	kg	111,11	7,69	854,42
88243	Ajudante especializado com encargos complementares	h	82,05	26,40	2.166,10
88270	Impermeabilizador com encargos complementares	h	405,12	32,55	13.186,60
07220.8.1.7	Isolamento térmico em laje ou piso empregando poliestireno expandido em placas de 5 cm	m²	427,34		13.079,47
01270.0.45.1/88316	Servente com encargos complementares	h	4,27	25,12	107,35
07210.3.3.1/ Mercado	Poliestireno expandido em placa (e = 50,00 mm/ comprimento = 1,00 m/ largura = 0,50m)	m²	448,71	28,91	12.972,12
97087	Camada separadora para execução de radier, piso de concreto ou laje sobre solo, em lona plástica (camada anti-raiz)	m²	427,34		1.323,94
42408	Lona plástica extra forte preta, e = 200 micra	m²	444,43	2,42	1.075,53
88309	Pedreiro com encargos complementares	h	5,98	32,55	194,74
88316	Servente com encargos complementares	h	2,14	25,12	53,67
-	Drenagem em PEAD	m²	427,34		29.273,30
Mercado	Módulo em PEAD	m²	448,71	65,00	29.165,96
01270.0.45.1/88316	Servente com encargos complementares	h	4,27	25,12	107,35
02625.8.2.1	Geotêxtil em colchão drenante usado como filtro e distribuidor de carga (camada filtrante)	m²	427,34		3.342,53
01270.0.45.1/88316	Servente com encargos complementares	h	4,27	25,12	107,35
02342.3.2.1/4013	Geotêxtil não tecido agulhado de filamentos contínuos 100% poliéster, resistência a tração = 09 kN/m	m²	448,71	7,21	3.235,18
98505	Plantio de forração	m²	427,34		69.795,24
360/ Mercado	Muda de rasteira/forração (<i>Sedum</i>)	un	10.684,00	4,25	45.371,39
Mercado	Vermiculita	m³	21,37	762,77	16.298,04
38125	Fertilizante orgânico composto, classe a	m³	4,27	833,33	3.561,15
370	Areia media - posto jazida/fornecedor (sem transporte)	m³	17,09	100,00	1.709,36
88316	Servente com encargos complementares	h	90,17	25,12	2.265,04
88441	Jardineiro com encargos complementares	h	22,56	26,16	590,26
Mercado	Instalações hidrossanitárias	m²	427,34		888,37
Mercado	Porta tampa para caixa sifonada PVC BR 250mm ESG	un	10,00	19,91	199,13
Mercado	Tampa cega redonda PVC BR 250mm esgoto	un	10,00	38,54	385,40
Mercado	Tubo 250mm esgoto	m	1,20	166,50	199,80
15 155.8.1/88248	Auxiliar de encanador	h	4,00	26,01	104,04
-	Transporte de materiais da cobertura CV00 com caminhão				1.094,40
4221	Óleo diesel combustível comum	l	213,33	5,13	1.094,40
-	Transporte de materiais da cobertura CV04 com caminhão				1.915,20
4221	Óleo diesel combustível comum	l	373,33	5,13	1.915,20

Fonte: Adaptado de SINAPI (2023b) e TCPO (2010). Nota: esses valores referem-se ao custo dos insumos da área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento. A atividade de fertilização foi considerada a cada seis meses e a de adição de substrato, a cada cinco anos. Estes custos foram recalculados anualmente, considerando a inflação, conforme 0.

Tabela 46 - Custos iniciais da cobertura verde em Brasília

Código SINAPI/TCPO	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
98546	Impermeabilização de superfície com manta asfáltica, uma camada, inclusive aplicação de primer asfáltico, e=3mm	m²	427,34		46.640,41
511	Primer para manta asfáltica a base de asfalto modificado diluído em solvente, aplicação a frio	l	262,81	20,30	5.335,13
4014	Manta asfáltica elastomérica em poliéster 3 mm, tipo III, classe B, acabamento PP (NBR 9952)	m²	480,76	55,25	26.561,85
4226	Gás de cozinha - GLP	kg	111,11	7,95	883,31
88243	Ajudante especializado com encargos complementares	h	82,05	23,12	1.896,98
88270	Impermeabilizador com encargos complementares	h	405,12	29,53	11.963,14
07220.8.1.7	Isolamento térmico em laje ou piso empregando poliestireno expandido em placas de 5 cm	m²	427,34		13.065,75
01270.0.45.1/88316	Servente com encargos complementares	h	4,27	21,91	93,63
07210.3.3.1/Mercado	Poliestireno expandido em placa (e = 50,00 mm/ comprimento = 1,00 m/ largura = 0,50m)	m²	448,71	28,91	12.972,12
97087	Camada separadora para execução de radier, piso de concreto ou laje sobre solo, em lona plástica (camada anti-raiz)	m²	427,34		1.161,24
42408	Lona plástica extra forte preta, e = 200 micra	m²	444,43	2,11	937,75
88309	Pedreiro com encargos complementares	h	5,98	29,53	176,67
88316	Servente com encargos complementares	h	2,14	21,91	46,82
-	Drenagem em PEAD	m²	427,34		29.259,59
Mercado	Módulo em PEAD	m²	448,71	65,00	29.165,96
01270.0.45.1/88316	Servente com encargos complementares	h	4,27	21,91	93,63
02625.8.2.1	Geotêxtil em colchão drenante usado como filtro e distribuidor de carga (camada filtrante)	m²	427,34		3.225,61
01270.0.45.1/88316	Servente com encargos complementares	h	4,27	21,91	93,63
02342.3.2.1/4013	Geotêxtil não tecido agulhado de filamentos contínuos 100% poliéster, resistência a tração = 09 kN/m	m²	448,71	6,98	3.131,97
98505	Plantio de forração	m²	427,34		71.745,62
360/ Mercado	Muda de rasteira/forração (<i>Sedum</i>)	un	10.684,00	4,25	45.371,39
Mercado	Vermiculita	m³	21,37	762,77	16.298,04
38125	Fertilizante orgânico composto, classe a	m³	4,27	913,33	3.903,02
370	Areia media - posto jazida/fornecedor (sem transporte)	m³	17,09	214,98	3.674,78
88316	Servente com encargos complementares	h	90,17	21,91	1.975,60
88441	Jardineiro com encargos complementares	h	22,56	23,17	522,80
Mercado	Instalações hidrossanitárias	m²	427,34		875,09
Mercado	Porta tampa para caixa sifonada PVC BR 250mm ESG	un	10,00	19,91	199,13
Mercado	Tampa cega redonda PVC BR 250mm esgoto	un	10,00	38,54	385,40
Mercado	Tubo 250mm esgoto	m	1,20	166,50	199,80
15 155.8.1/88248	Auxiliar de encanador	h	4,00	22,69	90,76
-	Transporte de materiais da cobertura CV00 com caminhão				1.139,20
4221	Óleo diesel combustível comum	l	213,33	5,34	1.139,20
-	Transporte de materiais da cobertura CV04 com caminhão				1.993,60
4221	Óleo diesel combustível comum	l	373,33	5,34	1.993,60

Fonte: Adaptado de SINAPI (2023a) e TCPO (2010). Nota: esses valores referem-se ao custo dos insumos da área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento. A atividade de fertilização foi considerada a cada seis meses e a de adição de substrato, a cada cinco anos. Estes custos foram recalculados anualmente, considerando a inflação, conforme 0.

Tabela 47 - Custos atuais de manutenção das coberturas convencional e fria em Florianópolis

Código SINAPI/TCPO	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
99814	Limpeza de superfície com jato de alta pressão	m²	442,41		856,39
88316	Servente com encargos complementares	h	39,37	21,48	845,77
99833	Lavadora de alta pressão (lava-jato) para água fria, pressão de operação entre 1400 e 1900 lib/pol², vazão máxima entre 400 e 700 L/h	chp	6,64	1,60	10,62

Fonte: Adaptado de SINAPI (2023c). Nota: esses valores referem-se ao custo dos insumos da área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento. O custo da lavagem foi considerado a cada cinco anos. Este custo foi recalculado anualmente, considerando a inflação, conforme 0.

Tabela 48 - Custos atuais de manutenção das coberturas convencional e fria em Curitiba

Código SINAPI/TCPO	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
99814	Limpeza de superfície com jato de alta pressão	m²	442,41		999,05
88316	Servente com encargos complementares	h	39,37	25,12	989,10
99833	Lavadora de alta pressão (lava-jato) para água fria, pressão de operação entre 1400 e 1900 lib/pol², vazão máxima entre 400 e 700 L/h	chp	6,64	1,50	9,95

Fonte: Adaptado de SINAPI (2023b). Nota: esses valores referem-se ao custo dos insumos da área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento. O custo da lavagem foi considerado a cada cinco anos. Este custo foi recalculado anualmente, considerando a inflação, conforme 0.

Tabela 49 - Custos atuais de manutenção das coberturas convencional e fria em Brasília

Código SINAPI/TCPO	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
99814	Limpeza de superfície com jato de alta pressão	m²	442,41		873,32
88316	Servente com encargos complementares	h	39,37	21,91	862,70
99833	Lavadora de alta pressão (lava-jato) para água fria, pressão de operação entre 1400 e 1900 lib/pol², vazão máxima entre 400 e 700 L/h	chp	6,64	1,60	10,62

Fonte: Adaptado de SINAPI (2023a). Nota: esses valores referem-se ao custo dos insumos da área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento. O custo da lavagem foi considerado a cada cinco anos. Este custo foi recalculado anualmente, considerando a inflação, conforme 0.

Tabela 50 - Custos atuais de manutenção da cobertura verde em Florianópolis

Código SINAPI/TCPO	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
98520	Aplicação de adubo em solo	m²	427,34		749,71
3123	Fertilizante NPK - 4: 14: 8	kg	3,42	3,36	11,49
88316	Servente com encargos complementares	h	26,97	21,48	579,21
88441	Jardineiro com encargos complementares	h	6,75	23,55	159,01
Mercado	Adição de substrato	m²	427,34		1.288,83
Mercado	Vermiculita	m³	0,53	762,77	407,45
38125	Fertilizante orgânico composto, classe a	m³	0,11	840,00	89,74
370	Areia media - posto jazida/fornecedor (retirado na jazida, sem transporte)	m³	0,43	125,00	53,42

(Continuação)

88316	Servente com encargos complementares	h	26,97	21,48	579,21
88441	Jardineiro com encargos complementares	h	6,75	23,55	159,01
-	Transporte de materiais das coberturas CV00 e CV04 com veículo utilitário				93,92
4222	Gasolina comum	l	16	5,87	93,92

Fonte: Adaptado de SINAPI (2023c). Nota: esses valores referem-se ao custo dos insumos da área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento. O custo da fertilização foi considerado a cada seis meses e o da adição de substrato, a cada cinco anos. Estes custos foram recalculados anualmente, considerando a inflação, conforme 0.

Tabela 51 - Custos atuais de manutenção da cobertura verde em Curitiba

Código SINAPI/TCPO	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
98520	Aplicação de adubo em solo	m²	427,34		864,59
3123	Fertilizante NPK - 4: 14: 8	kg	3,42	3,10	10,60
88316	Servente com encargos complementares	h	26,97	25,12	677,36
88441	Jardineiro com encargos complementares	h	6,75	26,16	176,63
Mercado	Adição de substrato	m²	427,36		1.393,28
Mercado	Vermiculita	m³	0,53	762,77	404,47
38125	Fertilizante orgânico composto, classe a	m³	0,11	833,33	89,03
370	Areia media - posto jazida/fornecedor (retirado na jazida, sem transporte)	m³	0,43	100,00	42,74
88316	Servente com encargos complementares	h	26,97	25,12	677,40
88441	Jardineiro com encargos complementares	h	6,75	26,16	176,64
-	Transporte de materiais das coberturas CV00 e CV04 com veículo utilitário				89,76
4222	Gasolina comum	l	16	5,61	89,76

Fonte: Adaptado de SINAPI (2023b). Nota: esses valores referem-se ao custo dos insumos da área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento. O custo da fertilização foi considerado a cada seis meses e o da adição de substrato, a cada cinco anos. Estes custos foram recalculados anualmente, considerando a inflação, conforme 0.

Tabela 52 - Custos atuais de manutenção da cobertura verde em Brasília

Código SINAPI/TCPO	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
98520	Aplicação de adubo em solo	m²	427,34		756,31
3123	Fertilizante NPK - 4: 14: 8	kg	3,42	2,65	9,06
88316	Servente com encargos complementares	h	26,97	21,91	590,81
88441	Jardineiro com encargos complementares	h	6,75	23,17	156,44
Mercado	Adição de substrato	m²	427,34		1.344,15
Mercado	Vermiculita	m³	0,53	762,77	407,45
38125	Fertilizante orgânico composto, classe a	m³	0,11	913,33	97,58
370	Areia media - posto jazida/fornecedor (retirado na jazida, sem transporte)	m³	0,43	214,98	91,87
88316	Servente com encargos complementares	h	26,97	21,91	590,81
88441	Jardineiro com encargos complementares	h	6,75	23,17	156,44
-	Transporte de materiais das coberturas CV00 e CV04 com veículo utilitário				89,12
4222	Gasolina comum	l	16	5,57	89,12

Fonte: Adaptado de SINAPI (2023a). Nota: esses valores referem-se ao custo dos insumos da área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento. O custo da fertilização foi considerado a cada seis meses e o da adição de substrato, a cada cinco anos. Estes custos foram recalculados anualmente, considerando a inflação, conforme 0.

Tabela 53 - Custos atuais de desconstrução das coberturas convencional e fria em Florianópolis

Código SINAPI/TCPO	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
97649	Remoção de telhas de fibrocimento, metálica e cerâmica, de forma mecanizada, com uso de guindaste, sem reaproveitamento	m2	442,41		1.951,60
88316	Servente com encargos complementares	h	45,48	21,48	976,92
88323	Telhadista com encargos complementares	h	23,18	29,3	679,25
93287	Guindaste hidráulico autopropelido, com lança telescópica 40 m, capacidade máxima 60 t, potência 260 kW - chp diurno	chp	0,27	316,93	84,13
93288	Guindaste hidráulico autopropelido, com lança telescópica 40 m, capacidade máxima 60 t, potência 260 kW - chi diurno	chi	1,37	154,07	211,30
97655	Remoção de trama metálica para cobertura, de forma manual, sem reaproveitamento	m2	442,41		13.329,33
88316	Servente com encargos complementares	h	207,49	21,48	4.456,94
88323	Telhadista com encargos complementares	h	105,65	29,3	3.095,51
92716	Aparelho para corte e solda oxi-acetileno sobre rodas, inclusive cilindros e maçaricos - chp diurno	chp	81,67	70,1	5.725,05
92717	Aparelho para corte e solda oxi-acetileno sobre rodas, inclusive cilindros e maçaricos - chi diurno	chi	199,35	0,26	51,83
97659	Remoção de tesouras metálicas, com vão maior ou igual a 8m, de forma mecanizada, com reaproveitamento	un	15,00		4.028,50
88316	Servente com encargos complementares	h	49,80	21,48	1.069,77
88323	Telhadista com encargos complementares	h	25,36	29,3	742,97
92716	Aparelho para corte e solda oxi-acetileno sobre rodas, inclusive cilindros e maçaricos - chp diurno	chp	9,87	70,1	691,99
92717	Aparelho para corte e solda oxi-acetileno sobre rodas, inclusive cilindros e maçaricos - chi diurno	chi	24,09	0,26	6,26
93287	Guindaste hidráulico autopropelido, com lança telescópica 40 m, capacidade máxima 60 t, potência 260 kW - chp diurno.	chp	1,30	316,93	410,74
93288	Guindaste hidráulico autopropelido, com lança telescópica 40 m, capacidade máxima 60 t, potência 260 kW - chi diurno	chi	7,18	154,07	1.106,76
97648	Remoção de proteção térmica para cobertura em EPS, de forma manual, sem reaproveitamento	m2	442,41		900,66
88316	Servente com encargos complementares	h	24,73	21,48	531,22
88323	Telhadista com encargos complementares	h	12,61	29,3	369,44
-	Transporte de materiais demolidos das coberturas CC00 e CF00 e disposição em aterro				1.600,00
Mercado	Caçamba para entulho (5m³) e disposição em aterro	un	5,00	320,00	1.600,00
-	Transporte de materiais demolidos das coberturas CC04 e CF04 e disposição em aterro				2.880,00
Mercado	Caçamba para entulho (5m³) e disposição em aterro	un	9,00	320,00	2.880,00

Fonte: Adaptado de SINAPI (2023c). Nota: esses valores referem-se ao custo dos insumos da área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento.

Tabela 54 - Custos atuais de desconstrução das coberturas convencional e fria em Curitiba

Código SINAPI/TCPO	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
97649	Remoção de telhas de fibrocimento, metálica e cerâmica, de forma mecanizada, com uso de guindaste, sem reaproveitamento	m2	442,41		2.237,44
88316	Servente com encargos complementares	h	45,48	25,12	1.142,46
88323	Telhadista com encargos complementares	h	23,18	31,81	737,44
93287	Guindaste hidráulico autopropelido, com lança telescópica 40 m, capacidade máxima 60 t, potência 260 kW - chp diurno	chp	0,27	355,73	94,43
93288	Guindaste hidráulico autopropelido, com lança telescópica 40 m, capacidade máxima 60 t, potência 260 kW - chi diurno	chi	1,37	191,84	263,11
97655	Remoção de trama metálica para cobertura, de forma manual, sem reaproveitamento	m2	442,41		14.539,19
88316	Servente com encargos complementares	h	207,49	25,12	5.212,21
88323	Telhadista com encargos complementares	h	105,65	31,81	3.360,69
92716	Aparelho para corte e solda oxi-acetileno sobre rodas, inclusive cilindros e maçaricos - chp diurno	chp	81,67	72,59	5.928,41
92717	Aparelho para corte e solda oxi-acetileno sobre rodas, inclusive cilindros e maçaricos - chi diurno	chi	199,35	0,19	37,88
97659	Remoção de tesouras metálicas, com vão maior ou igual a 8m, de forma mecanizada, com reaproveitamento	un	15,00		4.617,93
88316	Servente com encargos complementares	h	49,80	25,12	1.251,05
88323	Telhadista com encargos complementares	h	25,36	31,81	806,62
92716	Aparelho para corte e solda oxi-acetileno sobre rodas, inclusive cilindros e maçaricos - chp diurno	chp	9,87	72,59	716,57
92717	Aparelho para corte e solda oxi-acetileno sobre rodas, inclusive cilindros e maçaricos - chi diurno	chi	24,09	0,19	4,58
93287	Guindaste hidráulico autopropelido, com lança telescópica 40 m, capacidade máxima 60 t, potência 260 kW - chp diurno.	chp	1,30	355,73	461,03
93288	Guindaste hidráulico autopropelido, com lança telescópica 40 m, capacidade máxima 60 t, potência 260 kW - chi diurno	chi	7,18	191,84	1.378,08
97648	Remoção de proteção térmica para cobertura em EPS, de forma manual, sem reaproveitamento	m2	442,41		1.022,33
88316	Servente com encargos complementares	h	24,73	25,12	621,24
88323	Telhadista com encargos complementares	h	12,61	31,81	401,09
-	Transporte de materiais demolidos das coberturas CC00 e CF00 e disposição em aterro				1.883,33
Mercado	Caçamba para entulho (5m³) e disposição em aterro	un	5,00	367,67	1.883,33
-	Transporte de materiais demolidos das coberturas CC04 e CF04 e disposição em aterro				3.390,00
Mercado	Caçamba para entulho (5m³) e disposição em aterro	un	9,00	367,67	3.390,00

Fonte: Adaptado de SINAPI (2023b). Nota: esses valores referem-se ao custo dos insumos da área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento.

Tabela 55 - Custos atuais de desconstrução das coberturas convencional e fria em Brasília

Código SINAPI/TCPO	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
97649	Remoção de telhas de fibrocimento, metálica e cerâmica, de forma mecanizada, com uso de guindaste, sem reaproveitamento	m2	442,41		1.957,13
88316	Servente com encargos complementares	h	45,48	21,91	996,47
88323	Telhadista com encargos complementares	h	23,18	28,89	669,74
93287	Guindaste hidráulico autopropelido, com lança telescópica 40 m, capacidade máxima 60 t, potência 260 kW - chp diurno	chp	0,27	315,36	83,71
93288	Guindaste hidráulico autopropelido, com lança telescópica 40 m, capacidade máxima 60 t, potência 260 kW - chi diurno	chi	1,37	151,08	207,20

(Continuação)

97655	Remoção de trama metálica para cobertura, de forma manual, sem reaproveitamento	m2	442,41		14.342,33
88316	Servente com encargos complementares	h	207,49	21,91	4.546,16
88323	Telhadista com encargos complementares	h	105,65	28,89	3.052,19
92716	Aparelho para corte e solda oxi-acetileno sobre rodas, inclusive cilindros e maçaricos - chp diurno	chp	81,67	82,21	6.714,07
92717	Aparelho para corte e solda oxi-acetileno sobre rodas, inclusive cilindros e maçaricos - chi diurno	chi	199,35	0,15	29,90
97659	Remoção de tesouras metálicas, com vão maior ou igual a 8m, de forma mecanizada, com reaproveitamento	un	15,00		4.132,90
88316	Servente com encargos complementares	h	49,80	21,91	1.091,18
88323	Telhadista com encargos complementares	h	25,36	28,89	732,58
92716	Aparelho para corte e solda oxi-acetileno sobre rodas, inclusive cilindros e maçaricos - chp diurno	chp	9,87	82,21	811,54
92717	Aparelho para corte e solda oxi-acetileno sobre rodas, inclusive cilindros e maçaricos - chi diurno	chi	24,09	0,15	3,61
93287	Guindaste hidráulico autopropelido, com lança telescópica 40 m, capacidade máxima 60 t, potência 260 kW - chp diurno.	chp	1,30	315,36	408,71
93288	Guindaste hidráulico autopropelido, com lança telescópica 40 m, capacidade máxima 60 t, potência 260 kW - chi diurno	chi	7,18	151,08	1.085,28
97648	Remoção de proteção térmica para cobertura em EPS, de forma manual, sem reaproveitamento	m2	442,41		906,13
88316	Servente com encargos complementares	h	24,73	21,91	541,86
88323	Telhadista com encargos complementares	h	12,61	28,89	364,27
-	Transporte de materiais demolidos das coberturas CC00 e CF00 e disposição em aterro				1.866,67
Mercado	Caçamba para entulho (5m³) e disposição em aterro	un	5,00	373,33	1.866,67
-	Transporte de materiais demolidos das coberturas CC04 e CF04 e disposição em aterro			373,33	3.360,00
Mercado	Caçamba para entulho (5m³) e disposição em aterro	un	9,00		3.360,00

Fonte: Adaptado de SINAPI (2023a). Nota: esses valores referem-se ao custo dos insumos da área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento.

Tabela 56 - Custos atuais de desconstrução da cobertura verde em Florianópolis

Código SINAPI/TCPO	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
98519	Revolvimento e limpeza manual de solo	m²	427,34		887,92
88316	Servente com encargos complementares	h	32,44	21,48	696,71
88441	Jardineiro com encargos complementares	h	8,12	23,55	191,21
-	Remoção da camada filtrante		427,34		91,79
01270.0.45.1/88316	Servente com encargos complementares	h	4,2734	21,48	91,79
-	Remoção da camada drenante		427,34		91,79
01270.0.45.1/88316	Servente com encargos complementares	h	4,2734	21,48	91,79
-	Remoção da camada anti-raiz		427,34		91,79
01270.0.45.1/88316	Servente com encargos complementares	h	4,2734	21,48	91,79
97648	Remoção de proteção térmica para cobertura em EPS, de forma manual, sem reaproveitamento		427,34		869,97
88316	Servente com encargos complementares	h	23,89	21,48	513,12
88323	Telhadista com encargos complementares	h	12,18	29,3	356,85
02 225.8.4.1 (adaptado)	Remoção de impermeabilização	m²	427,34		10.897,17
01270.0.40.1/88309	Pedreiro com encargos complementares	h	128,202	31,30	4.012,72

(Continuação)

01270.0.45.1/ 88316	Servente com encargos complementares	h	320,505	21,48	6.884,45
-	Transporte de materiais demolidos da cobertura CV00 e disposição em aterro				5.120,00
Mercado	Caçamba para entulho (5m³) e disposição em aterro	un	16,00	320,00	5.120,00
-	Transporte de materiais demolidos da cobertura CV04 e disposição em aterro				6.080,00
Mercado	Caçamba para entulho (5m³) e disposição em aterro	un	19,00	320,00	6.080,00

Fonte: Adaptado de SINAPI (2023c) e TCPO (2010). Nota: esses valores referem-se ao custo dos insumos da área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento.

Tabela 57 - Custos atuais de desconstrução da cobertura verde em Curitiba

Código SINAPI/TCPO	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
98519	Revolvimento e limpeza manual de solo	m²	427,34		1.027,17
88316	Servente com encargos complementares	h	32,44	25,12	814,77
88441	Jardineiro com encargos complementares	h	8,12	26,16	212,41
-	Remoção da camada filtrante		427,34		107,35
01270.0.45.1/ 88316	Servente com encargos complementares	h	4,2734	25,12	107,35
-	Remoção da camada drenante		427,34		107,35
01270.0.45.1/ 88316	Servente com encargos complementares	h	4,2734	25,12	107,35
-	Remoção da camada anti-raiz		427,34		107,35
01270.0.45.1/ 88316	Servente com encargos complementares	h	4,2734	25,12	107,35
97648	Remoção de proteção térmica para cobertura em EPS, de forma manual, sem reaproveitamento		427,34		987,49
88316	Servente com encargos complementares	h	23,89	25,12	600,07
88323	Telhadista com encargos complementares	h	12,18	31,81	387,42
02 225.8.4.1 (adaptado)	Remoção de impermeabilização	m²	427,34		12.224,06
01270.0.40.1/ 88309	Pedreiro com encargos complementares	h	128,202	32,55	4.172,98
01270.0.45.1/ 88316	Servente com encargos complementares	h	320,505	25,12	8.051,09
-	Transporte de materiais demolidos da cobertura CV00 e disposição em aterro			376,67	6.026,67
Mercado	Caçamba para entulho (5m³) e disposição em aterro	un	16,00	376,67	6.026,67
-	Transporte de materiais demolidos da cobertura CV04 e disposição em aterro			376,67	7.156,67
Mercado	Caçamba para entulho (5m³) e disposição em aterro	un	19,00	376,67	7.156,67

Fonte: Adaptado de SINAPI (2023b) e TCPO (2010). Nota: esses valores referem-se ao custo dos insumos da área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento.

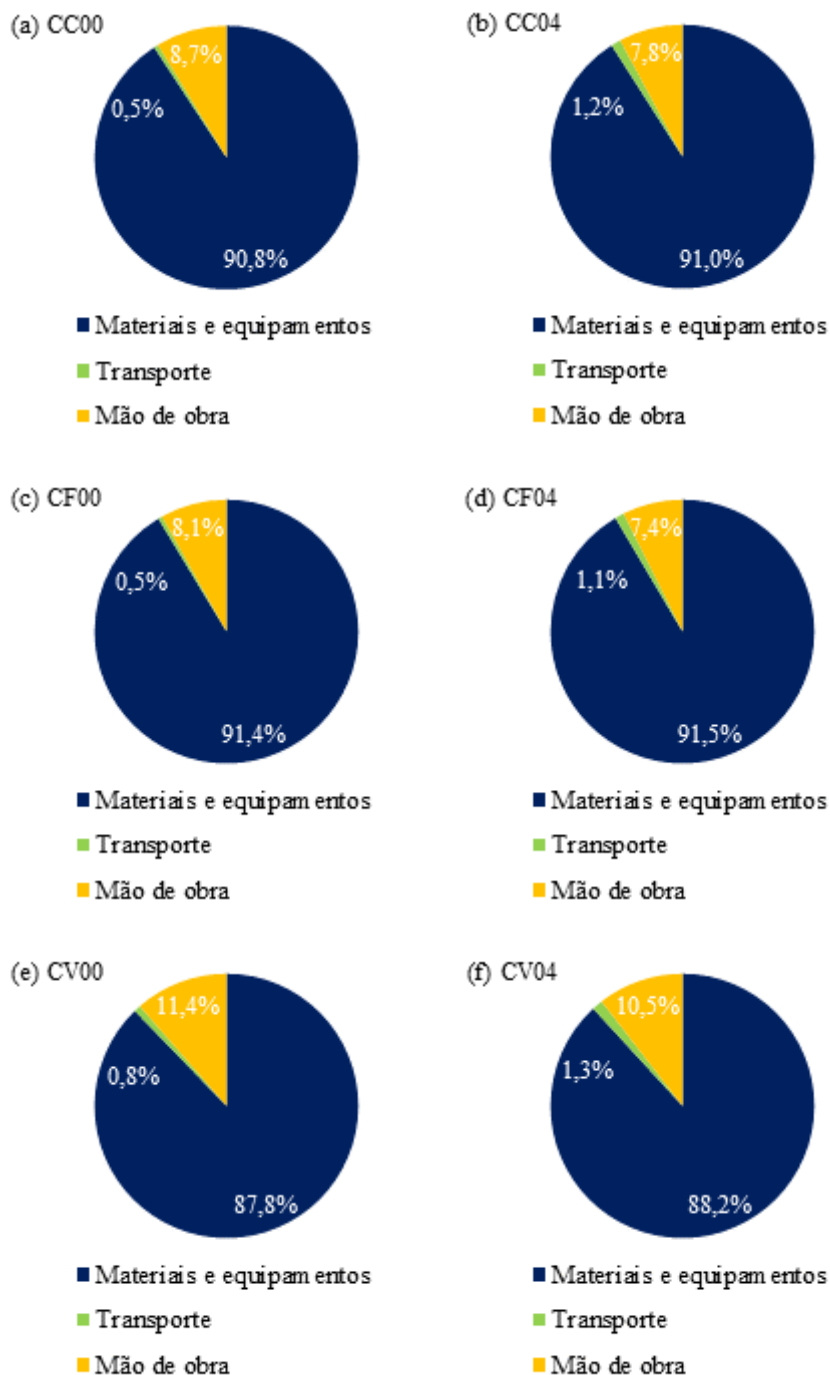
Tabela 58 - Custos atuais de desconstrução da cobertura verde em Brasília

Código SINAPI/TCPO	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
98519	Revolvimento e limpeza manual de solo	m²	427,34		898,78
88316	Servente com encargos complementares	h	32,44	21,91	710,65
88441	Jardineiro com encargos complementares	h	8,12	23,17	188,13
-	Remoção da camada filtrante		427,34		93,63
01270.0.45.1/88316	Servente com encargos complementares	h	4,2734	21,91	93,63
-	Remoção da camada drenante		427,34		93,63
01270.0.45.1/88316	Servente com encargos complementares	h	4,2734	21,91	93,63
-	Remoção da camada anti-raiz		427,34		93,63
01270.0.45.1/88316	Servente com encargos complementares	h	4,2734	21,91	93,63
97648	Remoção de proteção térmica para cobertura em EPS, de forma manual, sem reaproveitamento		427,34		875,25
88316	Servente com encargos complementares	h	23,89	21,91	523,39
88323	Telhadista com encargos complementares	h	12,18	28,89	351,86
02 225.8.4.1 (adaptado)	Remoção de impermeabilização	m²	427,34		10.808,07
01270.0.40.1/88309	Pedreiro com encargos complementares	h	128,202	29,53	3.785,81
01270.0.45.1/88316	Servente com encargos complementares	h	320,505	21,91	7.022,26
-	Transporte de materiais demolidos da cobertura CV00 e disposição em aterro			373,33	5.973,33
Mercado	Caçamba para entulho (5m³) e disposição em aterro	un	16,00	373,33	5.973,33
-	Transporte de materiais demolidos da cobertura CV04 e disposição em aterro			373,33	7.093,33
Mercado	Caçamba para entulho (5m³) e disposição em aterro	un	19,00	373,33	7.093,33

Fonte: Adaptado de SINAPI (2023a) e TCPO (2010). Nota: esses valores referem-se ao custo dos insumos da área de cobertura de toda a edificação e foram posteriormente divididos pela área total do último pavimento e multiplicados pela área do apartamento.

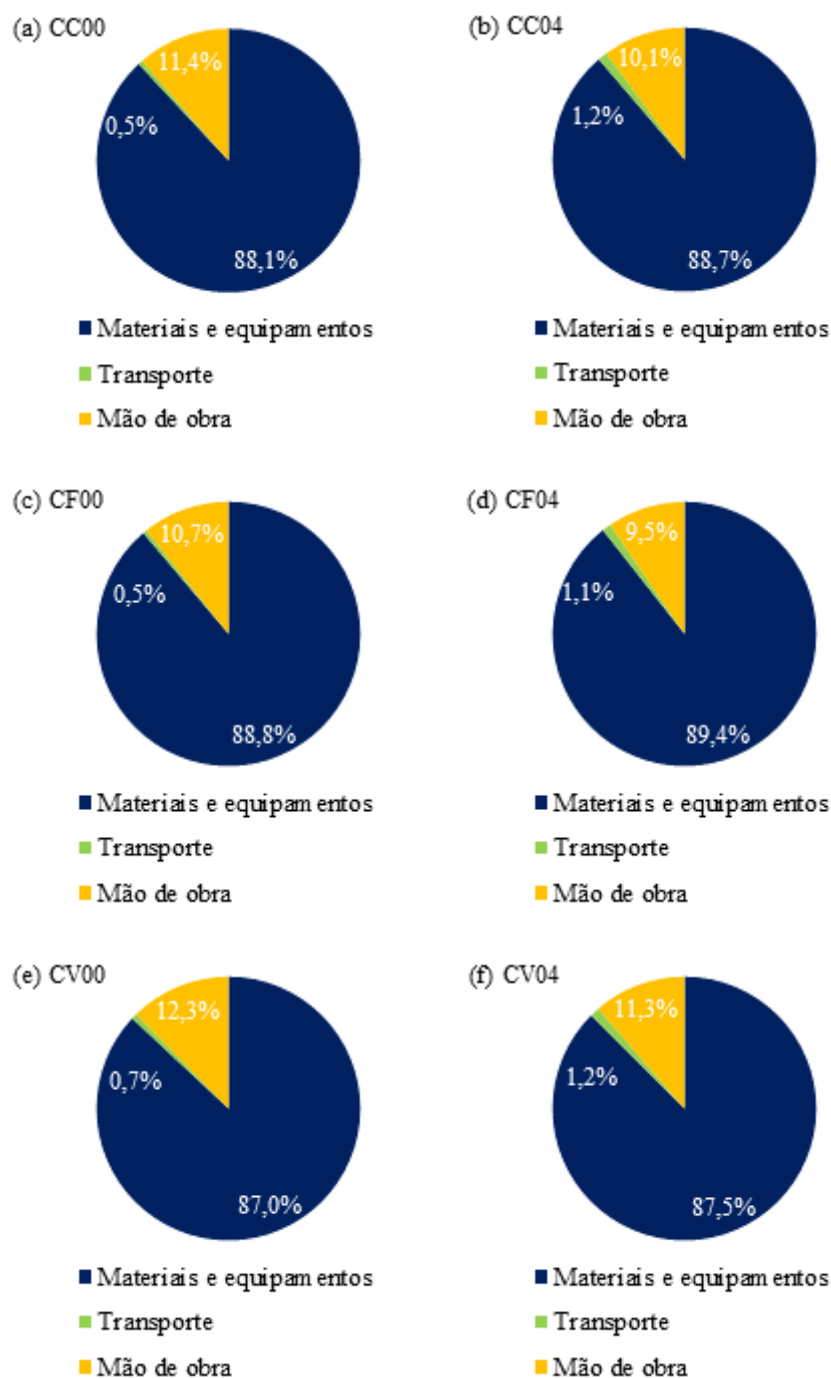
Apêndice I - Representatividade dos custos em cada fase do ciclo de vida

Figura 34 - Representatividade dos custos das coberturas na fase inicial em Florianópolis



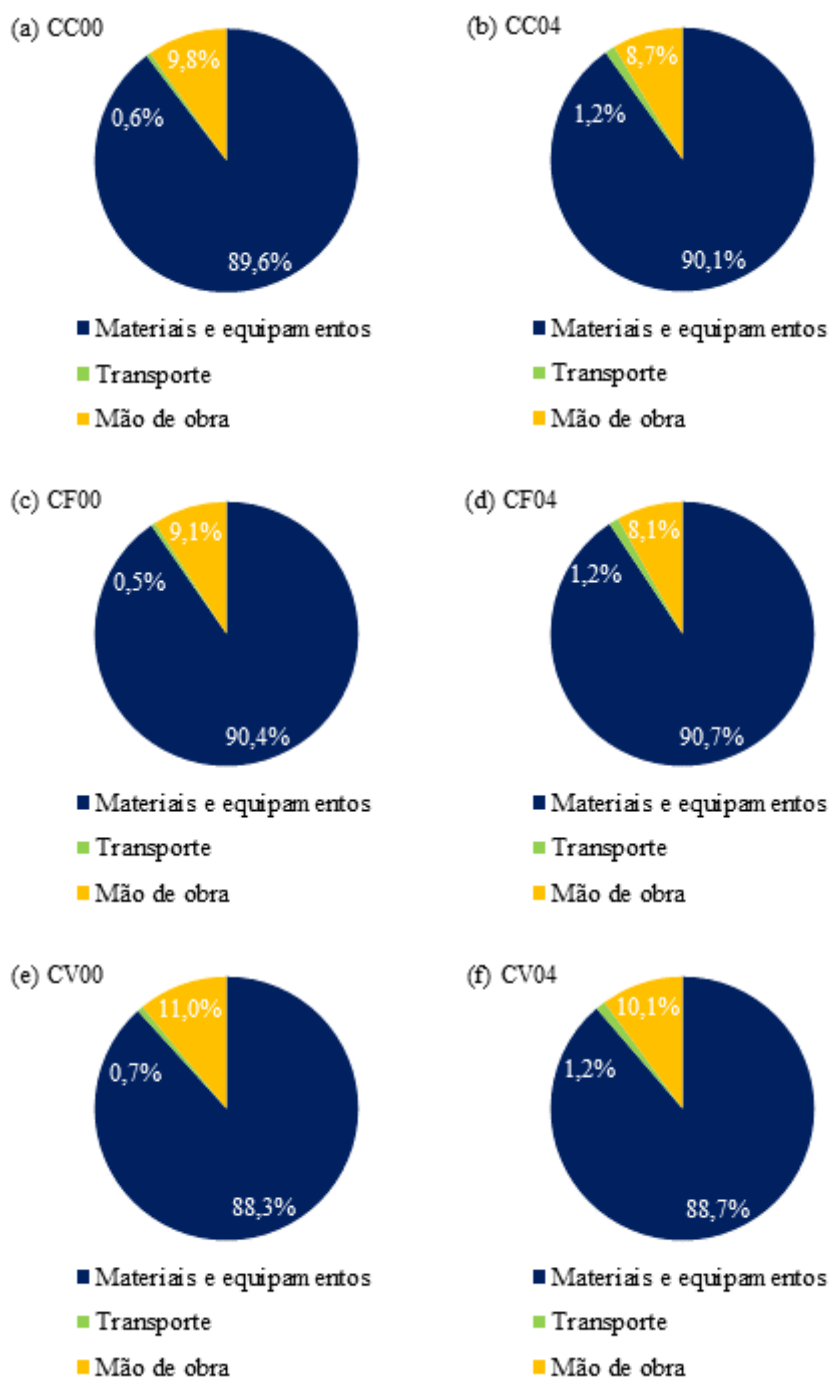
Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Figura 35 - Representatividade dos custos das coberturas na fase inicial em Curitiba



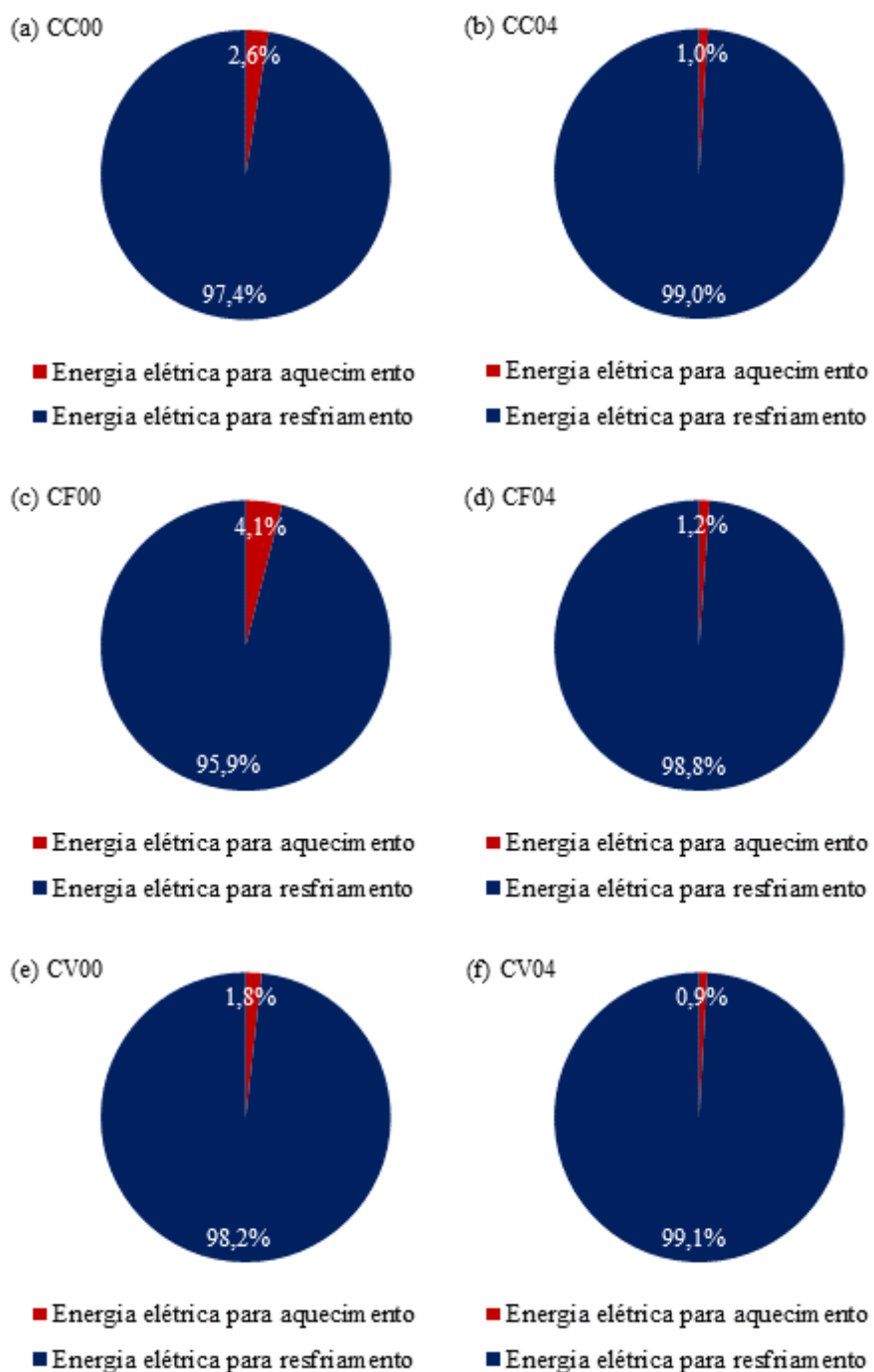
Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Figura 36 - Representatividade dos custos das coberturas na fase inicial em Brasília



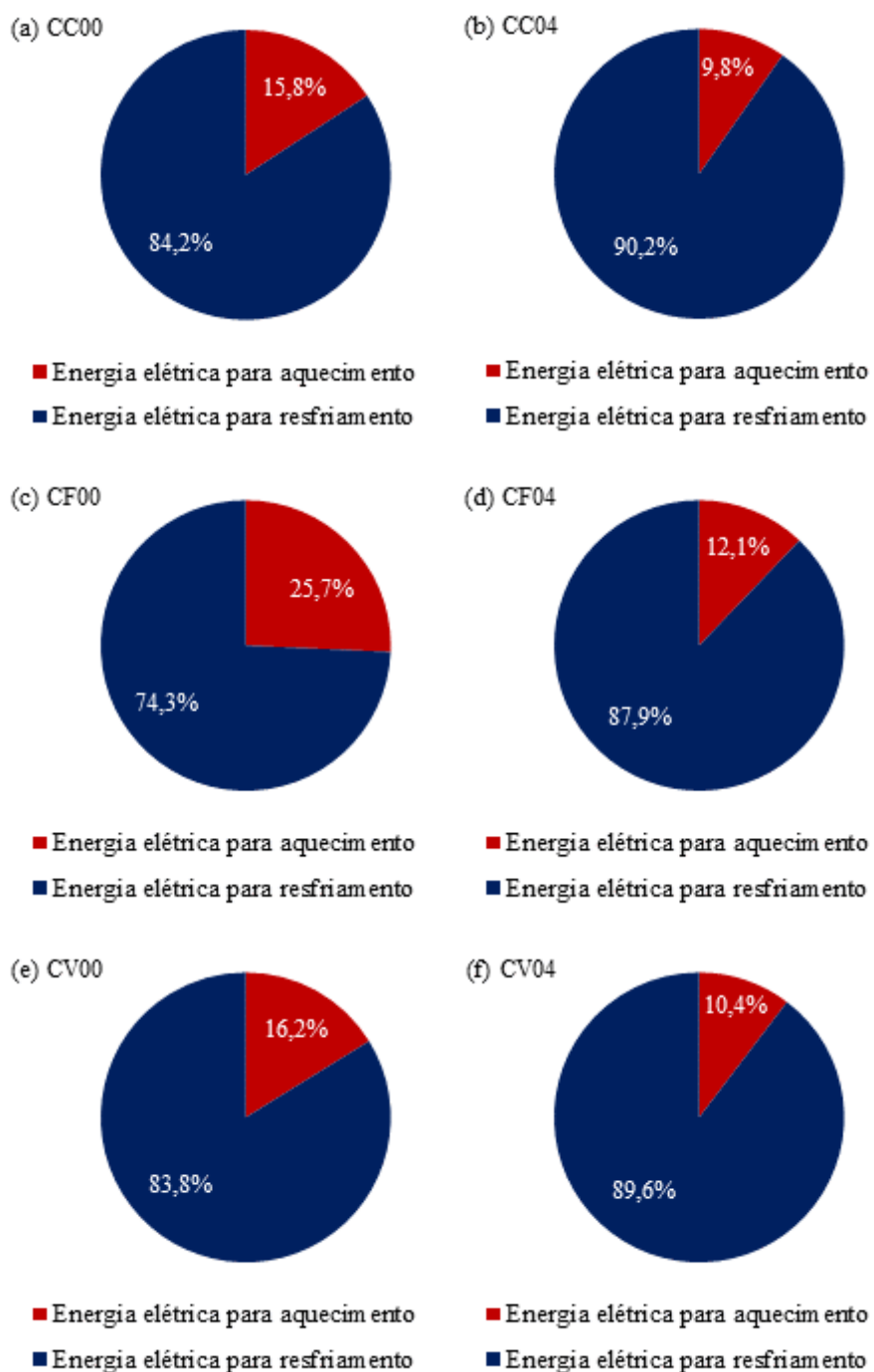
Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Figura 37 - Representatividade dos custos das coberturas na fase operacional em Florianópolis



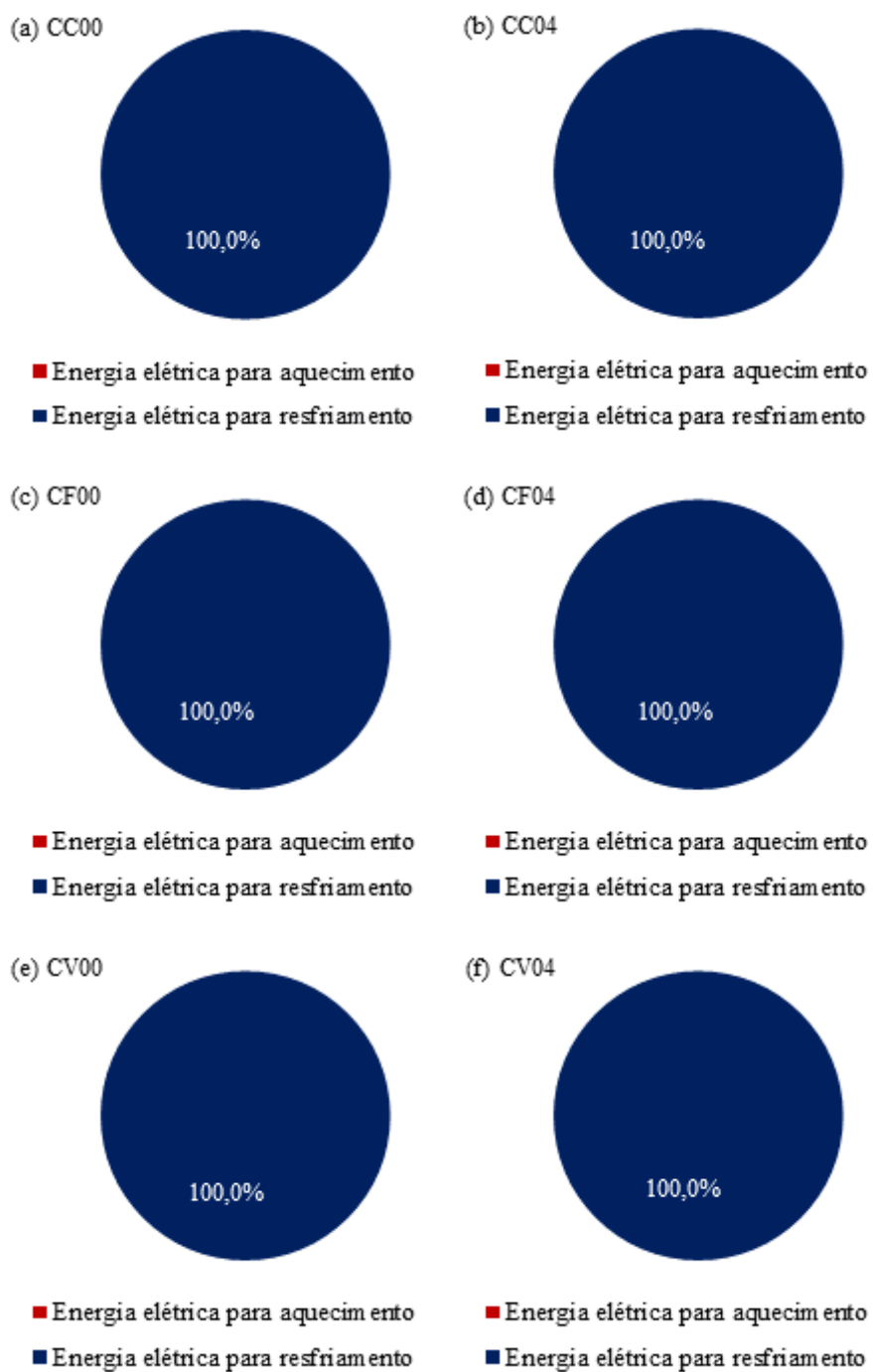
Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Figura 38 - Representatividade dos custos das coberturas na fase operacional em Curitiba



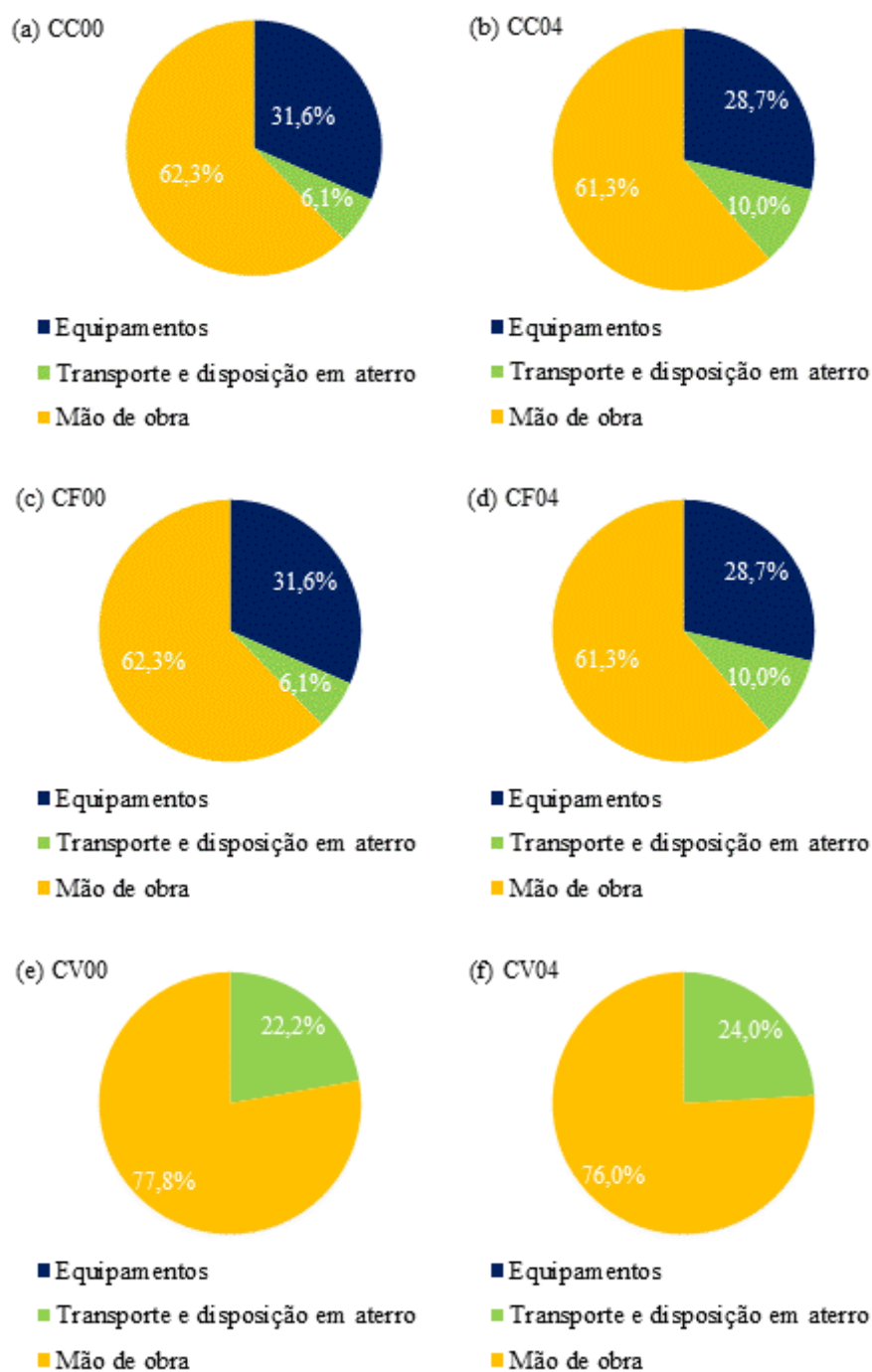
Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Figura 39 - Representatividade dos custos das coberturas na fase operacional em Brasília



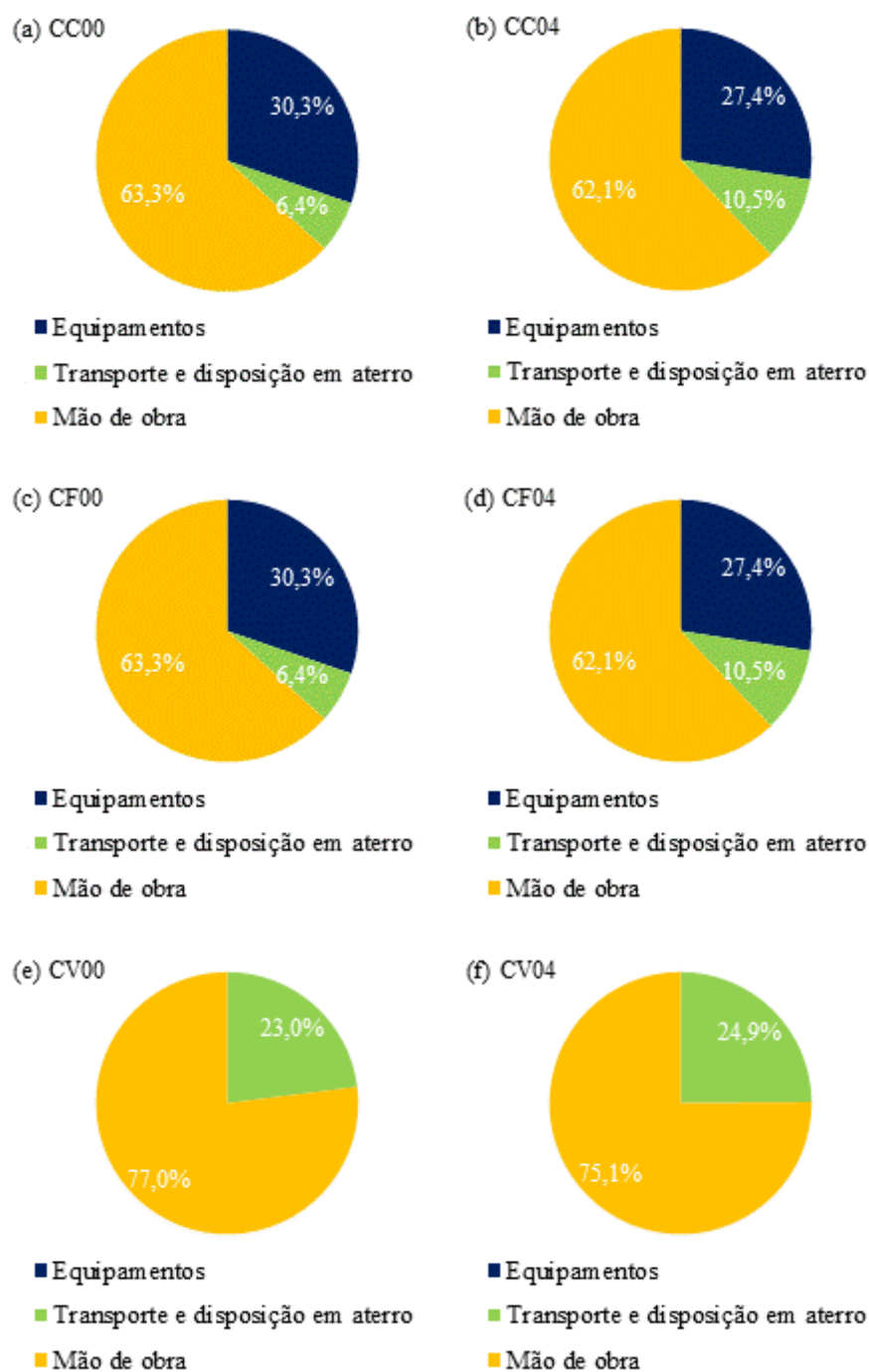
Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Figura 40 - Representatividade dos custos das coberturas na fase de desconstrução em Florianópolis



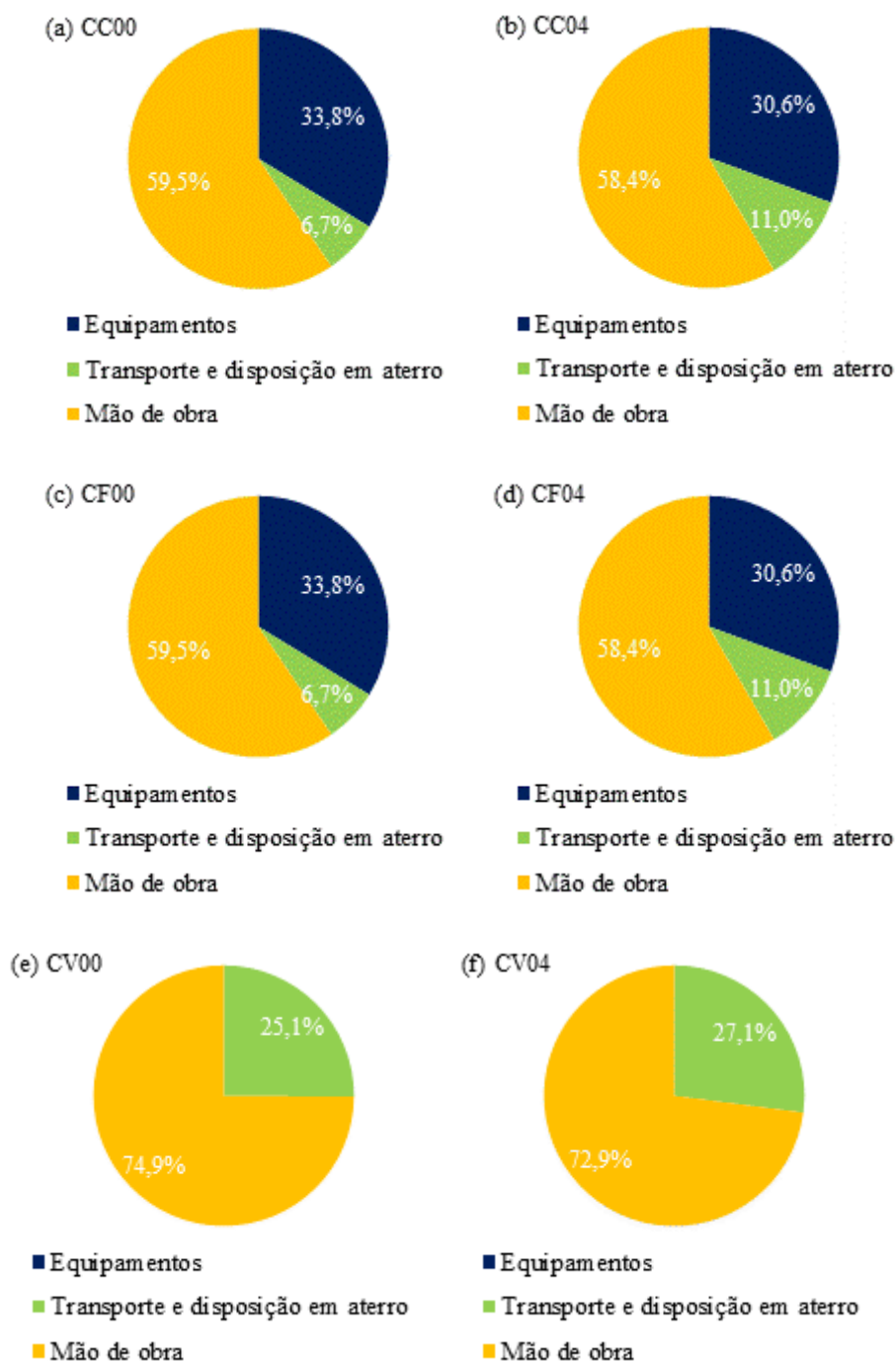
Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Figura 41 - Representatividade dos custos das coberturas na fase de desconstrução em Curitiba



Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Figura 42 - Representatividade dos custos das coberturas na fase de desconstrução em Brasília



Abreviações: cobertura convencional sem isolamento (CC00), cobertura convencional com isolamento (CC04), cobertura fria sem isolamento (CF00), cobertura fria com isolamento (CF04), cobertura verde sem isolamento (CV00) e cobertura verde com isolamento (CV04).

Apêndice J - Variação do VPL das coberturas conforme a variação dos valores de entrada

Figura 43 - Variação dos valores de entrada que influenciam o VPL das coberturas (a) convencional, (b) fria e (c) verde em Curitiba

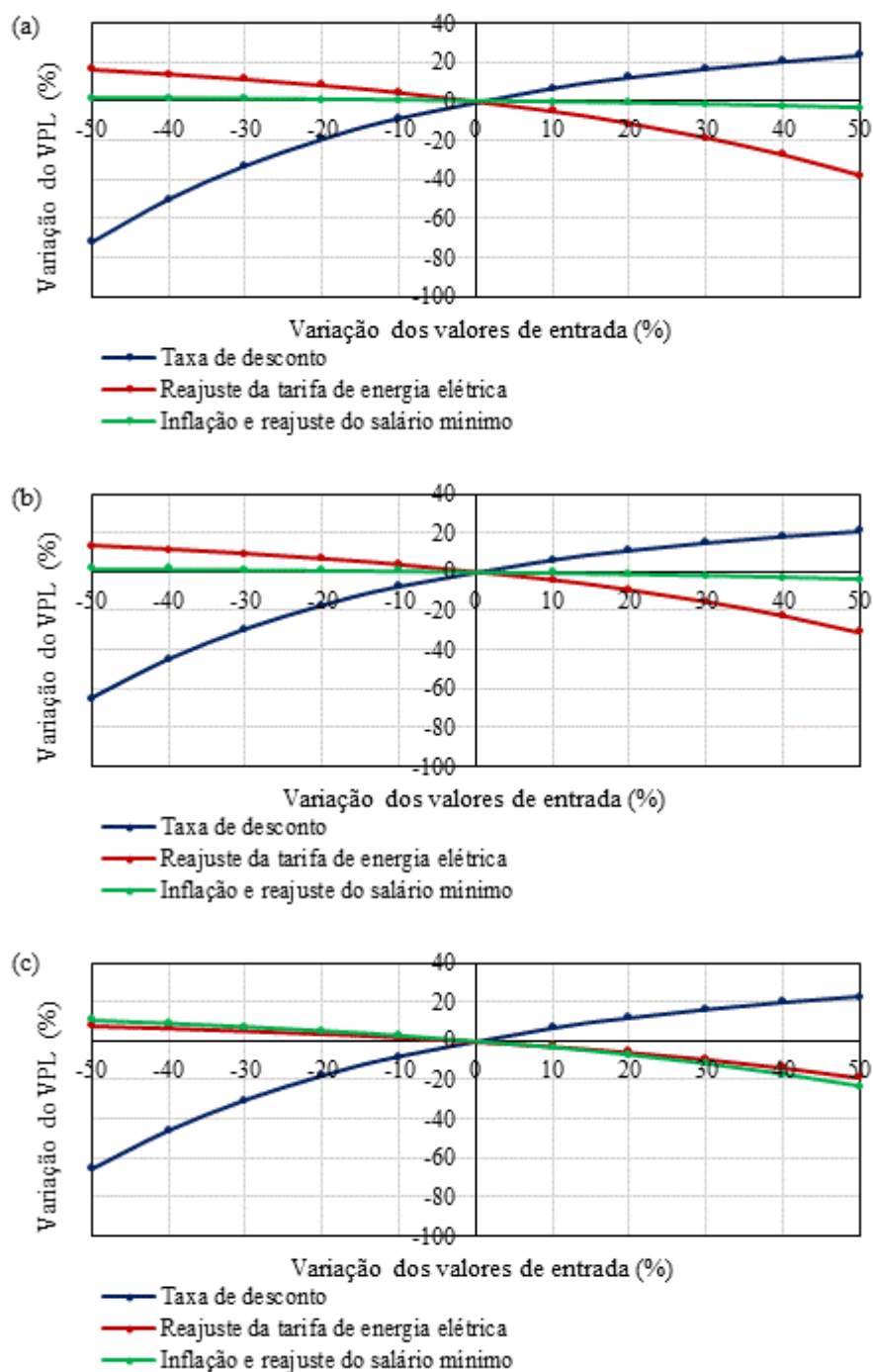


Figura 44 - Variação dos valores de entrada que influenciam o VPL das coberturas (a) convencional, (b) fria e (c) verde em Brasília

