

André Luís de Sá Matias

Simulação numérica do desempenho de sistemas de fachadas adaptativas com recurso ao EnergyPlus

Dissertação de Mestrado

Engenharia de Construção e Reabilitação

Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos F. De Almeida
Professor Doutor Eduardo Leite Krüger



RESUMO

Os sistemas de fachadas adaptativas são uma tecnologia inovadora que tem a capacidade de ajustar o seu desempenho em resposta a diferentes estímulos, tornando-os uma alternativa de elevado potencial na procura de soluções construtivas que compatibilizem a redução do consumo de energia nos edifícios com a melhoria do seu conforto interior.

No presente trabalho pretendeu-se realizar a avaliação das condições de conforto térmico no interior de uma Câmara Bioclimática de Baixo Custo (CBBC), localizada num campus da Universidade Tecnológica Federal do Paraná na cidade de Curitiba no Brasil e testar a eficácia de diferentes cenários de simulação em três diferentes regiões do território brasileiro utilizando estratégias de sombreamento com o objetivo de melhorar o conforto térmico desse edifício. Para tal, foi utilizado um programa de simulação térmica, o *DesignBuilder* aliado ao uso do *EnergyPlus*.

Inicialmente foi realizada a modelação do estudo de caso com base em informações de projetos desenvolvidos em estudos anteriores feitos para a concepção da CBBC, por Livia Trevisan. Em seguida, dimensionados os elementos de sombreamento e definidos os cenários e parâmetros de simulação, foram realizadas quatro simulações relativas ao estado atual da edificação e aos demais cenários estabelecidos.

A partir dos resultados das simulações, foi realizada uma análise geral do comportamento das temperaturas de cada cenário e de acordo com as estações do ano e uma avaliação do conforto térmico utilizando o modelo proposto pela EN 15251, constatando que o estudo de caso não apresenta níveis adequados de conforto térmico, manifestando longos períodos caracterizados por desconforto por frio para a cidade de Curitiba e longos períodos de desconforto por sobreaquecimento para a cidade de Picos.

De forma sintética, o estudo permitiu concluir que, para as condições apresentadas neste estudo de caso, o cenário que continha a solução de sombreamento com o conceito adaptativo/responsivo aplicado se mostrou a mais eficiente e proporcionou um maior aumento do conforto em relação às outras formas de aplicação estudadas.

ABSTRACT

Adaptive façade systems are an innovative technology that has the ability to adjust their performance in response to different stimuli, making them a high-potential alternative in the search for constructive solutions that make the reduction of energy consumption in buildings compatible with the improvement of their inner comfort.

The present work aimed to carry out the evaluation of thermal comfort conditions inside a Low Cost Bioclimatic Chamber (LCBC), located on a campus of the Federal Technological University of Paraná in the city of Curitiba, Brazil and to test the effectiveness of different scenarios for simulation in three different regions of the Brazilian territory using shading strategies in order to improve the thermal comfort of this building. For this purpose, a thermal simulation program, *DesignBuilder*, combined with the use of *EnergyPlus* was used.

Initially, the modeling of the case study was carried out based on information from projects developed in previous studies carried out for the conception of LCBC, by Livia Trevisan. Then, with the shading elements dimensioned and the simulation scenarios and parameters defined, four simulations were carried out regarding the current state of the building and the other established scenarios.

From the simulation results, a general analysis of the temperature behavior of each scenario and according to the seasons of the year and an evaluation of the thermal comfort was carried out using the model proposed by the European standard EN 15251, noting that the case study does not present adequate levels of thermal comfort, manifesting long periods characterized by discomfort due to cold for the city of Curitiba and long periods characterized by discomfort due to overheating for the city of Picos.

In summary, the study allowed us to conclude that, for the conditions presented in this case study, the scenario that contained the shading solution with the adaptive/responsive concept applied proved to be the most efficient and provided a greater increase in comfort compared to the others studied application forms.

PALAVRAS CHAVE

Fachadas adaptativas
Eficiência energética
Conforto térmico
Sombreamento
Sombreamento responsivo
Câmara climática
Desempenho térmico

KEY WORDS

Adaptive facades
Energy efficiency
Thermal comfort
Shading
Responsive shading
Climate chamber
Thermal Performance

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pela oportunidade de ter realizado esse mestrado e por todo esse ano incrível que se passou durante seu acontecimento.

Agradeço à minha família, principalmente aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado e que me proporcionaram todo o apoio e estrutura necessários para a realização desse trabalho. Eu não teria chegado até aqui sem vocês. Obrigado por tanto e por tudo.

Agradeço aos meus professores Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida, pela motivação e Doutor Eduardo Leite Krüger pelo apoio prestado, pela disponibilidade, tempo despendido, pela partilha de conhecimentos e sugestões ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Agradeço a todos os meus amigos e pessoas que me acompanharam ao longo do percurso acadêmico no Instituto Politécnico de Viseu, em especial àqueles da República Watermelon, que tornaram toda essa experiência mais leve, divertida e inesquecível.

Agradeço também especialmente à amiga Gabriele Zorzi da Silva por todo o apoio prestado, pela motivação, pelas sugestões sempre pertinentes e principalmente por sempre acreditar em mim, ao amigo Bruno Milaré Albuquerque, pelo tempo e apoio prestado e por muitas vezes me ajudar quando ninguém mais podia e à amiga Laura Eckert Foguesatto pela parceria do apoio mútuo prestado e por acreditar em mim.

Por último, mas não menos importante, agradeço à mim mesmo. Agradeço a mim por acreditar em mim mesmo, por todo o trabalho duro e todas as horas trabalhadas e por, apesar das dificuldades, não desistir.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
ÍNDICE DE TABELAS	xxii
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento geral	1
1.2 Objetivo do trabalho	2
1.3 Organização e estrutura do trabalho	2
2. Estado da arte.....	4
2.1 Fachadas adaptativas.....	4
2.1.1 Caracterização e classificação	4
2.2 Principais tecnologias (materiais e sistemas) de fachadas adaptativas.....	6
2.2.1 Janelas responsivas	6
2.2.2 Materiais de mudança de fase.....	7
2.2.3 Fachadas solares	10
2.2.4 Sistemas automatizados de controle térmico e lumínico.....	17
2.3 Sombreamento e fachadas adaptativas	20
3. Metodologia.....	22
3.1 Simulação térmica e energética	22
3.1.1 <i>EnergyPlus</i>	22
3.1.2 <i>DesignBuilder</i>	23
3.2 Estudo de caso	23
3.2.1 Localização e caracterização do edifício	23
3.2.2 Dados climáticos	25
3.2.3 Elementos Construtivos.....	27
3.3 Modelo de Simulação	30
3.3.1 Geometria	30
3.3.2 Dimensionamento dos elementos de sombreamento.....	31

3.4	Cenários de simulação.....	38
3.4.1	Considerações iniciais.....	38
3.4.2	Cenários de simulação estabelecidos.....	38
3.4.3	Parâmetros de simulação.....	38
3.5	Avaliação do conforto térmico.....	39
4.	Apresentação e discussão dos resultados.....	42
4.1	Considerações iniciais.....	42
4.2	Apresentação dos resultados.....	42
4.2.1	Simulação do cenário I.....	42
4.2.2	Simulação do cenário II.....	51
4.2.3	Simulação do cenário III.....	60
4.2.4	Simulação do cenário IV.....	69
4.3	Discussão dos resultados e avaliação em diferentes zonas climáticas.....	78
5.	Conclusões.....	87
5.1	Conclusões gerais.....	87
5.2	Desenvolvimentos futuros.....	88
	Referências.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Sequência de adaptações de um vidro laminado eletrocromico [7].....	7
Figura 2-2: Ilustração comparativa da intensidade da radiação solar [8]	7
Figura 2-3: Ilustração do deslocamento da carga de pico e redução da carga de pico. Adaptado de [9]	9
Figura 2-4: Diagrama esquemático da divisão das fachadas solares opacas. Adaptado de [16]	11
Figura 2-5: Diagrama esquemático de um sistema térmico solar integrado (BISP). Adaptado de [15]	11
Figura 2-6: Diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico integrado (BIPV). Adaptado de [15].....	12
Figura 2-7: Diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico térmico integrado (BIPV/T). Adaptado de [15].....	12
Figura 2-8: Diagrama esquemático de uma parede de armazenamento térmico. Adaptado de [15].....	13
Figura 2-9: Diagrama esquemático de uma chaminé solar. Adaptado de [15].....	14
Figura 2-10: Diagrama esquemático da divisão das fachadas solares transparentes e translúcidas. Adaptado de [16]	14
Figura 2-11: Diagrama esquemático de uma fachada mecanicamente ventilada (MVF). Adaptado de [16].....	15
Figura 2-12: Diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico integrado semitransparente (STBIPV). Adaptado de [16]	16
Figura 2-13: Diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico térmico integrado semitransparente (STBIPV/T). Adaptado de [16].....	16
Figura 2-14: Diagrama esquemático de uma fachada naturalmente ventilada (NVF). Adaptado de [16]	17
Figura 2-15: Fachada fotovoltaica cinética [20]	18
Figura 2-16: Superfície de transporte [21]	18
Figura 2-17: Janelas programáveis [22].....	19
Figura 2-18: Sistema de sombreamento externo [23]	20
Figura 3-1: Localização de Curitiba [32]	24
Figura 3-2: Câmaras bioclimáticas de baixo custo (ME à esquerda e MC à direita) [33]	24
Figura 3-3: Gráfico da temperatura média mensal de Curitiba [37]	26
Figura 3-4: Gráfico da temperatura média mensal de Brasília [36].....	26
Figura 3-5: Gráfico da temperatura média mensal de Picos [36]	27
Figura 3-6: Planta do módulo de controle [31]	28
Figura 3-7: Cortes do módulo de controle [31].....	28
Figura 3-8: Detalhamento da composição da parede [31]	29

Figura 3-9: Detalhamento da composição da cobertura [31]	29
Figura 3-10: Detalhamento da composição do piso [31].....	30
Figura 3-11: Vistas 3D da modelação da CBBC	31
Figura 3-12: Temperaturas até 21 de junho em Curitiba representadas em sua carta solar	32
Figura 3-13: Temperaturas após 21 de junho em Curitiba representadas em sua carta solar.....	32
Figura 3-14: Definição do ângulo alfa (α) para a cidade de Curitiba.....	33
Figura 3-15: Sombreamento gerado com o ângulo alfa (α) de 25°	34
Figura 3-16: Representação dos elementos de sombreamento projetados para a CBBC	35
Figura 3-17: Definição do ângulo alfa (α) para a cidade de Brasília.....	36
Figura 3-18: Sombreamento gerado com o ângulo alfa (α) de 40°	36
Figura 3-19: Definição do ângulo alfa (α) para a cidade de Picos	37
Figura 3-20: Sombreamento gerado com o ângulo alfa (α) de 60°	37
Figura 3-21: Zona de conforto para edifícios naturalmente ventilados, adaptado de [43]	40
Figura 4-1: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação I na cidade de Curitiba	43
Figura 4-2: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação I na cidade de Curitiba	43
Figura 4-3: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação I na cidade de Curitiba	44
Figura 4-4: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação I na cidade de Curitiba	44
Figura 4-5: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação I na cidade de Curitiba	45
Figura 4-6: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação I na cidade de Brasília.....	46
Figura 4-7: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação I na cidade de Brasília.....	46
Figura 4-8: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação I na cidade de Brasília.....	47
Figura 4-9: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação I na cidade de Brasília.....	47
Figura 4-10: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação I na cidade de Brasília	48
Figura 4-11: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação I na cidade de Picos	49
Figura 4-12: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação I na cidade de Picos	49
Figura 4-13: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação I na cidade de Picos	50
Figura 4-14: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação I na cidade de Picos.....	50

Figura 4-15: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação I na cidade de Picos.....	51
Figura 4-16: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação II na cidade de Curitiba	52
Figura 4-17: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação II na cidade de Curitiba	52
Figura 4-18: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação II na cidade de Curitiba	53
Figura 4-19: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação II na cidade de Curitiba	53
Figura 4-20: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação II na cidade de Curitiba.....	54
Figura 4-21: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação II na cidade de Brasília.....	55
Figura 4-22: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação II na cidade de Brasília.....	55
Figura 4-23: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação II na cidade de Brasília.....	56
Figura 4-24: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação II na cidade de Brasília.....	56
Figura 4-25: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação II na cidade de Brasília.....	57
Figura 4-26: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação II na cidade de Picos.....	58
Figura 4-27: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação II na cidade de Picos.....	58
Figura 4-28: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação II na cidade de Picos.....	59
Figura 4-29: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação II na cidade de Picos.....	59
Figura 4-30: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação II na cidade de Picos	60
Figura 4-31: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação III na cidade de Curitiba.....	61
Figura 4-32: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação III na cidade de Curitiba.....	61
Figura 4-33: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação III na cidade de Curitiba.....	62
Figura 4-34: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação III na cidade de Curitiba.....	62

Figura 4-35: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação III na cidade de Curitiba	63
Figura 4-36: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação III na cidade de Brasília	64
Figura 4-37: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação III na cidade de Brasília	64
Figura 4-38: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação III na cidade de Brasília	65
Figura 4-39: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação III na cidade de Brasília	65
Figura 4-40: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação III na cidade de Brasília.....	66
Figura 4-41: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação III na cidade de Picos.....	67
Figura 4-42: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação III na cidade de Picos.....	67
Figura 4-43: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação III na cidade de Picos.....	68
Figura 4-44: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação III na cidade de Picos.....	68
Figura 4-45: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação III na cidade de Picos.....	69
Figura 4-46: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação IV na cidade de Curitiba	70
Figura 4-47: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação IV na cidade de Curitiba	70
Figura 4-48: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação IV na cidade de Curitiba	71
Figura 4-49: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação IV na cidade de Curitiba	71
Figura 4-50: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação IV na cidade de Curitiba.....	72
Figura 4-51: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação IV na cidade de Brasília.....	73
Figura 4-52: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação IV na cidade de Brasília.....	73
Figura 4-53: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação IV na cidade de Brasília.....	74
Figura 4-54: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação IV na cidade de Brasília.....	75

Figura 4-55: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação IV na cidade de Brasília.....	75
Figura 4-56: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação IV na cidade de Picos	76
Figura 4-57: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação IV na cidade de Picos	76
Figura 4-58: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação IV na cidade de Picos	77
Figura 4-59: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação IV na cidade de Picos	77
Figura 4-60: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação IV na cidade de Picos.....	78
Figura 4-61: Temperaturas internas médias ao longo do ano dos cenários de simulação analisados na cidade de Curitiba.....	79
Figura 4-62: Temperaturas internas médias ao longo do ano dos cenários de simulação analisados na cidade de Brasília.....	79
Figura 4-63: Temperaturas internas médias ao longo do ano dos cenários de simulação analisados na cidade de Picos	80
Figura 4-64: Variação das temperaturas internas do ar no verão durante o período diurno dos cenários de simulação analisados para a cidade de Curitiba.....	80
Figura 4-65: Variação das temperaturas internas do ar no verão durante o período diurno dos cenários de simulação analisados para a cidade de Brasília	81
Figura 4-66: Variação das temperaturas internas do ar no verão durante o período diurno dos cenários de simulação analisados para a cidade de Picos	81
Figura 4-67: Variação das temperaturas internas do ar no inverno durante o período diurno dos cenários de simulação analisados para a cidade de Curitiba	82
Figura 4-68: Variação das temperaturas internas do ar no inverno durante o período diurno dos cenários de simulação analisados para a cidade de Brasília.....	82
Figura 4-69: Variação das temperaturas internas do ar no inverno durante o período diurno dos cenários de simulação analisados para a cidade de Picos.....	83
Figura 4-70: Porcentagem de períodos de conforto e desconforto segundo a EN 15251 ao longo do ano para os cenários de simulação analisados na cidade de Curitiba	84
Figura 4-71: Porcentagem de períodos de conforto e desconforto segundo a EN 15251 ao longo do ano para os cenários de simulação analisados na cidade de Brasília.....	84
Figura 4-72: Porcentagem de períodos de conforto e desconforto segundo a EN 15251 ao longo do ano para os cenários de simulação analisados na cidade de Picos.....	85

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1: Visão geral dos conceitos de caracterização de envelopes adaptativos. Adaptado de [3]	5
Tabela 3-1: Propriedades dos materiais da envoltória, adaptado de [31]	30
Tabela 3-2: Resumo do dimensionamento dos elementos de sombreamento.....	38
Tabela 4-1: síntese das porcentagens de períodos de conforto e desconforto segundo a EN 15251 ao longo do ano para os cenários de simulação analisados.....	86

1. Introdução

1.1 Enquadramento geral

Os sistemas de fachadas adaptativas são uma tecnologia inovadora que tem a capacidade de ajustar o seu desempenho em resposta a diferentes estímulos, tornando-os uma alternativa de elevado potencial na procura de soluções construtivas que compatibilizem a redução do consumo de energia nos edifícios com a melhoria do seu conforto interior.

Reduções no consumo de energia em edifícios e nas emissões de dióxido de carbono são dois grandes desafios encontrados pela indústria da construção. Estes devem ser tratados sem comprometer o conforto e bem-estar dos ocupantes e de maneira mais econômica possível.

A regulamentação atual no domínio da eficiência energética dos edifícios aponta no sentido de altos níveis de isolamento térmico e limitação da estanqueidade ao ar [1]. No entanto, em climas amenos, e mesmo em climas frios devido, principalmente, às mudanças climáticas, esta abordagem pode, levar a problemas de desconforto, uma vez que, durante o ano, ocorrem vários períodos nos quais um elevado fluxo de calor vindo do exterior, através da envolvente, seria benéfico. A combinação de ganhos solares e aquecimento interno com a incapacidade do sistema de liberar o calor pode, de fato, levar ao sobreaquecimento dos edifícios, condicionando o conforto térmico interior e/ou exigindo necessidades elevadas de arrefecimento.

A fachada é o principal parâmetro que influencia no desempenho energético dos edifícios [2], dependendo do tipo de edificação e em quais locais e climas estas estão inseridas. Por isso, seus elementos precisam ser projetados para fornecer aos edifícios a flexibilidade necessária em termos de fluxo de energia e conforto. Pensando nisso, para atingir os níveis desejados de eficiência e funcionalidade, a fachada precisa mudar ou se adaptar. Portanto, a adoção de

fachadas adaptativas proporciona oportunidades para reduções significativas no uso de energia e emissões de dióxido de carbono, garantindo uma melhor eficiência energética e conforto dos ocupantes.

1.2 Objetivo do trabalho

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a eficiência energética e as condições de conforto térmico no interior de um edifício, em função da temperatura e verificar o desempenho de um sistema de sombreamento adaptativo em três regiões distintas do Brasil (Sul, Centro-Oeste e Nordeste) a fim de medir a melhora do desempenho do edifício em termos energético e de conforto. Para isso foram estabelecidos objetivos específicos para conduzir o trabalho ao destino proposto. Estes são:

- Avaliar o desempenho térmico e energético do edifício em seu estado atual através de simulações computacionais;
- Dimensionar elementos de sombreamento para o edifício utilizado como estudo de caso e comparar o desempenho dos estado atual com um sistema de fachada adaptativa, no caso, o sombreamento responsivo, também com recurso a simulações computacionais.

1.3 Organização e estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em 5 capítulos distintos:

- No capítulo 1 é feita a apresentação do trabalho desenvolvido, mostrando o enquadramento geral do tema e os principais objetivos a serem alcançados;
- No capítulo 2 apresentam-se as noções base que suportam o trabalho desenvolvido, tais como: uma descrição de fachadas adaptativas, suas formas de caracterização e classificação e as principais tecnologias de fachadas adaptativas.
- No capítulo 3, são apresentados os softwares utilizados para modelação e simulação e uma explicação geral sobre simulações térmicas e energéticas. Em seguida, é realizada a apresentação do estudo de caso e a caracterização do edifício. Por fim, são descritos o dimensionamento dos elementos de sombreamento definidos para o estudo, bem como os cenários e parâmetros utilizados para a modelação, simulação e avaliação do edifício com a tecnologia de fachada adaptativa descrita nesse trabalho;
- No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados e análises das simulações realizadas no trabalho, sendo estas a do estudo de caso em seu cenário atual e as demais com o uso das estratégias de sombreamento com condições próprias de aplicação individualmente estabelecidas.

- No capítulo 5, apresentam-se as principais conclusões realizadas a partir do presente trabalho, assim como algumas considerações para eventuais trabalhos futuros.

2. Estado da arte

2.1 Fachadas adaptativas

Fachadas adaptativas consistem em sistemas multifuncionais altamente adaptativos, onde o separador físico entre o ambiente interior e exterior, ou seja, a envolvente do edifício, é capaz de alterar suas funções, características ou comportamento ao longo do tempo em resposta aos requisitos de desempenho transitórios e condições limites, com o objetivo de melhorar o desempenho geral do edifício [3].

As fachadas adaptativas devem fornecer uma resposta adequada às mudanças dos ambientes internos e externos para garantir ou melhorar os requisitos funcionais dos envelopes em termos de calor, fluxo de ar e vapor de água, penetração de chuva, radiação solar, ruído, fogo, força e estabilidade e estética. Portanto, fachadas adaptativas multifuncionais devem ser capazes de responder repetidamente e reversivelmente ao longo do tempo para mudanças nos requisitos de desempenho e mudanças nas condições de contorno. Em outras palavras, as fachadas adaptativas seriam capazes de fornecer isolamento e massa térmica ajustáveis, troca de calor radiante, ventilação, captação de energia, iluminação natural, proteção solar ou controle de umidade [2].

2.1.1 Caracterização e classificação

O desempenho da envolvente do edifício por si só é complexo, porém ao introduzir o conceito de adaptabilidade passamos para outro patamar de complexibilidade e, portanto, uma concordância entre os princípios e conceitos que devem ser considerados se torna crucial. Pode-se resumir sete conceitos básicos que permitem descrever completamente qualquer exemplo de envelope adaptativo [3].

Tabela 2-1: Visão geral dos conceitos de caracterização de envelopes adaptativos. Adaptado de [3]

Objetivo	Função responsiva	Forma de operação	Componentes (Materiais e sistemas)	Tempo de resposta	Escala espacial	Visibilidade	Grau de adaptabilidade
Conforto térmico	Prevenir	Intrínseco	Sombreamento	Segundos	Material	Não	On-off
Desempenho energético			Isolamento	Minutos	Elemento da fachada		
Qualidade do ar interno	Rejeitar	Extrínseco	Janelas responsivas	Horas	Parede	Baixo	Gradual
Desempenho visual	Modular		Materiais de mudança de fase	Dias	Janela		
Desempenho acústico	Controlar		Tubos solares	Estações	Telhado		
Controle personalizado			Sistema solar integrado	Anos	Edifício inteiro	Alto	

Segundo Loonen et al. (2015) [3], a caracterização de uma fachada adaptativa se inicia pela identificação dos objetivos/finalidades que esta pode cumprir. Tais objetivos podem ser expressos através do uso de indicadores de desempenho e muitas vezes são baseados em códigos ou normas de desempenho de construção. Associados a esses objetivos, estão as funções responsivas dessas fachadas. Dependendo do domínio físico, a fonte de energia pode ser administrada de forma controlável. A prevenção visa reduzir a transferência de energia através da envolvente criando algum tipo de barreira, enquanto a admissão permite e a rejeição evita. ‘Coleção- Conversão-Modulação-Armazenamento-Distribuição’ refere-se a um modelo de gestão de energia em que a energia pode ser acumulada e distribuída no momento e na direção apropriados de acordo com as condições ambientais.

A classificação dos meios que os componentes da fachada adaptativa são controlados/operam são divididos em dois tipos: Controle intrínseco, que implica num auto-ajuste, acionado automaticamente através de estímulos ambientais e permitindo operação e manutenção de baixo custo. E o controle extrínseco, que implica na coleta e processamento de informações e depois em ações a serem tomadas.

O tempo de resposta diz respeito sobre a escala de tempo que as ações da fachada adaptativa efetivamente ocorrem, já a escala espacial se refere ao tamanho do sistema de fachada. Na menor escala, a mudança ocorre no que diz respeito à estrutura do material de construção, resultando numa mudança de propriedades termofísicas ou ópticas. Essa escala varia desde a mudança no material de construção até todo o nível do edifício, onde a aparência do próprio edifício é alterada ou seus elementos principais são reorganizados.

A visibilidade de adaptação afeta a aparência da arquitetura e, por último, o grau de adaptabilidade expressa em que medida o envelope pode acomodar as mudanças das condições limite. O tipo de operação “On-Off” permite um grau de adaptabilidade baixo, já quando falamos sobre adaptação gradual, é necessário definir uma faixa de valores que o elemento pode fornecer para uma determinada função/propriedade. A amplitude e os passos dessa faixa definirão o grau de adaptabilidade. Outro fator que interfere no grau de adaptabilidade é a escala espacial, uma vez que o tamanho do componente do edifício gera diferentes desempenhos de acordo com as diferentes posições do envelope.

Segundo Brzezicki et al. (2018) [4], a classificação das fachadas adaptativas pode ser dividida em três principais grupos:

- **Materiais:** Podem estar em diferentes estados de refinamento, seja ele bruto, extrudado ou revestido. Alguns exemplos são os materiais de mudança de fase e vidros eletrocromicos.
- **Componentes:** Pode ser definido como um conjunto de elementos. Forma uma unidade completa de parte da fachada. Como por exemplo, o uso de materiais de mudança de fase em combinação com vidros dinâmicos.
- **Sistema de fachada:** Um sistema de fachada é composto por diferentes componentes estruturais ou técnicos. Ele cumpre todas as funções técnicas básicas de fachada, como isolamento e proteção contra chuva e vento.

2.2 Principais tecnologias (materiais e sistemas) de fachadas adaptativas

Fachadas adaptativas, seus componentes e materiais são tecnologias bastante promissoras para melhorar o desempenho energético e ambiental do edifício. A caracterização e análise de seus comportamentos termo físico e óptico são imprescindíveis a fim de se aumentar a eficácia desses sistemas e promover tanto seu desenvolvimento quanto sua implementação [5].

Pensando nisso, foram escolhidas quatro tecnologias para se estudar nesse trabalho, sendo elas: janelas responsivas, materiais de mudança de fase (PCM - Phase Change Material), fachadas solares e um apanhado geral sobre sistemas automatizados de controle térmico e lumínico.

2.2.1 Janelas responsivas

Janelas responsivas possuem a capacidade de modular a admissão de entrada de luz natural e ganhos solares nos espaços internos. Controlando a transmissão solar e reflexão/absorção dos sistemas de fenestração, esta tecnologia visa melhorar o ambiente interno em termos de conforto visuais (utilização da luz natural, desconforto causado por luzes muito fortes, vistas para o exterior) e térmicos (aquecimento excessivo no verão) [6].

Diferentes materiais e sistemas são utilizados para modular as propriedades termo-ópticas de janelas responsivas, incluindo materiais crômicos (compostos de metal de película fina), cristais líquidos e partículas suspensas. Segundo [6], as principais diferenças entre os vários tipos de janelas responsivas podem ser resumidas com os seguintes recursos:

- **Mecanismo de controle:** Se trata das formas de operação citadas anteriormente, ou seja, de modo extrínseco, utilizando um sinal externo (dispositivos eletrocromicos - que são aqueles capazes de alterar suas propriedades ópticas reversivelmente se um potencial externo for aplicado, associado aos processos de inserção e extração de íons [7] - e de cristal líquido) ou de modo intrínseco, quando o material possui comportamentos adaptativos em função de algum parâmetro, seja ele a temperatura (termocrômica, termotrópica) ou a luz incidente (fotoeletrocromica, fotovoltacrômica).

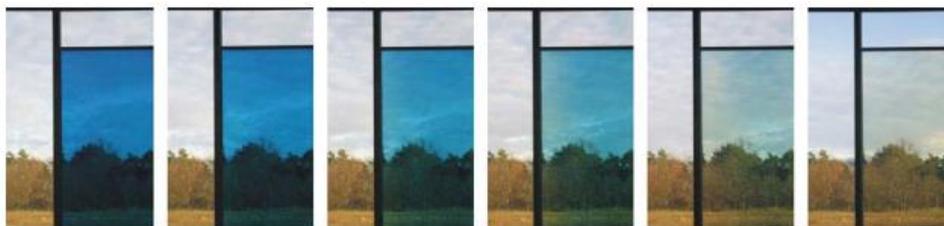


Figura 2-1: Sequência de adaptações de um vidro laminado electrocrômico [7]

- Faixa de comprimento de onda: Janelas responsivas são capazes de modular suas propriedades termo-ópticas em todo o espectro solar, ou apenas na parte visível, não visível ou independentemente em ambas as partes do espectro solar [8] (Figura 2-2).

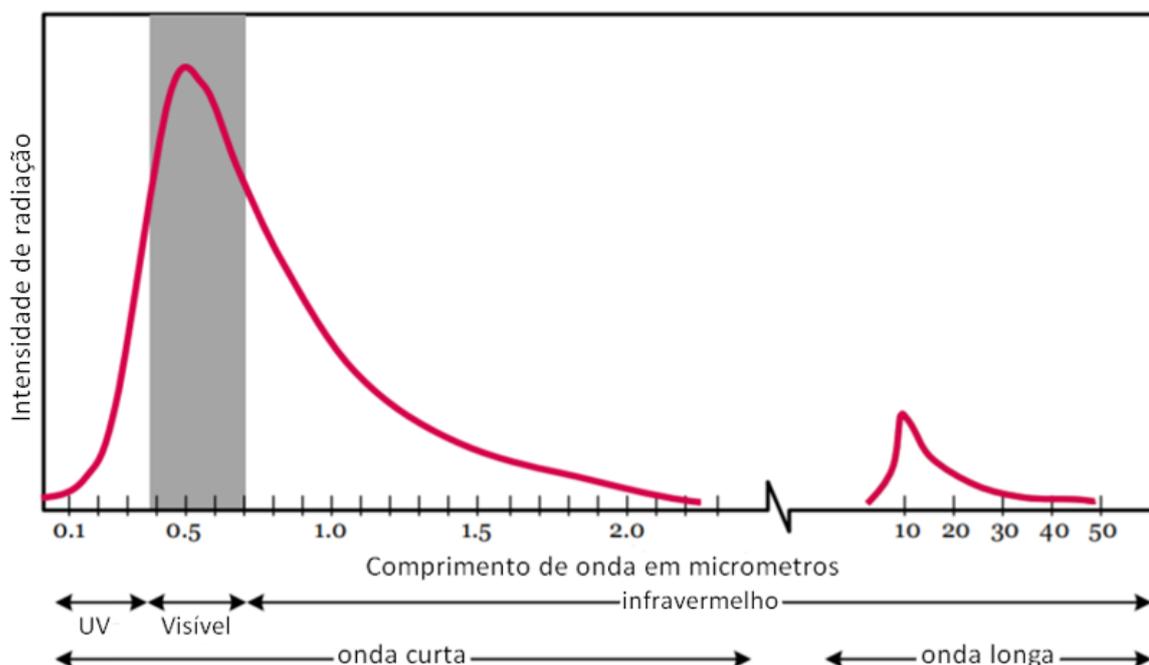


Figura 2-2: Ilustração comparativa da intensidade da radiação solar [8]

- Propriedades ópticas: A fim de modular o nível de transparência do vidro, a radiação solar remanescente pode tanto ser refletida para o exterior quanto absorvida. Dependendo da variação do índice de refração dos materiais embutidos na camada funcional, o vidro responsivo poderia ter um comportamento difusivo quando ativado (como os dispositivos termotrópicos) ao invés de manter o estado especular, contribuindo para reduzir o risco de clarões advindos da radiação solar direta e para distribuir a luz de forma mais uniforme no espaço interno.

2.2.2 Materiais de mudança de fase

Os materiais de mudança de fase (PCM – Phase Change Materials) funcionam de forma que quando há um aumento de temperatura, ocorrem reações químicas que resultam na absorção de calor pelo material, em um processo endotérmico, onde este muda do estado sólido para o

líquido. Já, quando a temperatura cai, o material libera energia de forma que este retorna ao estado sólido. Uma vez que a temperatura de mudança de fase do material é em torno da temperatura de conforto desejada para o ambiente, a energia utilizada para alterar o estado físico do material levará a uma temperatura interna mais estável e confortável aos ocupantes, além de reduzir os picos de carga de resfriamento e aquecimento [9].

A principal diferença entre os materiais de construção convencionais e os materiais de mudança de fase é sua propriedade de armazenar energia térmica em uma forma latente, resultando em uma maior capacidade de armazenar calor por unidade de volume em relação aos materiais convencionais [10].

Com base em sua composição química, os materiais de mudança de fase podem ser divididos em três grupos: compostos orgânicos, compostos inorgânicos e eutéticos orgânicos ou misturas eutéticas. Estes são diferenciados por seus típicos intervalos de temperatura de fusão e de entalpia de fusão [10].

Abaixo estão resumidamente listadas algumas propriedades desejadas que se deve exigir dos materiais de mudança de fase [11]:

- Alto calor de fusão por unidade de volume e peso unitário, além de alto calor específico, a fim de potencializar o efeito de armazenamento de calor latente utilizando o menor volume possível de PCMs.
- Temperatura de mudança de fase adequadamente combinada ao tipo, temperatura e local de aplicação do material.
- Baixa pressão de vapor na temperatura de operação.
- Estabilidade química e baixa taxa de corrosão, a fim de evitar comportamentos indesejáveis/imprevisíveis e aumentar a vida útil do material e sistema.
- Não ser nocivo ou tóxico, nem emitir substâncias perigosas na queima ou em sua produção, a fim de preservar a segurança do ocupante e a conservação do meio ambiente.
- Cristalização reproduzível sem degradação. Aliada à estabilidade química, busca alcançar uma vida útil longa para o material ao reproduzir cristais em suas milhares mudanças de fase ao longo de seu período de utilização.
- Temperatura de mudança de fase previsível e exata, a fim de ajustar corretamente sua aplicação.
- Pequena variação volumétrica durante a solidificação, permitindo uma maior quantidade de material de mudança de fase dentro de um material de encapsulamento.
- Alta condutividade térmica, permitindo que o calor se disperse mais rapidamente do material e assim absorver ou liberar calor em uma taxa maior.

- Usar materiais facilmente encontrados e baratos, tornando a tecnologia mais atrativa e de utilização viável em larga escala.

Na construção civil o uso dos materiais de mudança de fase pode ser dividido em quatro categorias [12]:

- Arrefecimento ‘grátis’, onde, aproveitando da capacidade de armazenamento de calor latente dos materiais de mudança de fase, são utilizados para arrefecimento durante o dia, quando as temperaturas são maiores. Esse sistema funciona desde que a temperatura ambiente permita que o material congele e derreta durante o dia, ou seja, a temperatura ambiente deve estar acima da mudança de fase durante o dia e abaixo durante a noite [13].
- Mudança do pico e da carga de pico, onde, utilizando materiais de mudança de fase, se pode alterar o pico de carga para longe dos horários de pico da demanda elétrica, assim diminuindo a pressão na rede elétrica e a necessidade de instalações elétricas tão robustas. A Figura 2-3 ilustra como o pico pode ser tanto reduzido quanto mudado pelo uso de materiais de mudança de fase.

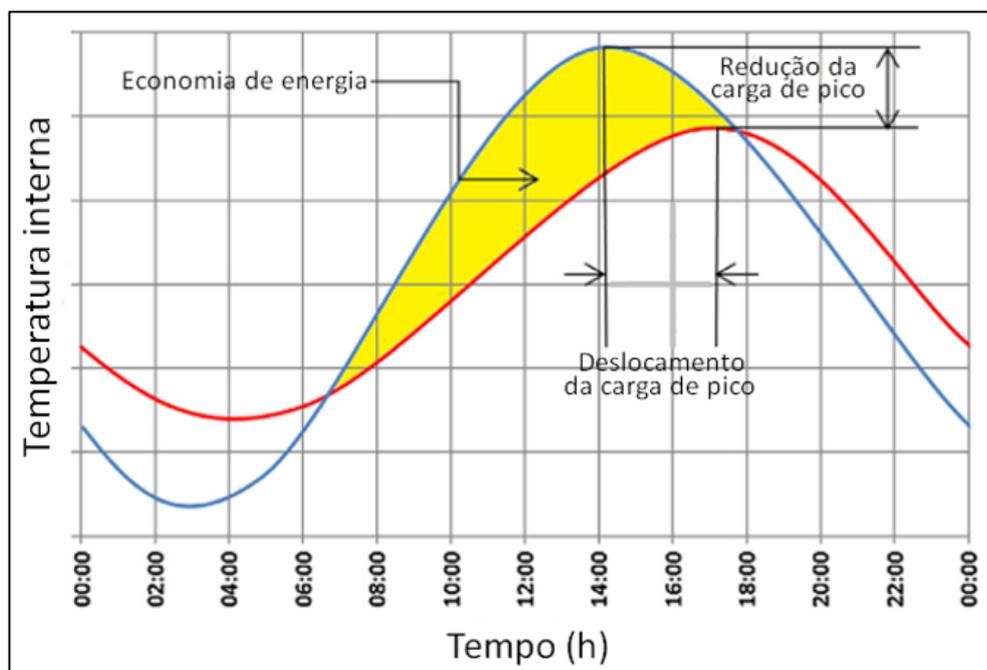


Figura 2-3: Ilustração do deslocamento da carga de pico e redução da carga de pico. Adaptado de [9]

- Sistemas de construção ativo, onde a capacidade de armazenamento dos materiais de mudança de fase pode ser integrada em sistemas de bomba de calor solar, sistemas de recuperação de calor e sistemas de aquecimento de piso. Além disso, combinados podem atingir uma redução de carga de pico e até economia por meio da redução da demanda elétrica para sistemas AVAC.

- Sistemas de construção passivos, onde os materiais de mudança de fase são integrados na envoltória do edifício a fim de aumentar a massa térmica deste. Esse tipo de uso é o mais comum, podendo ser integrado a paredes, pisos, tetos, janelas e venezianas, concreto e materiais de isolamento térmico.

Além das possibilidades de uso mencionadas, também se destaca uma quinta categoria muito importante segundo [9], que se trata da utilização de materiais de mudança de fase no controle do conforto térmico do edifício, selecionando aqueles com pontos de derretimento e congelamento desejáveis a fim de estabilizar a temperatura em torno da temperatura de conforto desejada, gerando assim redução de sensações de desconforto térmico devido à flutuações de temperatura ao longo do dia, redução da temperatura de pico e a uma maior uniformização entre as temperaturas do ar e as superfícies, reduzindo assim o desconforto térmico por meio do calor radiativo.

2.2.3 Fachadas solares

Como já dito anteriormente, fachadas são elementos chaves quando se trata da iluminação natural, temperatura dos ambientes internos e utilização e controle da energia solar. Portanto, quando se fala de fachadas solares, são aquelas projetadas especificamente para rejeitar ou absorver e reutilizar o calor solar [14].

Do ponto de vista da engenharia e do projeto de edifícios, a fachada de um edifício pode ser dividida em duas partes: sólidos e vazios. A parte sólida se refere a estruturas espessas, pesadas, estáveis e elementos visualmente não transparentes, como paredes sólidas. Já a parte vazia diz respeito àqueles elementos leves e visualmente transparentes, como o vidro e portas e janelas. Cada uma dessas partes exige diferentes tratamentos ao se considerar isolamento acústico, iluminação, luz solar, fluxo de ar, entre outros. Portanto, com base nessas duas partes, as fachadas solares são classificadas em dois tipos: fachadas solares opacas e fachadas solares transparentes ou semitransparentes (translúcidas) [14].

As fachadas solares opacas absorvem e refletem a radiação solar incidente, mas são incapazes de transferir diretamente para o edifício o ganho de calor solar [15]. Conforme mostra a Figura 2-4, fachadas solares opacas são divididas em ativas e passivas. Ativas são aquelas que transformam a luz solar incidente em eletricidade para consumo imediato ou para transmitir a energia térmica pelo edifício através de equipamentos elétricos ou mecânicos, como bombas, ventiladores, válvulas e equipamentos de controle. Já as passivas são aquelas que não necessitam de equipamentos para obter esse mesmo objetivo [15].

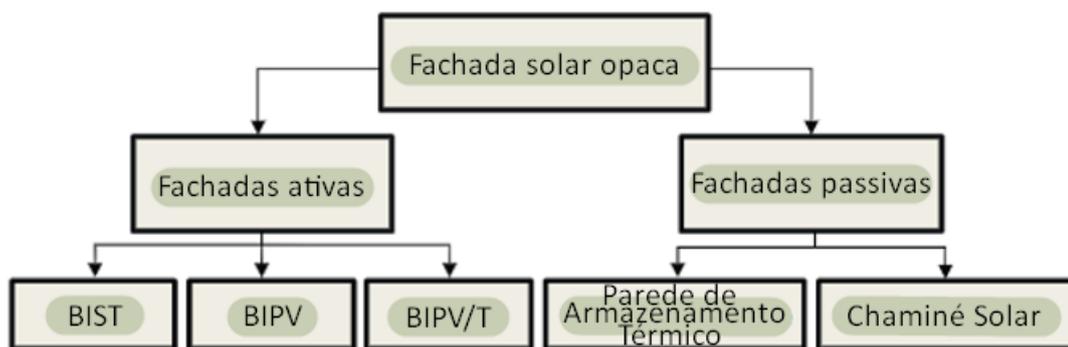


Figura 2-4: Diagrama esquemático da divisão das fachadas solares opacas. Adaptado de [16]

Os sistemas que consistem as fachadas solares opacas ativas são:

- Sistema térmico solar integrado (BIST – building-integrated solar thermal system), que são aqueles que desempenham simultaneamente a função de envelope e a função de coleta da energia solar, através de algum equipamento, para fins de aquecimento (Figura 2-5).

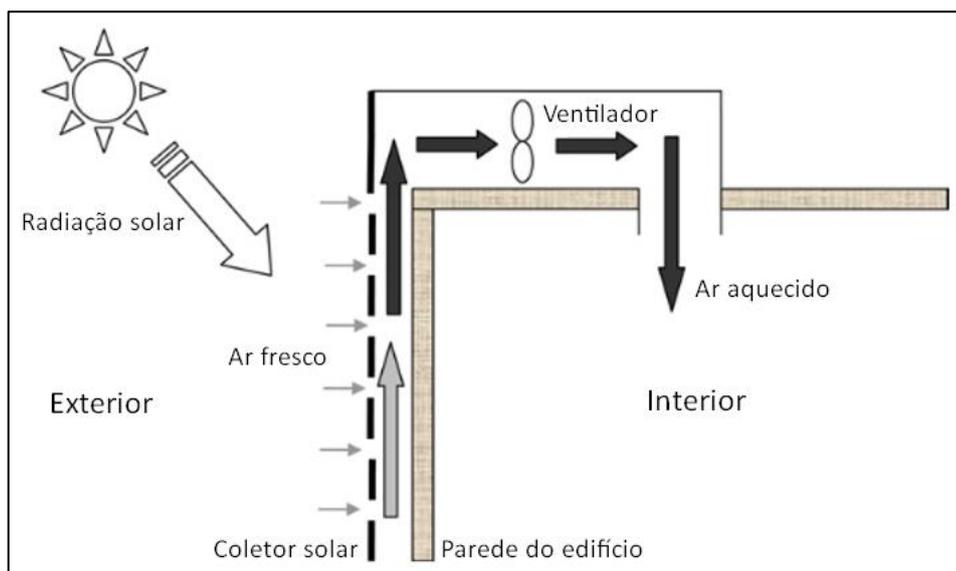


Figura 2-5: Diagrama esquemático de um sistema térmico solar integrado (BISP). Adaptado de [15]

- Sistema fotovoltaico integrado (BIPV – building-integrated photovoltaic system), que pode ser definido como células fotovoltaicas que podem ser integradas na envoltória do edifício como parte da estrutura do próprio edifício, substituindo materiais de construção convencionais ao invés de serem instalados posteriormente [17]. Ilustrada pela Figura 2-6, uma característica interessante desse sistema é que o fluxo de ar atrás das células solares reduz sua temperatura, aumentando sua eficiência e vida útil.

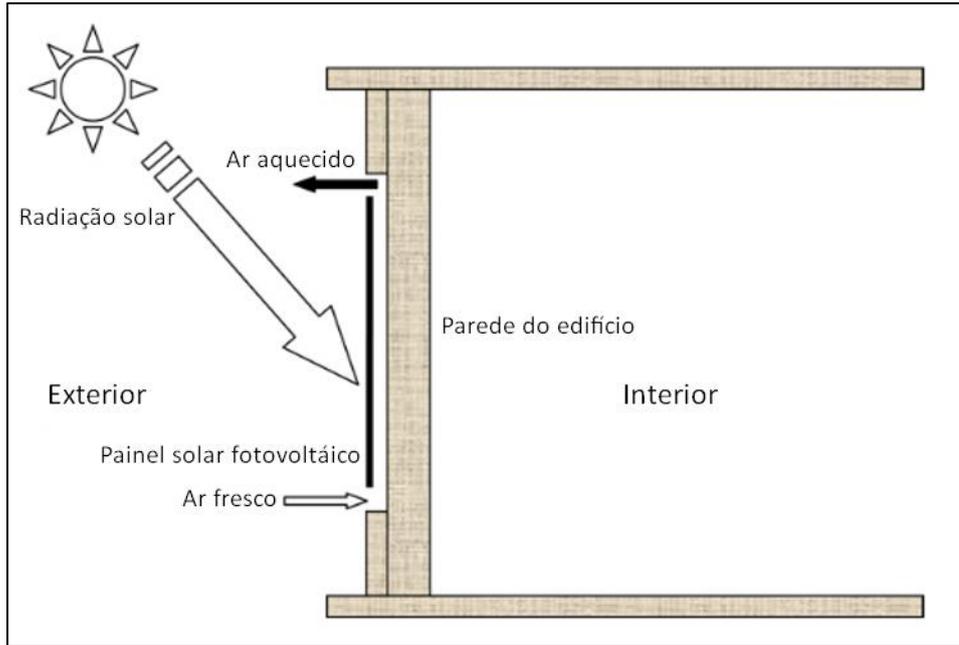


Figura 2-6: Diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico integrado (BIPV). Adaptado de [15]

- Sistema fotovoltaico térmico integrado (BIPV/T – building-integrated photovoltaic thermal system), são aqueles que combinam as funções dos outros dois sistemas, BISP e BIPV, buscando atingir uma maior eficiência na coleta de energia solar tanto em termos de conversão elétrica, quanto de aquecimento de ar e água. A Figura 2-7 exemplifica esse tipo de sistema.

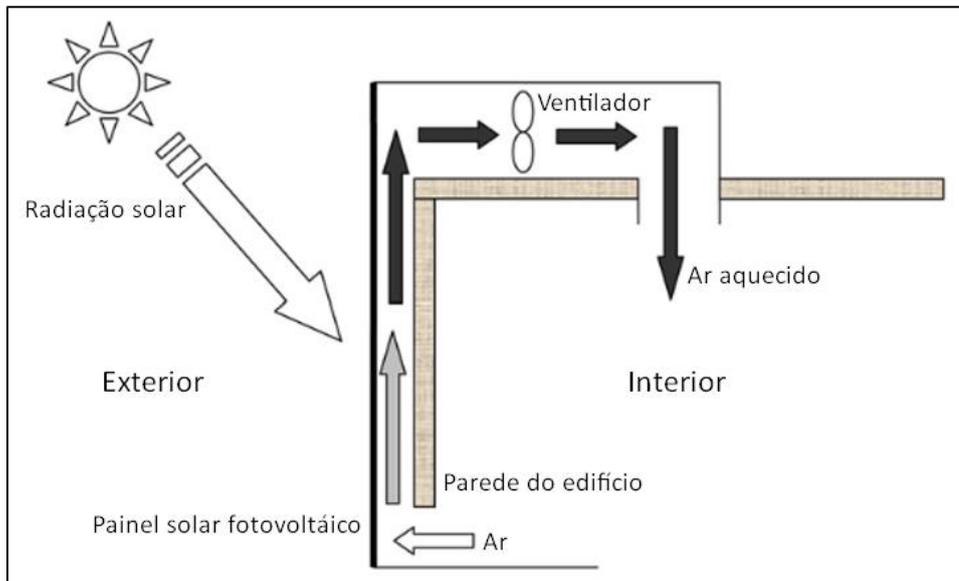


Figura 2-7: Diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico térmico integrado (BIPV/T). Adaptado de [15]

Passando para as fachadas solares opacas passivas, são constituídas por:

- Paredes de armazenamento térmico (Thermal storage), que combinam a função de coletor e armazenamento de energia solar em uma única unidade. Funcionam de forma que o calor é transferido da parede para o ar do cômodo e do ar entre o vidro e a parede, por radiação e convecção natural (Figura 2-8). Uma de suas principais funções é reduzir a oscilação de temperatura interna.

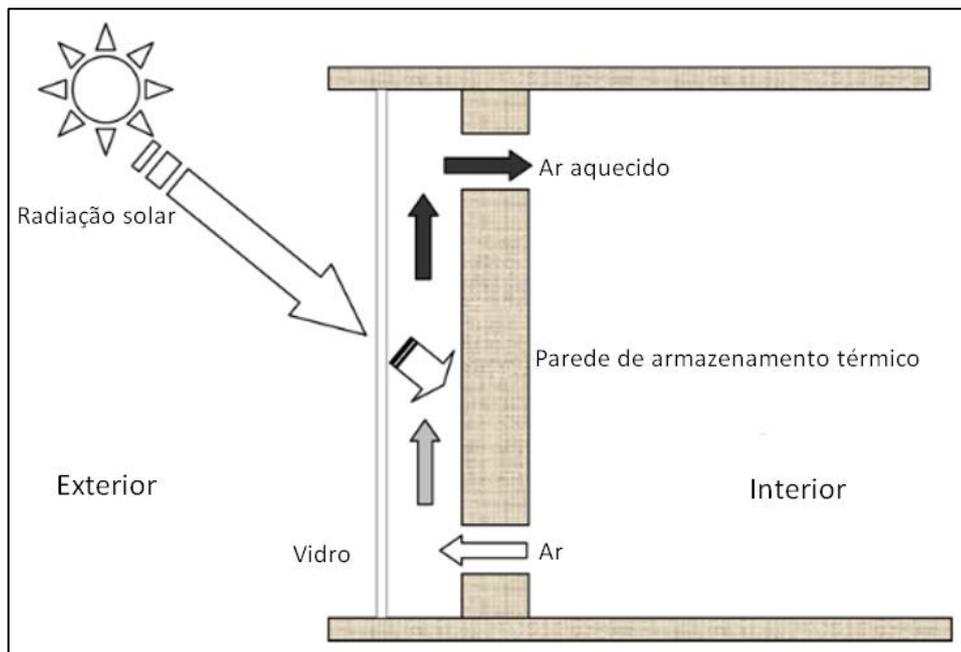


Figura 2-8: Diagrama esquemático de uma parede de armazenamento térmico. Adaptado de [15]

- Chaminé solar (Solar chimney), uma estrutura que consiste principalmente numa superfície vítrea absorvente de calor que é aplicada na parede que fica direcionada para o sol. Quando a energia solar aquece a chaminé e o ar dentro dele, é produzida uma corrente de ar ascendente na chaminé, onde a aspiração natural criada na base da chaminé pode ser usada para ventilar o edifício (Figura 2-9).

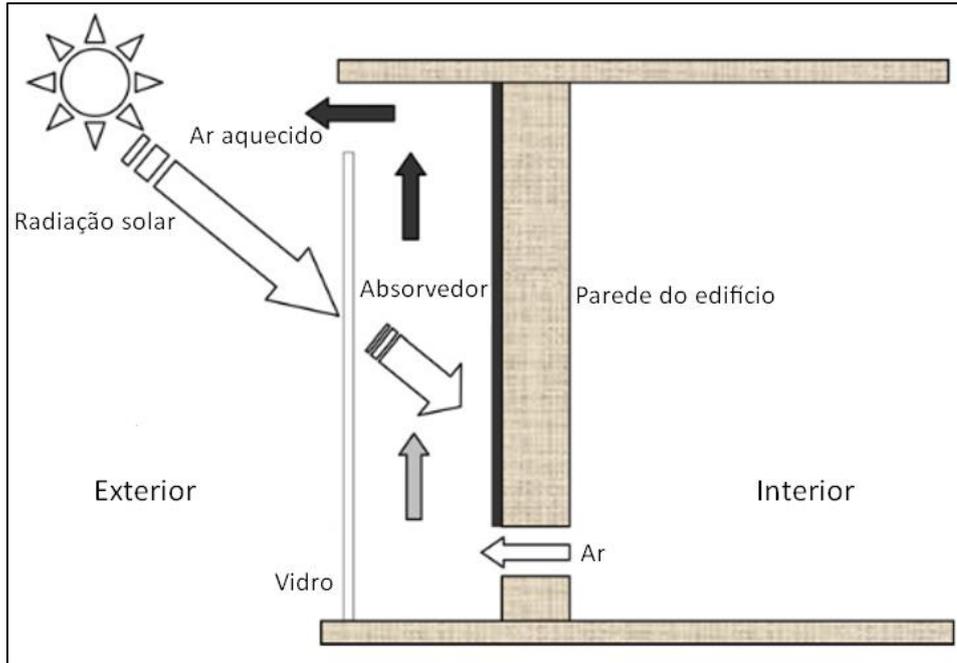


Figura 2-9: Diagrama esquemático de uma chaminé solar. Adaptado de [15]

Se tratando das fachadas solares transparentes ou semitransparentes (translúcidas) são aquelas que além de absorver e refletir a radiação solar incidente, são também capazes de transferir diretamente para o edifício o ganho de calor solar [16]. Assim como as fachadas solares opacas, as transparentes também são divididas em ativas e passivas, sendo que se estas transformam parte da luz solar incidente diretamente em eletricidade ou transmitindo a energia térmica para o edifício através de equipamentos elétricos ou mecânicos, como bombas, ventiladores, válvulas e equipamentos de controle, podem ser chamadas de fachadas solares transparentes e translúcidas ativas. Já as passivas são aquelas que não necessitam de equipamentos para obter esse mesmo objetivo [16]. A Figura 2-10 ilustra melhor essa divisão.

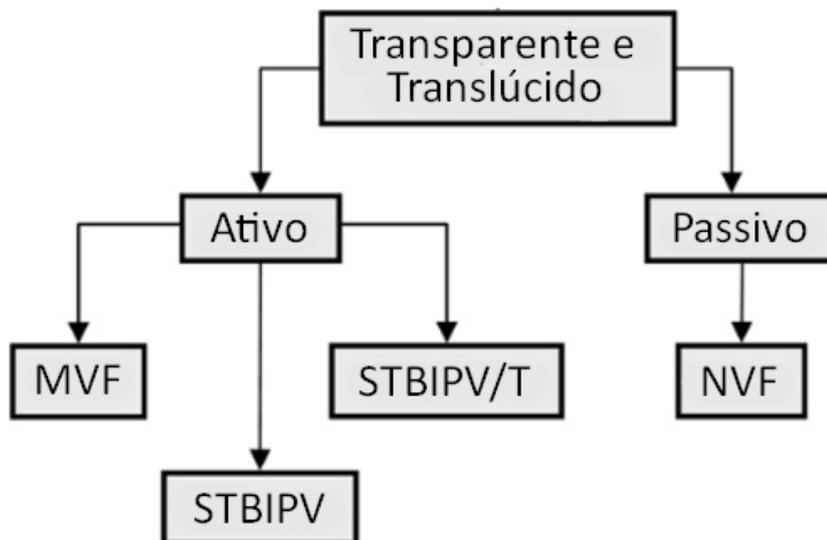


Figura 2-10: Diagrama esquemático da divisão das fachadas solares transparentes e translúcidas. Adaptado de [16]

Os sistemas que consistem as fachadas solares transparentes ou translúcidas ativas são:

- Fachada mecanicamente ventilada (MVF – Mechanically ventilated facade), que usa um sistema de ventilação assistida para fornecer, expelir ou recircular através de um canal localizado entre duas superfícies transparentes ou translúcidas da envoltória do edifício. Como mostra a Figura 2-11, o ar remove o calor da cavidade reduzindo no edifício as cargas de aquecimento no inverno e de resfriamento no verão, dependendo da estação do ano e da zona geográfica em que se encontra este.

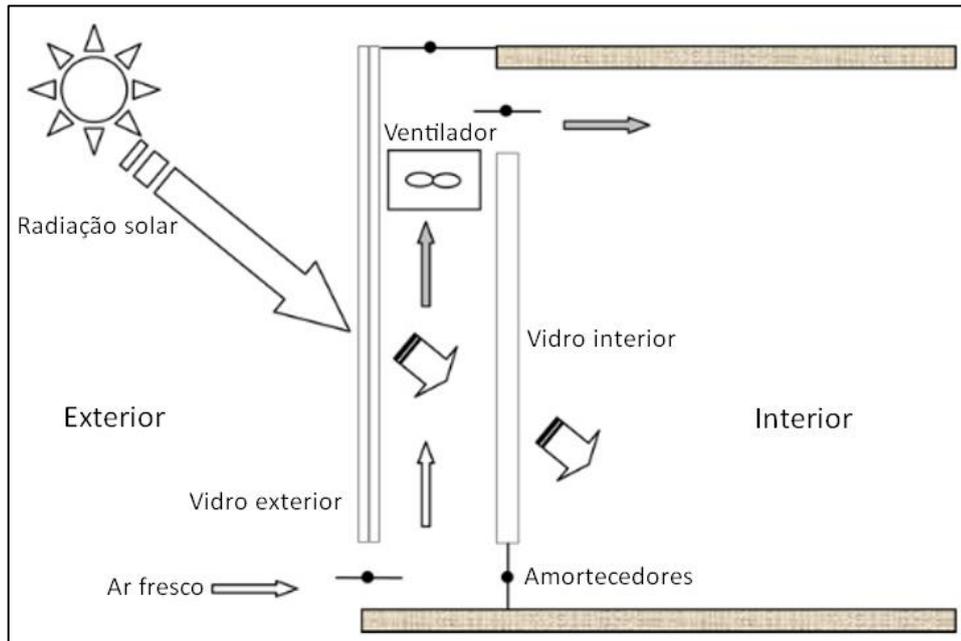


Figura 2-11: Diagrama esquemático de uma fachada mecanicamente ventilada (MVF).
Adaptado de [16]

- Sistema fotovoltaico integrado semitransparente (STBIPV – Semi-transparent building-integrated photovoltaic system), que é integrado a envoltória do edifício, gerando eletricidade através de módulos fotovoltaicos e permitindo a entrada de luz solar nos espaços internos (Figura 2-12).

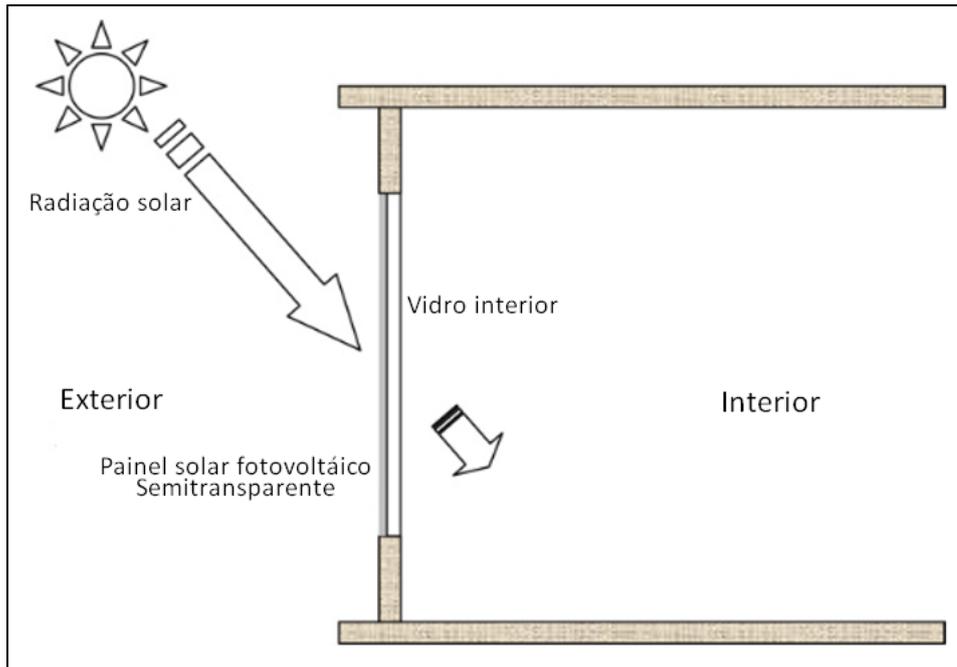


Figura 2-12: Diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico integrado semitransparente (STBIPV). Adaptado de [16]

- Sistema fotovoltaico térmico integrado semitransparente (STBIPV/T – Semi-transparent building-integrated photovoltaic thermal system), que são aqueles que além de combinar as funções dos sistemas BISP e BIPV, permitem a entrada de luz solar nos espaços internos do edifício (Figura 2-13)

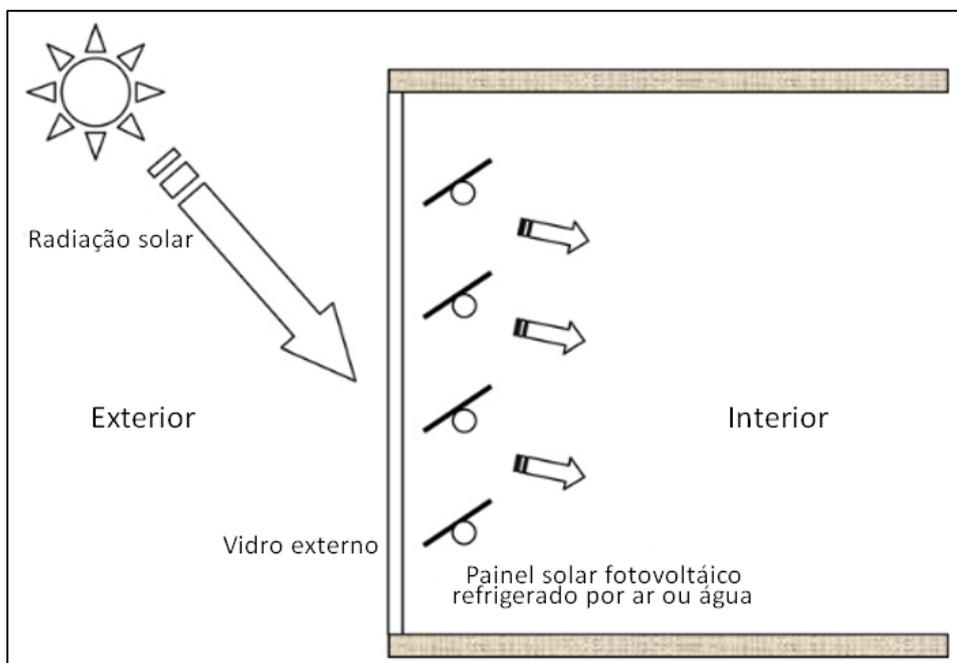


Figura 2-13: Diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico térmico integrado semitransparente (STBIPV/T). Adaptado de [16]

Por fim, falando das fachadas solares transparentes ou semitransparentes (translúcidas), constituem-se apenas de fachadas transparentes naturalmente ventiladas (NVTF – Naturally ventilated transparent facade), que assim como as mecanicamente ventiladas, fornecem, expõem ou recirculam o ar através de um canal localizado entre duas superfícies transparentes ou translúcidas, porém de forma natural através da pressão do vento ou convecção natural (Figura 2-14).

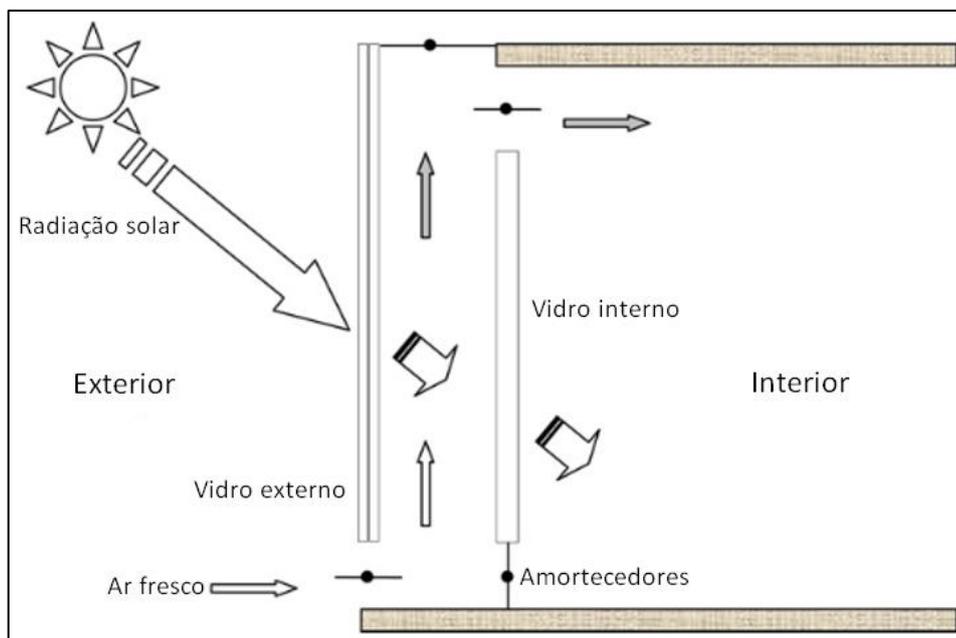


Figura 2-14: Diagrama esquemático de uma fachada naturalmente ventilada (NVF). Adaptado de [16]

2.2.4 Sistemas automatizados de controle térmico e lumínico

A presente seção se trata de uma revisão de diversos elementos de fachada responsivos prototipados e avaliados, explorando o desenvolvimento de seus componentes e destacando seu design, material e características dinâmicas.

O primeiro destes seria um elemento responsivo baseado na geometria de um origami [18], onde dependendo das propriedades físicas do material, os painéis dobrados podem ser aplicados tanto para fins de absorção e isolamento acústico no interior do edifício, quanto como uma fachada de sombreamento ao se aplicar no exterior do edifício. No referido estudo [18], o protótipo desenvolvido é composto por trinta e três triângulos, onde através de simulações cinemáticas e no próprio processo de construção do protótipo os autores puderam comprovar sua agilidade, baixo custo e baixo consumo de energia.

Outro estudo de caso no âmbito de fachadas adaptativas é o desenvolvido por Cheng e Bier [19], o qual o projeto compreende elementos adaptativos que funcionam como um enxame de abelhas, onde cada elemento possui sua própria resposta acionada por um sensor que também pode afetar a resposta dos elementos ao seu redor. Através de testes realizados pelos autores, puderam concluir que a vantagem desses elementos, além de ser um sistema descentralizado,

resulta em interfaces de espaço interno e externo que podem responder aos estímulos do usuário e do ambiente.

Ainda no contexto de fachadas adaptativas, a fachada cinética fotovoltaica (Figura 2-15) desenvolvida por Jayathissa et al. [20] é capaz de, além de controlar a radiação solar, produzir eletricidade elétrica no local. Os autores propuseram o desempenho responsivo dos painéis fotovoltaicos para maximizar a produção de eletricidade, contribuindo também para o objetivo de ‘energia líquida zero’, cada vez mais popular nos dias de hoje.



Figura 2-15: Fachada fotovoltaica cinética [20]

Chang et al. [21] desenvolveram um componente capaz de sentir a presença e proximidade dos ocupantes do edifício e responder por movimento cinético. O projeto é composto por um elemento estrutural cinético, compreendendo três elementos principais: conectores, barras de movimento e um projeto de tesoura e consiste em um componente modular acoplado a um elemento de grade, funcionando como um envelope responsivo na superfície do portador (Figura 2-16). Informações sobre a proximidade do elemento são coletadas por um sensor e cada componente é capaz de responder de forma independente, como também responder ao comportamento de seu vizinho.



Figura 2-16: Superfície de transporte [21]

Passando agora pra um patamar mais avançado, Kotsopoulos e Casalegno [22] desenvolveram um protótipo de Casa Sustentável Conectada (CSH – Connected Sustainable Home) associando propriedades físicas e tecnologias dos materiais. Juntamente com uma rede de sensores sem fio e atuadores eletrônicos, um grupo de janelas programáveis equipadas com vidro eletrocromico e filme de Cristal Líquido Polidisperso (PDLC – Poly Dispersed Liquid Crystal) compõe o elemento responsivo da fachada (Figura 2-17), capazes de se ajustarem em tempo real de acordo com as preferências dos usuários e as condições ambientais, além de afetar tanto a estética da casa quanto permitir a interação com o ambiente externo.

Uma característica inovadora desse projeto é o p-Sulu, sistema de controle baseado em modo preditivo que atua dentro de determinados horários e parâmetros de conforto desejados, operando em em três aspectos principais: redução da demanda de iluminação artificial, aquecimento e resfriamento por meio de ajuste da radiação solar, exploração da capacidade térmica do invólucro e suporte à interação com o usuário.



Figura 2-17: Janelas programáveis [22]

Na mesma linha, Thun e Velikov [23] desenvolveram um modelo de arquitetura adaptativa, com um sistema de informação integrado que controla uma série de subsistemas como dispositivos externos de sombreamento, sistemas de ventilação, aquecimento e ar-condicionado, sistema de água quente, persianas internas, iluminação, monitoramento de energia e uma interface que fornece controles simples e intuitivos, monitoramento e feedback do comportamento do usuário. Nesse projeto há um sistema de sombreamento externo dinâmico combinado com tecnologias de envidraçamento de alto desempenho (Figura 2-18) que, segundo os autores, atinge uma redução de 46% de carga de resfriamento da casa e sua adaptação ocorre através da abertura em diferentes fachadas de forma independente com base nas condições ambientais.



Figura 2-18: Sistema de sombreamento externo [23]

Em relação a materiais de liga com memória de forma, Yi et al. [24] desenvolveram dois protótipos diferentes de dispositivos de sombreamento cinético: um padrão de origami e uma fachada com veneziana horizontal. Suas funcionalidades alternaram entre motor de corrente contínua com engrenagem e liga de memória de forma termomecânica, onde a resposta cinética é acionada por estímulo térmico ambiental ou pela preferência do usuário através de um aplicativo de controle remoto. Após a execução de simulações, os autores puderam concluir que embora os atuadores de materiais de liga com memória de forma tenham respondido a estímulos ambientais, suas respostas cinéticas são difíceis de reproduzir em escala de construção devido ao tempo de condução de calor que gera um atraso na resposta cinética e à transformação repetitiva que pode causar fadiga ao material, resultando na redução do desempenho e resistência estrutural.

2.3 Sombreamento e fachadas adaptativas

Ao se tratar de fachadas adaptativas com o foco em sombreamento, Mahdavi [25], em seu estudo, apresenta uma implementação prototípica de um sistema responsivo à luz do dia que utiliza sistemas de iluminação e sombreamento que fazem uso de sensoriamento e simulação de iluminação em tempo real. Tal sistema além de controlar a posição das persianas das janelas e se as luzes estão ligadas ou desligadas, também possui uma representação digital interna envolvendo modelos do cômodo em questão, do céu e da ocupação.

Já Beaman e Bader [26], utilizando uma abordagem de projeto focada em entender como criar uma relação entre informação e projeto que pode fazer com que a arquitetura atinja a sustentabilidade e assim propondo a criação de uma metodologia orientada que abrange desde o início do projeto até a construção, criaram uma estrutura de elementos de sombreamento responsivos utilizando um modelo paramétrico responsivo que define uma série de critérios

como definições quantitativas e geométricas através de dados solares, contexto volumétrico e condições climatológicas, além de testar uma variedade de configurações e simular o desempenho dos resultados.

Outro exemplo é o estudo desenvolvido por Tabadkani et al. [27], onde é relatado o desenvolvimento de uma abordagem inovadora para a análise paramétrica da iluminação natural e conforto visual através de um sistema de sombreamento responsivo ao sol. O objetivo do estudo foi estimar a métrica anual de iluminação natural e desconforto interno por ofuscamento. Através de análises, os autores mostraram que a abordagem proposta é capaz de melhorar significativamente a flexibilidade de sombreamento para controlar as métricas de luz e brilho através de um padrão potencial adaptativo completo para alcançar o nível máximo de conforto com base no certificado LEEDv4.

3. Metodologia

3.1 Simulação térmica e energética

Apesar de os programas de simulação energética terem começado a serem desenvolvidos há muitos anos, quando ainda não se falava em construções e desenvolvimento sustentáveis, em vista da crescente tendência na busca por edifícios sustentáveis, ou seja, construídos com o mínimo impacto ambiental e mais eficiente energeticamente possíveis, têm cada vez mais sido desenvolvidos diferentes programas de simulação computacional de desempenho termo energético de edificações em busca de analisar e projetar as diferentes interações entre os sistemas presentes. Estes programas e simulações possibilitam a identificação do efeito de cada fator isoladamente, podendo serem feitas tanto nas fases de projeto, quanto nas fases de construção, testando assim diferentes soluções de forma rápida e barata e implementando o que for melhor de acordo com o objetivo do projeto [28].

Nesse sentido, neste trabalho foram utilizados os programas *DesignBuilder* para a modelação do edifício estudado e o *EnergyPlus* para as análises e cálculos térmicos e energéticos em regime transiente, que é o mecanismo de cálculo inserido no próprio *DesignBuilder*.

3.1.1 *EnergyPlus*

O *EnergyPlus* é um programa de simulação energética de edifícios que surgiu da necessidade de criar um sistema de simulação integrada, ou seja, um sistema e necessidades energéticas em simultâneo para cada intervalo de tempo. Nele é possível modelar sistemas de aquecimento, arrefecimento, ventilação, iluminação, entre outros. [29].

Como se trata de um programa de simulações integradas, o cálculo de cargas térmicas nas zonas, bem como os sistemas de ar e ventilação e as centrais de produção de energia térmica

são feitos simultaneamente levando em conta suas interações. O método de cálculo fundamental do programa se baseia no balanço de energia no qual a temperatura do ar contido dentro dos espaços é considerada uniforme. Tais simulações são realizadas sobretudo com base em entradas de texto, necessitando definir os parâmetros de entrada e certo esforço para visualização dos resultados. No entanto, o programa pode ser utilizado juntamente com uma interface gráfica, facilitando assim na parametrização do modelo e acelerando o processo de modelação e cálculo [29]. Nesse sentido, a interface escolhida e utilizada neste trabalho foi o *DesignBuilder*, apresentado na próxima seção.

3.1.2 *DesignBuilder*

O *DesignBuilder* é uma interface gráfica avançada utilizada, neste trabalho, em conjunto com o programa de simulação térmica dinâmica *EnergyPlus*. Traz várias vantagens em termos de produtividade, uma vez que a interface permite a introdução de dados e parâmetros de forma rápida e precisa [30]. Algumas dessas vantagens estão listadas abaixo:

- Criação rápida e visualização gráfica de modelos 3D de edifícios, permitindo importar plantas e usar ferramentas de desenho;
- Divisão do edifício por zonas utilizando ferramentas próprias;
- Fácil introdução de sistemas (AVAC, águas sanitárias e iluminação) no edifício ou para cada zona;
- Facilidade e praticidade na exportação dos resultados das simulações.

A interação feita entre os dois softwares funciona de forma que as informações criadas no *DesignBuilder* são compiladas em ficheiros IDF, a fim de que sejam reconhecidas pelo *EnergyPlus* [29].

3.2 Estudo de caso

3.2.1 Localização e caracterização do edifício

O alvo de estudo desse trabalho é a Câmara Bioclimática de Baixo Custo (CBBC) localizada, no estacionamento da sede Ecoville da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, na cidade de Curitiba, região leste do estado do Paraná, no sul do Brasil (Figura 3-1). A escolha do local de implantação foi devido a facilidade de acesso, a praticidade de operação e a maximização de insolação e ventilação natural dos módulos [31].



Figura 3-1: Localização de Curitiba [32]

A CBBC é composta por dois módulos independentes de 5,4m², o Módulo de Controle (MC) e o Módulo Experimental (ME), providos de um sistema de rotação manual que possibilita orientá-los para pontos cardeais distintos, permitindo assim a execução de diversos estudos comparativos (Figura 3-2).



Figura 3-2: Câmaras bioclimáticas de baixo custo (ME à esquerda e MC à direita) [33]

Foi desenvolvida baseando-se na Norma Brasileira NBR 15.220/2003: Desempenho térmico de edificações [33], que define o zoneamento bioclimático brasileiro e as estratégias construtivas para otimizar o rendimento térmico do edifício [34], além de ter a envoltória das paredes e cobertura projetadas para atingir os valores de transmitância e capacidade térmicas indicados na Norma Brasileira NBR 15575-4/13 [35], que estabelece os requisitos, os critérios e os métodos para a avaliação do desempenho de sistemas de vedações verticais internas e

externas (SVVIE) de edificações habitacionais ou de seus elementos [36]. Seus módulos foram concebidos à maneira de ambientes de escritório a fim de subsidiar estudos de Qualidade Ambiental em Ambientes Internos (IEQ). Ainda, se destacam as seguintes diretrizes técnicas adotadas no projeto da CBBC [33]:

- Adequação a normas de desempenho pertinentes;
- Exposição ao ambiente externo;
- Dois módulos “Walk-in”;
- Rotação independente dos módulos;
- Baixo peso e ausência de instalações fixas / Transportabilidade;
- Replicabilidade: padronização da construção dos containers.

3.2.2 Dados climáticos

Devido à grande extensão territorial que o Brasil possui, os estados que o compõe têm características geográficas bastante variadas entre si, como latitude, altitude, vegetação, massas de ar e relevo. Esses fatores influenciam diretamente nas grandes diferenças climáticas entre cada região do país. Pensando nisso, o presente trabalho foi realizado aplicando simulações utilizando dados climáticos de cidades de três regiões distintas do país: a região Sul, representada por Curitiba, a região Centro-Oeste, representada por Brasília, capital do país e a região Nordeste, representada por Picos, uma das cidades mais quentes do país.

Para cada uma das cidades descritas abaixo, as quais foram utilizadas para realizar as simulações, são representados gráficos cujos dados foram retirados da plataforma “PROJETEEE” (Projetando Edificações Energeticamente Eficientes) [37], pertencente ao Laboratório de Eficiência Energética em Edificações e vinculado ao departamento de engenharia civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) através de arquivos climáticos coletados e disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET) [38].

3.2.2.1 Curitiba

A cidade de Curitiba pertence à Zona Bioclimática 1 (ZB1), a mais fria do Brasil [34]. O clima local é classificado como temperado marítimo úmido (Cfb), na classificação Köppen-Geiger. Trata-se de um tipo climático mesotérmico, subtropical, com verões frescos, sem estação seca e com ocorrência frequente de geadas severas no inverno [39]. Além disso, a cidade possui a temperatura média anual de 17,4°C [38], com médias de 21°C no verão e de 13°C no inverno [40].

A Figura 3-3 apresenta o gráfico das temperaturas médias mensais de bulbo seco para a cidade de Curitiba.

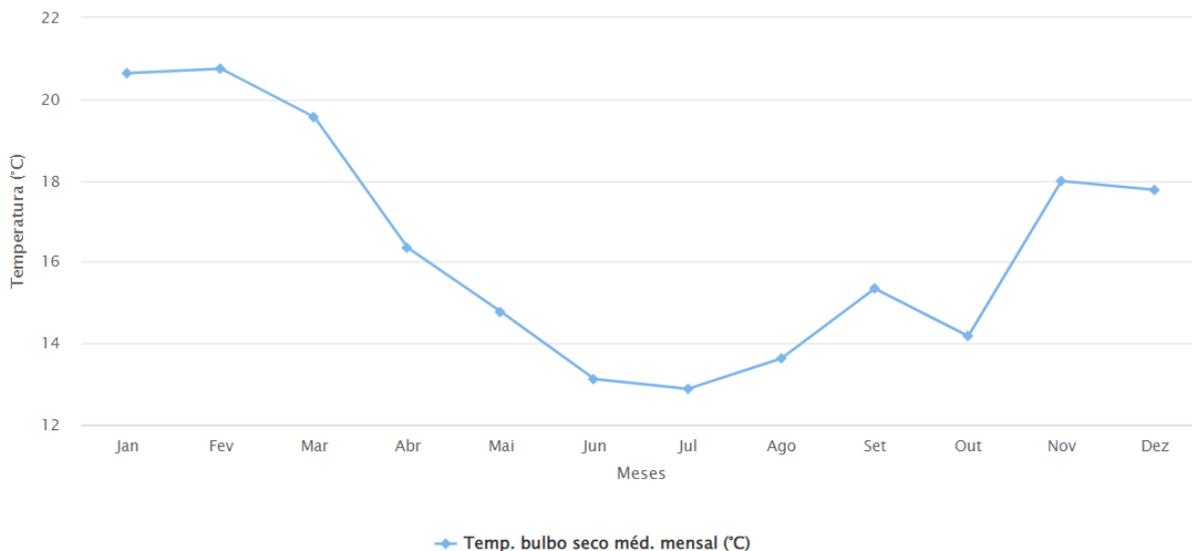


Figura 3-3: Gráfico da temperatura média mensal de Curitiba [37]

3.2.2.2 Brasília

A cidade de Brasília, localizada no Distrito Federal, região centro-oeste do Brasil, pertence à Zona Bioclimática 4 (ZB4) [34]. O clima encontrado no local é do tipo Aw segundo classificação Köppen-Geiger, o qual se trata de um tipo climático tropical com estação seca no inverno [41]. A cidade possui a temperatura média anual de 21°C [38].

A Figura 3-4 apresenta o gráfico das temperaturas médias mensais de bulbo seco para a cidade de Brasília

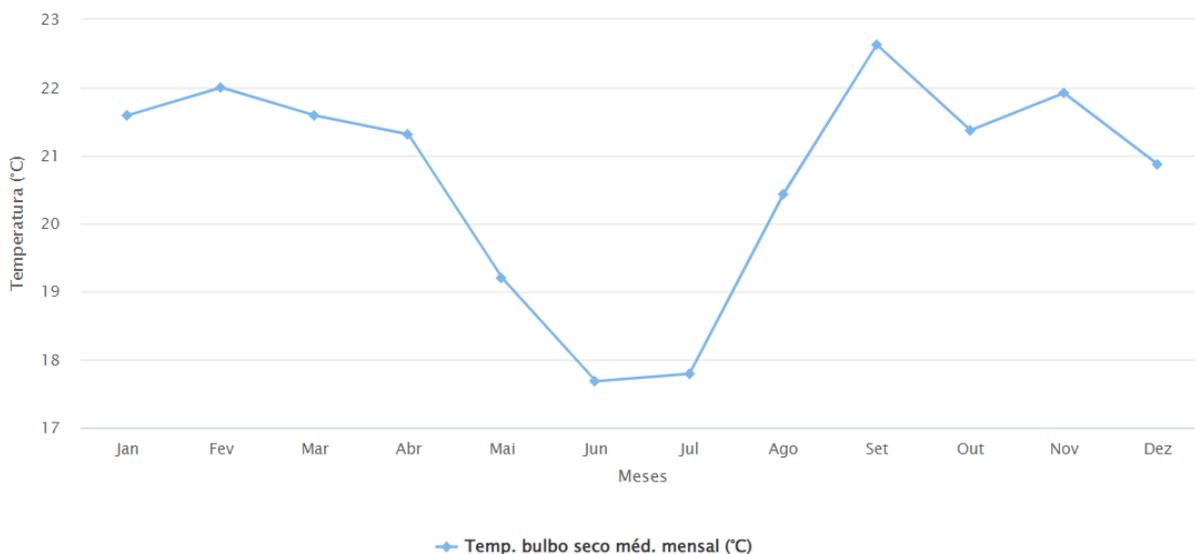


Figura 3-4: Gráfico da temperatura média mensal de Brasília [36]

3.2.2.3 Picos

A cidade de Picos, localizada no estado do Piauí, região Nordeste do Brasil, pertence à Zona Bioclimática 7 (ZB7) [34]. O clima encontrado no local é o clima quente semi-árido e,

segundo classificação Köppen-Geiger, BSh [42]. Possui características climáticas de verões quentes, invernos variando de quente a frio com precipitação mínima, com estações de chuva quentes, abafadas e nubladas e com a estação seca sendo escaldante, com ventos livres e céus parcialmente cobertos [42]. A cidade possui a temperatura média anual de 27,9°C [38].

A Figura 3-5 apresenta o gráfico das temperaturas médias mensais de bulbo seco para a cidade de Picos.

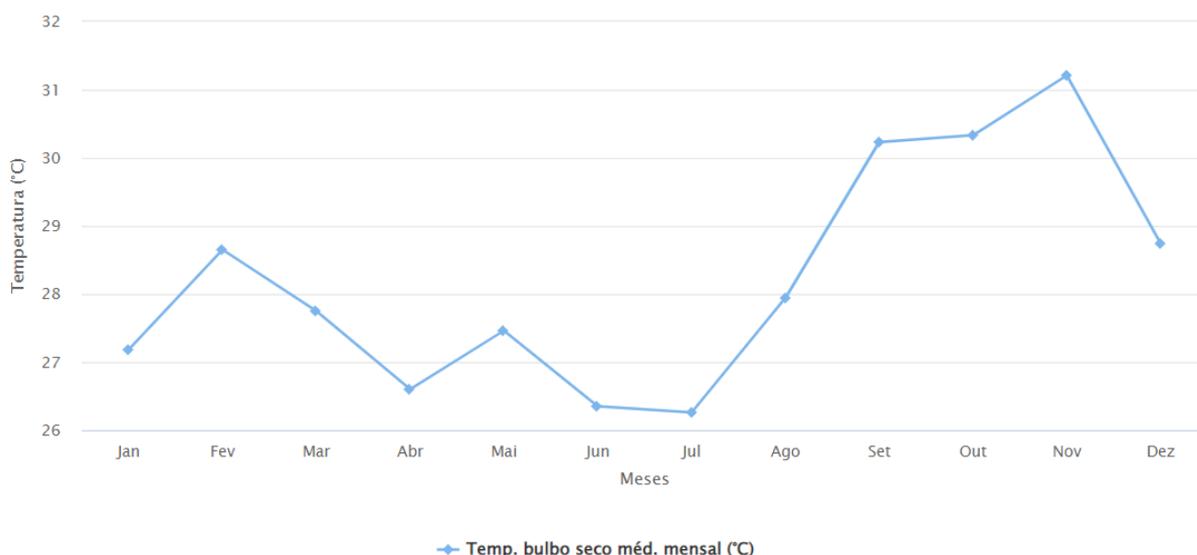


Figura 3-5: Gráfico da temperatura média mensal de Picos [36]

3.2.3 Elementos Construtivos

Os elementos construtivos e os respectivos materiais utilizados no modelo do estudo de caso foram definidos com base na memória descritiva e nas peças desenhadas do projeto desenvolvidos no estudo “Concepção, construção e verificação da aplicabilidade de uma câmara bioclimática de baixo custo em estudos de conforto ambiental” de Livia Trevisan [31]. As propriedades dos materiais de construção foram definidas a partir da consulta também do referido estudo.

Quanto à morfologia, a Câmara Bioclimática de Baixo Custo (CBBC) possui uma estrutura bastante simples, obtida a partir de dois cortes transversais em um único container do tipo high cube, 40” (12,19m x 2,44m x 2,89m), formando dois pequenos containers de dimensões externas de 3,00m x 2,44m x 2,89m (CxLxA). Os detalhes construtivos podem ser vistos na Figura 3-6 e Figura 3-7.

Após a construção, as dimensões internas dos módulos foram medidas pelo grupo de trabalho responsável, obtendo-se as medidas de 2,58m de comprimento, 2,00m de largura e 2,39m de altura, totalizando uma área de piso de aproximadamente 5,16m² e um volume de 12,3m³.

A capacidade térmica (CT) calculada para as paredes foi de 122,54 kJ/(m².K) e o atraso térmico (ϕ), que representa o tempo em que a onda de calor externa demora para se propagar para o interior da edificação, calculado para a cobertura foi de 3,99 h [31].

No que se refere às aberturas, a janela é em vidro temperado (1,40m x 0,90m), possuindo duas folhas: uma fixa e outra de correr. Descontando o caixilho e a sobreposição de folhas, as áreas de iluminação natural e ventilação natural obtidas foram de 1,26m² e 0,63m², respectivamente.

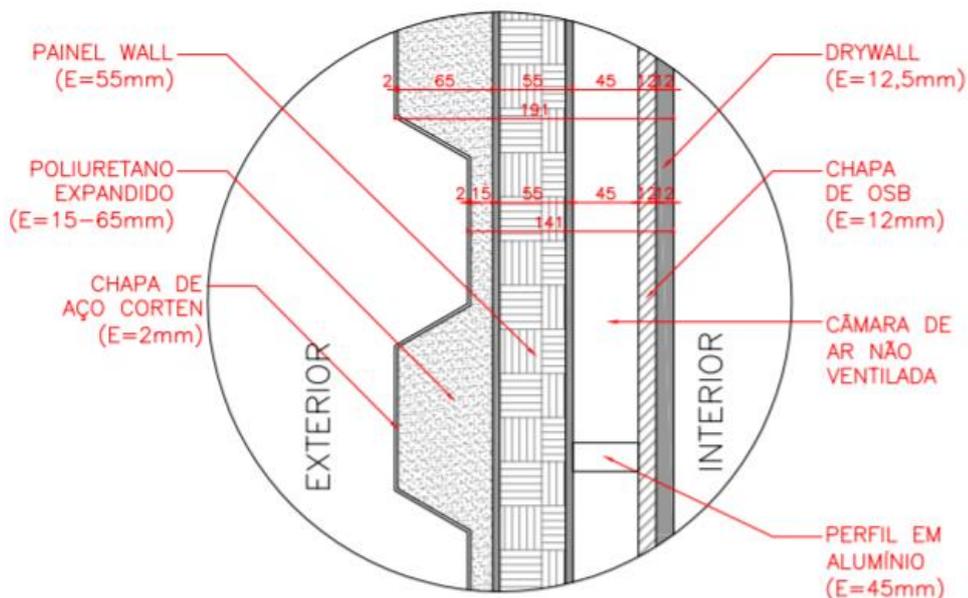


Figura 3-8: Detalhamento da composição da parede [31]

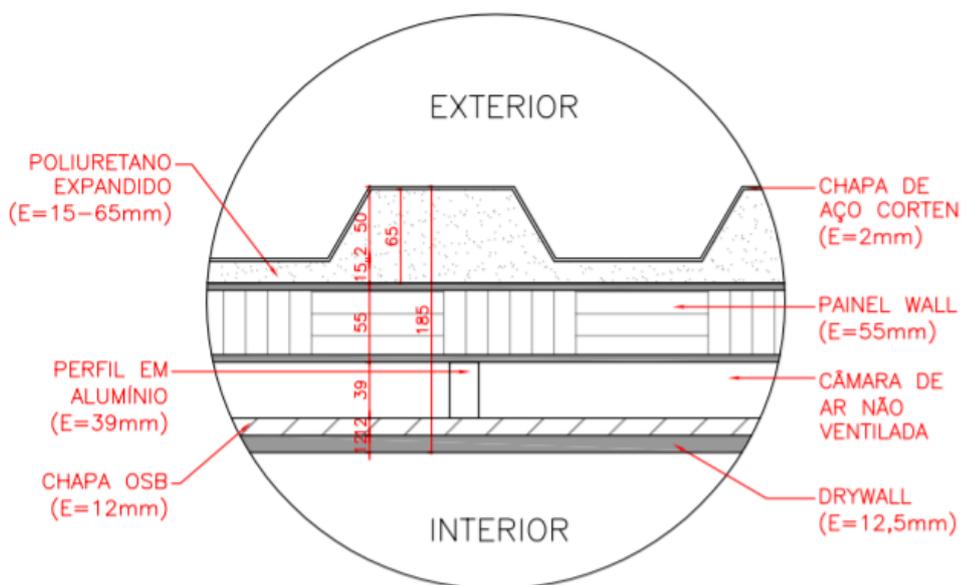


Figura 3-9: Detalhamento da composição da cobertura [31]

3.2.3.2 Piso

O piso da CBBC, originalmente composto pelo piso do container, é feito de travessas de aço cobertas por madeira naval. Além destes, foram adicionados piso vinílico, painel wall e poliuretano expandido. O detalhamento pode ser visto na Figura 3-10, abaixo.

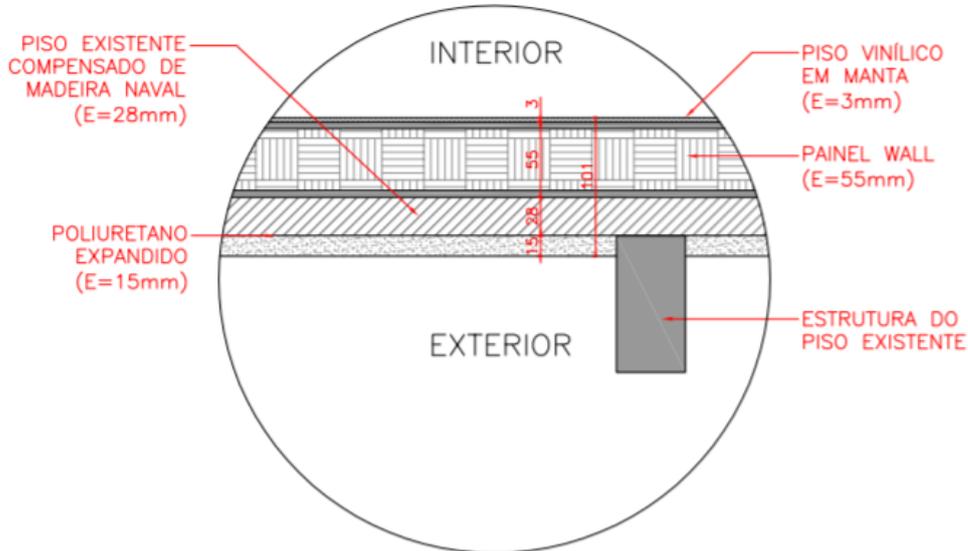


Figura 3-10: Detalhamento da composição do piso [31]

Por fim, as propriedades dos materiais da envoltória, como sua espessura, densidade, condutividade térmica e calor específicos podem ser consultados na Tabela 3-1, abaixo.

Tabela 3-1: Propriedades dos materiais da envoltória, adaptado de [31]

Material	Espessura e (mm)	Densidade ρ (kg/m ³)	Condutividade térmica λ (W/m.K)	Calor específico c (kJ/kg.K)
Aço corten	2	7800	55	0,46
Poliuretano expandido	15	40	0,03	1,67
OSB	11,1	1000	0,2	2,3
Painel Wall	55	682	0,241	2,088
Gesso acartonado	12,5	1000	0,35	0,84
Madeira naval	28	1000	0,29	1,34
Piso vinílico	3	1700	0,4	1

3.3 Modelo de Simulação

3.3.1 Geometria

Como já mencionado na caracterização do edifício, a CBBC é uma estrutura simples composta apenas por um container com as devidas instalações. A geometria da edificação foi modelada utilizando o software *DesignBuilder* com base nos projetos da CBBC, inclusive seguindo também a desconexão da CBBC com o solo, uma vez que caso isso não fosse feito

afetaria as simulações e o desempenho térmico deste edifício. A Figura 3-11 apresenta o modelo 3D da edificação desenhada no software.

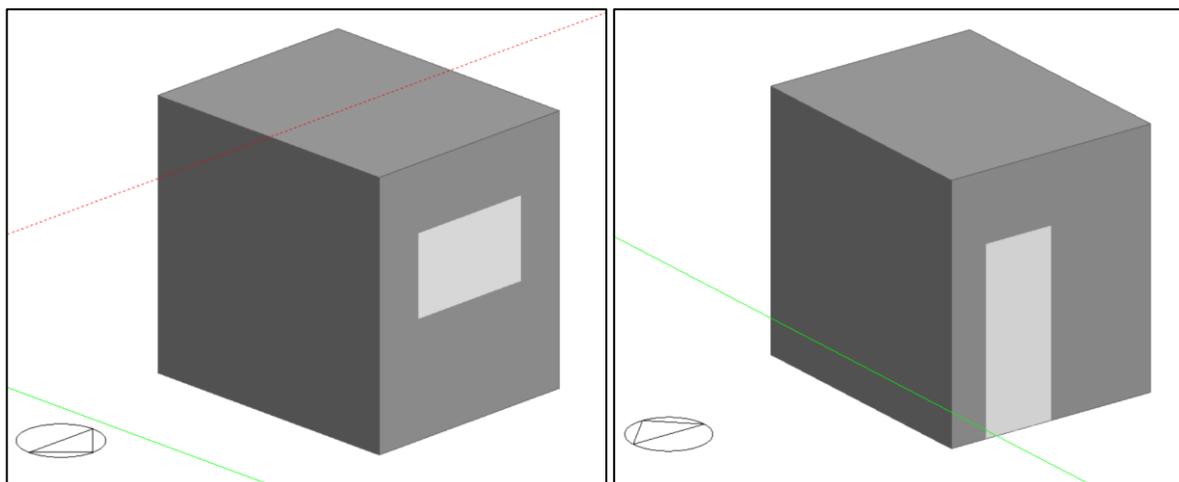


Figura 3-11: Vistas 3D da modelação da CBBC

3.3.2 Dimensionamento dos elementos de sombreamento

Os elementos de sombreamento foram dimensionados a partir do uso das cartas solares de cada uma das cidades estudadas juntamente com o auxílio do software ‘*Analysis SOL-AR*’, um programa gráfico que permite a obtenção da carta solar da latitude especificada, auxiliando no projeto de proteções solares através da visualização gráfica dos ângulos de projeção desejados sobre transferidor de ângulos, que pode ser plotado para qualquer ângulo de orientação.

Ao se tratar de elementos de sombreamento, é sensato projetá-los de forma que sejam considerados os momentos mais quentes do ano, onde as temperaturas são mais altas e deseja-se alguma estratégia para aumento do conforto, diminuindo a temperatura, ao mesmo tempo que se busca uma melhor eficiência energética, ao se utilizar estratégias com baixo ou nenhum custo energético e que excluam ou diminuam a necessidade do uso de meios de arrefecimento de alto custo energético como o ar-condicionado.

Pensando nisso, para tal dimensionamento, no software citado foram consideradas as temperaturas do primeiro semestre do ano (até 21 de junho), referente ao período mais quente do ano no hemisfério Sul. Comparando-se as Figura 3-12 e Figura 3-13, retiradas diretamente do ‘*Analysis SOL-AR*’, é possível verificar que as temperaturas mais quentes do ano na cidade de Curitiba se encontram próximo do solstício de verão, em 21 de dezembro e do equinócio da primavera, em 21 de março, onde se registram em maiores quantidades de ocorrência temperaturas de bulbo seco entre 20 e 25°C e maiores que 25°C.

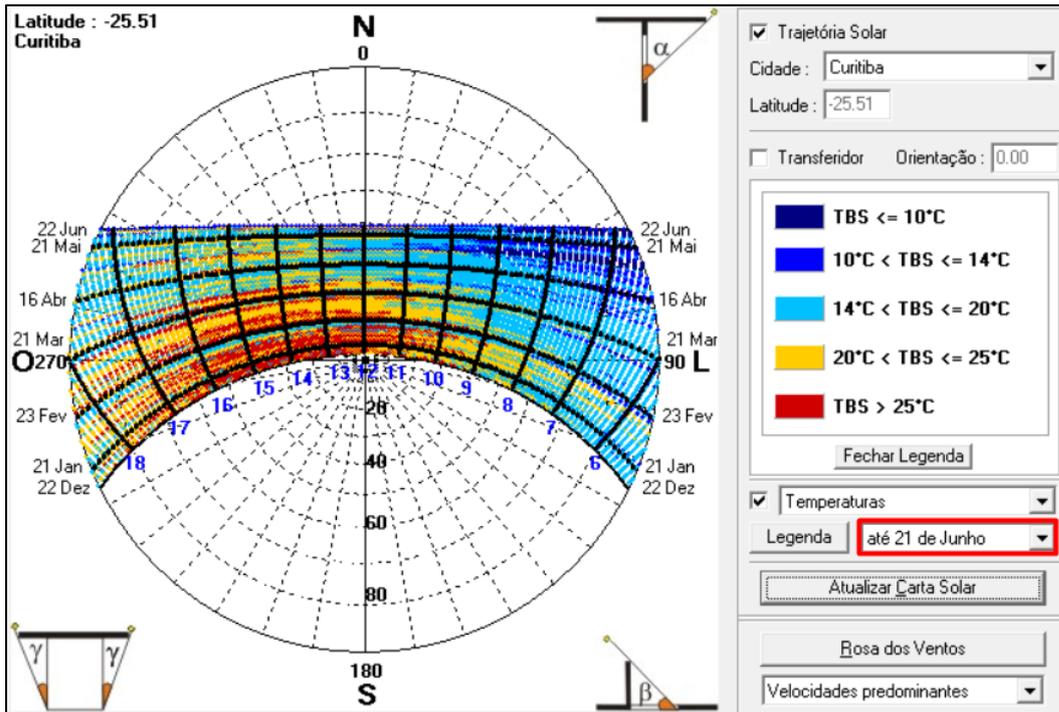


Figura 3-12: Temperaturas até 21 de junho em Curitiba representadas em sua carta solar

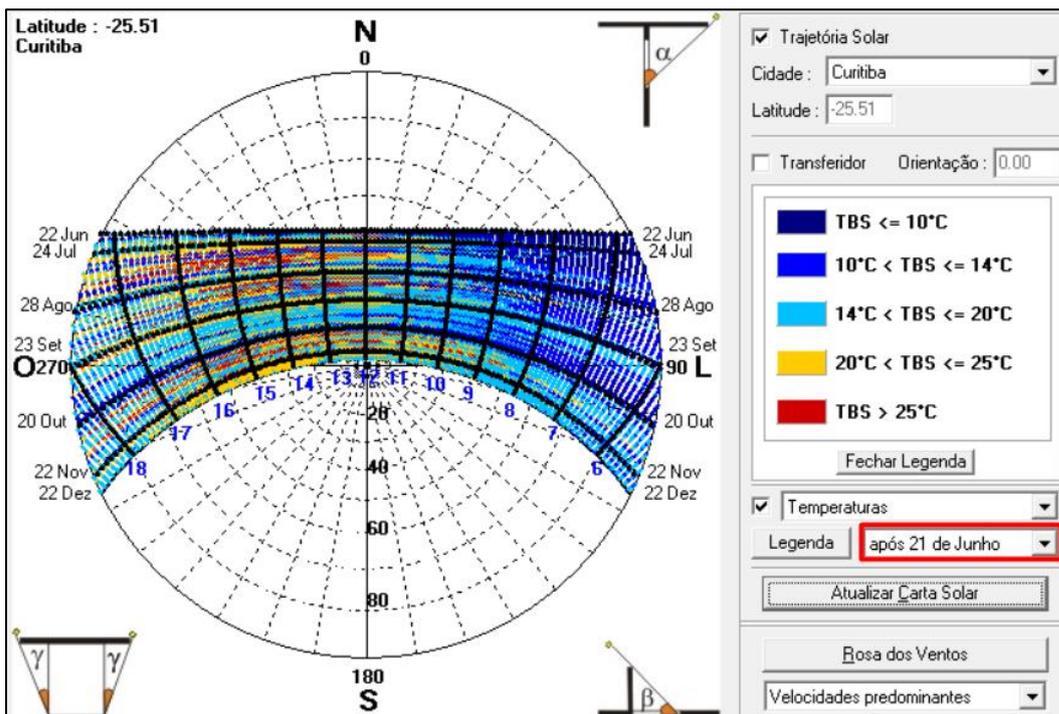


Figura 3-13: Temperaturas após 21 de junho em Curitiba representadas em sua carta solar

Partindo para a parte do dimensionamento em si, primeiro foi adicionado na carta solar o transferidor de ângulos orientado para o Norte, orientação em que se encontra a janela da CBBC. O transferidor de ângulos consiste em um círculo de mesmas dimensões do da carta solar, composto por linhas radiais e linhas curvas, cada uma representando uma possível

aresta do elemento a ser analisado e é utilizado para a análise mais rápida e fácil do sombreamento do entorno, penetração solar e proteções solares.

Logo após foi-se arbitrando valores para o ângulo alfa (α), utilizado para o dimensionamento de elementos de sombreamento horizontais e que representa um ângulo formado entre o plano horizontal e um plano vertical, podendo ter valores entre 0° , quando o plano em questão está na linha do horizonte, e 90° , quando este plano está no zênite. Conforme mostra a Figura 3-14, o valor final definido para o ângulo alfa (α) foi de 25° , com o objetivo de sombrear a fachada em questão considerando as temperaturas registradas entre o solstício de verão, em 22 de dezembro e o equinócio da primavera, em 21 de março, como mostra a Figura 3-15.

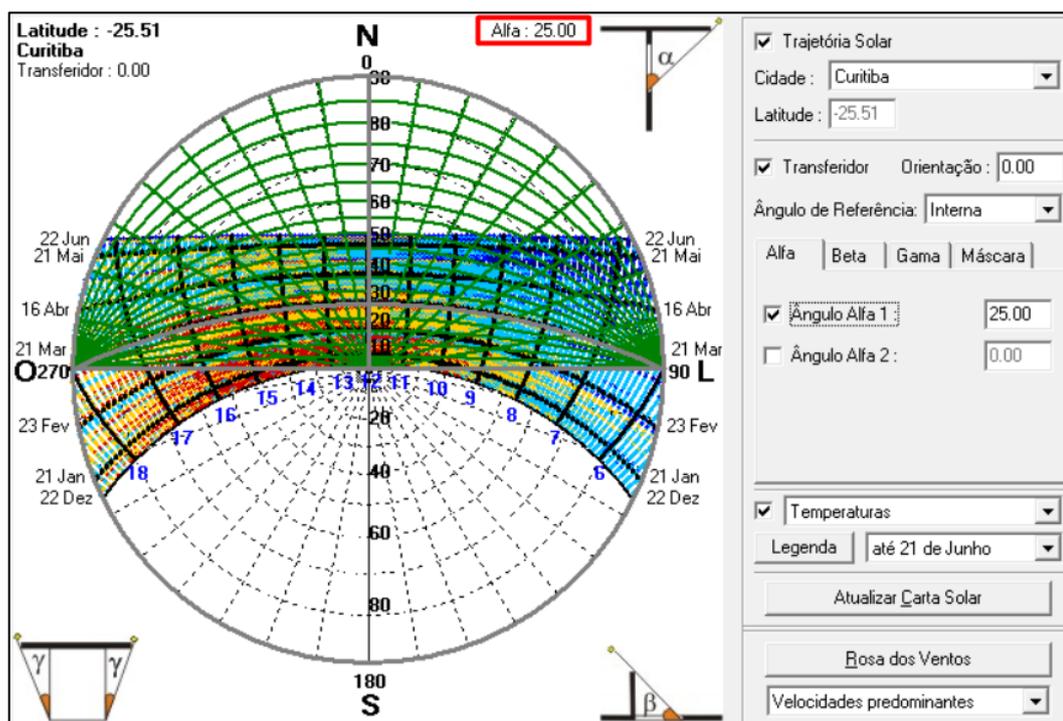


Figura 3-14: Definição do ângulo alfa (α) para a cidade de Curitiba

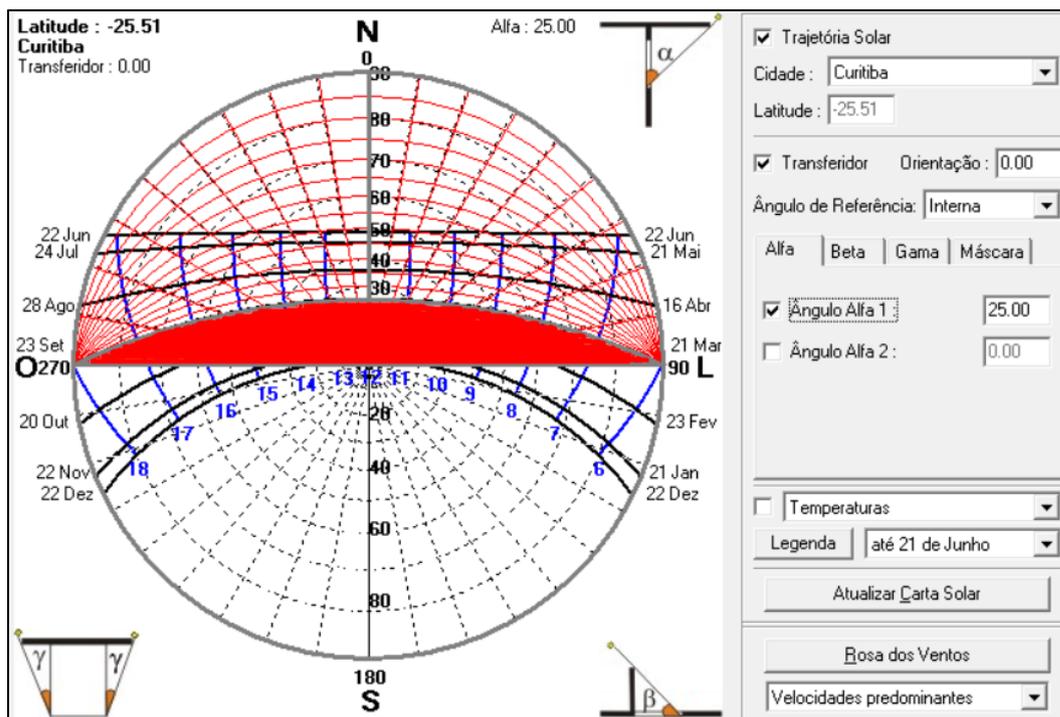


Figura 3-15: Sombreamento gerado com o ângulo alfa (α) de 25°

O elemento de sombreamento escolhido foi o beiral do tipo infinito, que é aquele que se projeta de fora a fora na fachada e foi calculado segundo a Equação (3-1), abaixo:

$$tg \alpha = \frac{x}{h} \quad (3-1)$$

Onde:

- 'h' representa a altura da janela (peitoril até o topo ou até encontrar o início do elemento de sombreamento);
- 'x' representa a projeção do beiral (da fachada até a extremidade)

De forma que quando o 'h' seja 0,9m (altura da janela utilizada) e ' α ' seja 25° (valor definido), o 'x' será 0,42m. Esse valor de 'x' seria utilizado caso fosse inserido apenas um beiral como elemento. No entanto, para este trabalho, foi optado por dividir o beiral em três lamelas, obtendo-se a projeção de 0,14m para cada uma delas e espaçamento de 0,3m entre estas, ao dividir-se a altura da janela também em três. O material e espessura escolhidos para as lamelas foi o aço em 2mm, definidos como padrão pelo próprio software *DesignBuilder*. Na Figura 3-16 é possível verificar os elementos de sombreamento inseridos no estudo de caso.

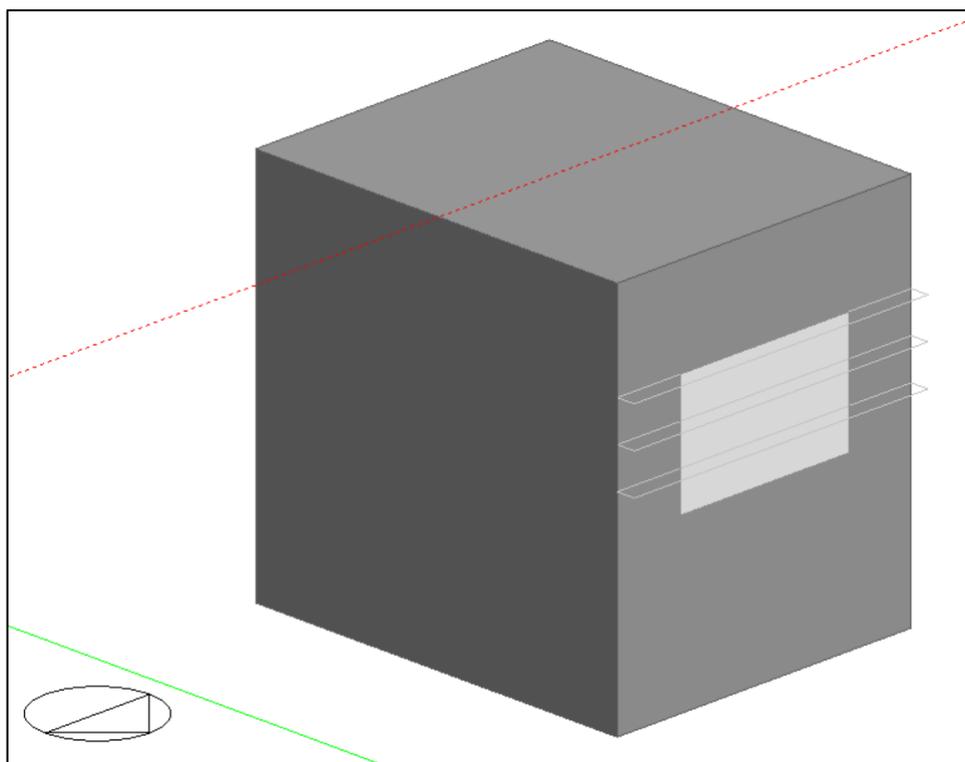


Figura 3-16: Representação dos elementos de sombreamento projetados para a CBBC

O mesmo processo foi adotado também para as cidades de Brasília e Picos, cujas cartas solares e os alfas adotados de 40° e 60° , respectivamente, estão representados nas Figura 3-17 e Figura 3-19 e seus respectivos sombreamentos gerados, nas Figura 3-18 e Figura 3-20. Nota-se que na carta solar de Picos não estão representadas suas temperaturas. Isto ocorre pois o programa '*Analysis SOL-AR*' não possui a base de dados dessa cidade. No entanto, como é uma cidade conhecida por suas altas temperaturas, procurou-se dimensionar elementos de sombreamentos capazes de suprir a necessidade de sombras por quase todo o período diurno.

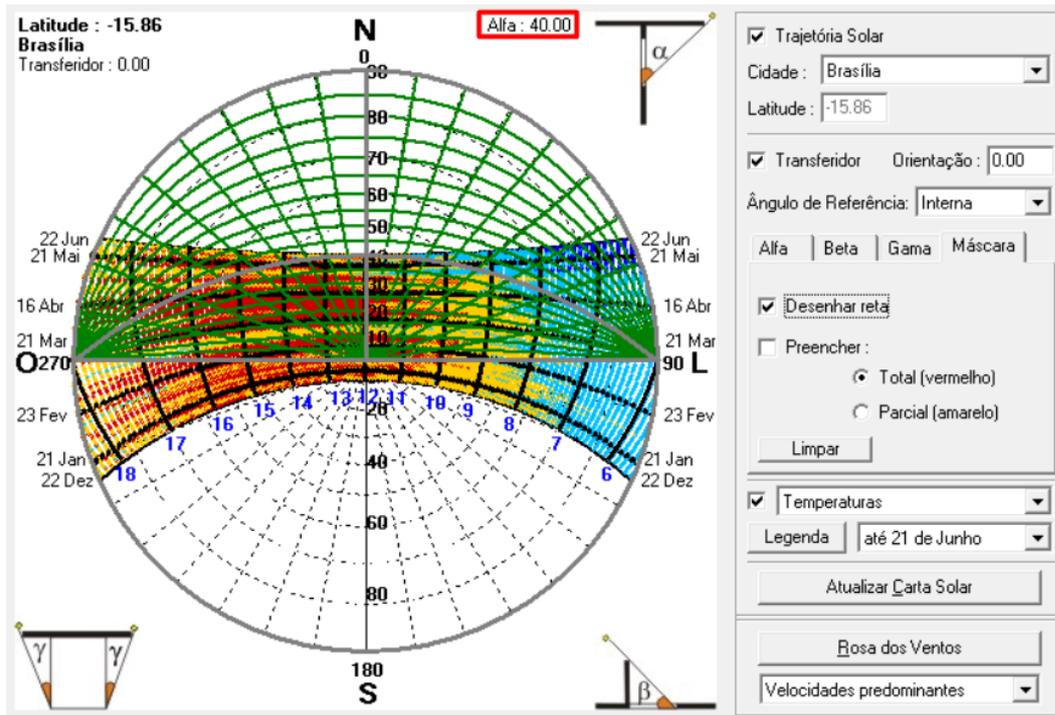


Figura 3-17: Definição do ângulo alfa (α) para a cidade de Brasília

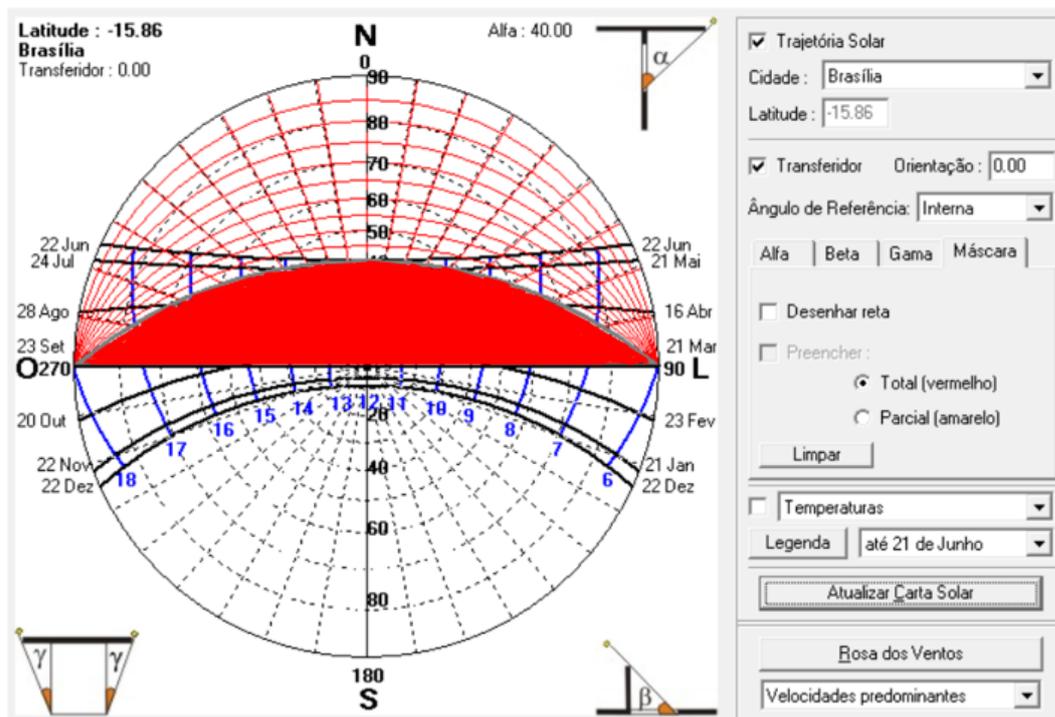


Figura 3-18: Sombreamento gerado com o ângulo alfa (α) de 40°

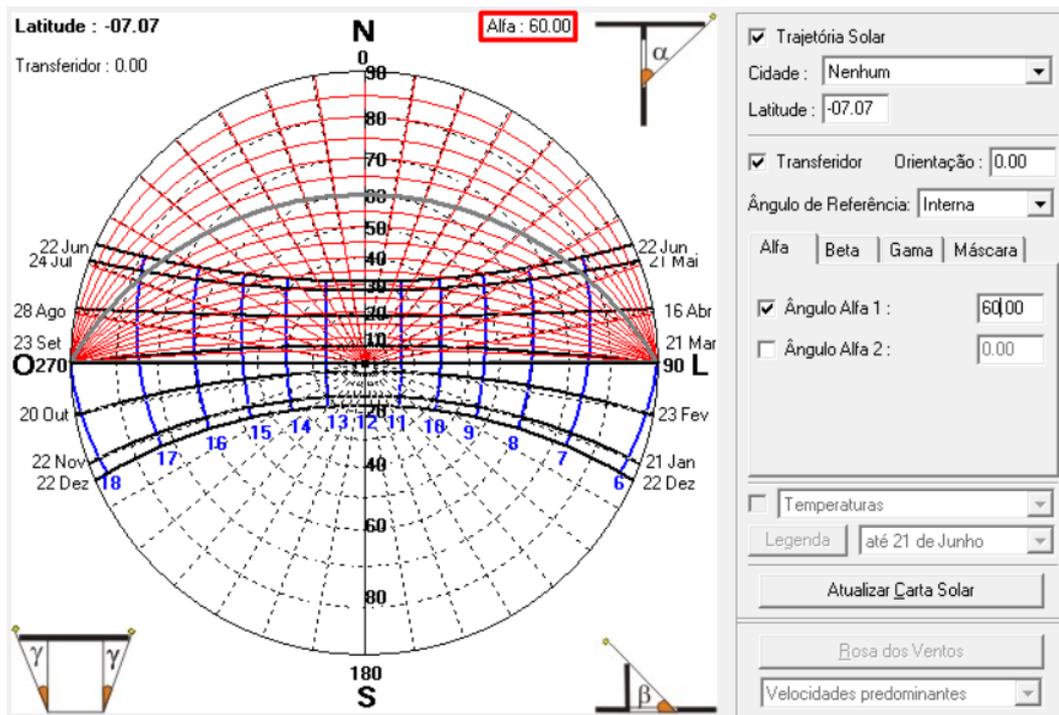


Figura 3-19: Definição do ângulo alfa (α) para a cidade de Picos

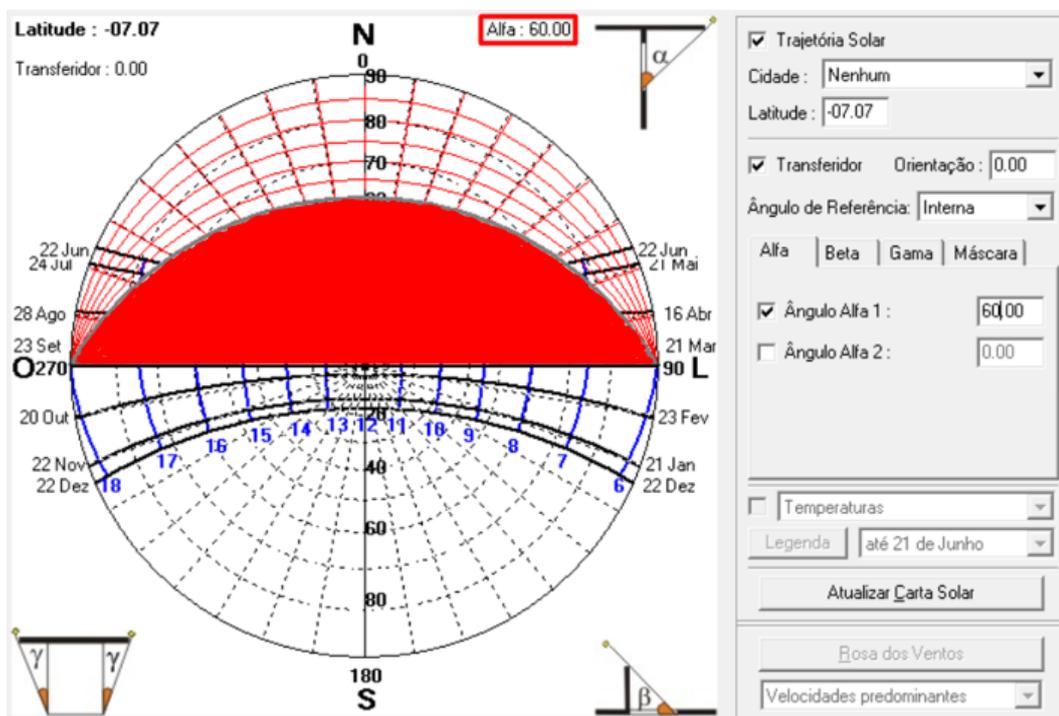


Figura 3-20: Sombreamento gerado com o ângulo alfa (α) de 60°

Abaixo, a Tabela 3-2 resume todos os parâmetros adotados e obtidos nos cálculos e dimensionamento dos elementos de sombreamento para as cidades escolhidas.

Tabela 3-2: Resumo do dimensionamento dos elementos de sombreamento

Cidade	Alfa (°)	N° lamelas	Extensão lamela (m)	Espaçamento (m)
Curitiba	25	3	0,14	0,3
Brasília	40	3	0,25	0,3
Picos	60	4	0,39	0,225

3.4 Cenários de simulação

3.4.1 Considerações iniciais

Nesta seção são apresentados todos os cenários de simulações realizadas no âmbito desta dissertação. Todas as simulações foram efetuadas numa base anual, consistindo em 1 de janeiro até 31 de dezembro. Os dados climáticos utilizados pertencem à própria base do *DesignBuilder*.

Inicialmente, foi desenvolvido o modelo do estudo de caso a ser simulado e através da determinação de certos parâmetros, pôde-se validar tal modelo através dos resultados obtidos com os resultados de estudos feitos anteriormente em outros trabalhos [31]. Após isso, foram definidos novos parâmetros, objetivando-se aproximar o máximo possível das reais condições de uso. Com isso, o restante das simulações foi executado, sendo a primeira em seu cenário atual e as demais, empregando-se elementos de sombreamento sob determinadas condições estabelecidas que estão explicadas no próximo tópico.

3.4.2 Cenários de simulação estabelecidos

Para este trabalho foram definidos quatro cenários de simulação. São eles:

- Simulação em seu estado atual, ou seja, sem elementos de sombreamento;
- Simulação com elemento de sombreamento fixo durante todo o ano;
- Simulação com elemento de sombreamento apenas no período de verão;
- Simulação com sombreamento responsivo levando em consideração o parâmetro temperatura. Ou seja, quando a temperatura interna estiver acima de 25°C o elemento de sombreamento é ativado.

Os valores de temperatura utilizados nas simulações de sombreamento responsivo foram definidos a partir da norma europeia EN 15251 (2006) [43] que estabelece determinados valores como limites de condições de conforto.

3.4.3 Parâmetros de simulação

A abordagem inicial consistiu na validação do modelo criado. Para essa validação, foram considerados os seguintes parâmetros:

- Ocupação nula;
- Ganhos internos nulos;
- Elementos de sombreamento inexistentes;
- Ventilação natural e contínua de 15,0 trocas horárias, valor máximo teórico que entraria no ambiente assumindo velocidade média anual do vento, sem qualquer redução por obstruções, vento a 90° da abertura (incidente) e por uma janela aberta a 50% do vão. Esse valor foi calculado através do efeito por ação do vento com ventilação através de uma única abertura, utilizando-se no cálculo o volume interno da CBBC, a área do vão de abertura e o vento típico de acordo com a média anual.

A partir da validação do modelo, comparando seu comportamento com estudos já feitos anteriormente sobre a CBBC [31][35], foram estabelecidos novos parâmetros para prosseguimento das simulações, visando aproximar-se o máximo possível de se testar condições de uso reais, sendo estes:

- Ocupação nula;
- Ganhos internos nulos;
- Emprego dos elementos de sombreamento (quando aplicável, de acordo com o cenário de simulação estabelecido);
- Ventilação natural de 1 troca horária no inverno, de 7 trocas horárias no verão e de 4 trocas horárias no outono e primavera, uma vez que ao se utilizar 15 renovações por hora, os impactos das estratégias de sombreamento seriam praticamente nulos pelo fato de que a temperatura interior estaria fortemente condicionada pela temperatura exterior.

3.5 Avaliação do conforto térmico

Para a avaliação do conforto térmico do ambiente interno do estudo de caso foi utilizado o modelo adaptativo da norma europeia EN 15251 (2006) [43], que abrange uma abordagem adaptativa dos ocupantes num nível psicológico, fisiológico ou comportamental a fim de se evitar o desconforto.

Na norma são descritas três categorias com seus respectivos limites de conforto, como mostra a Figura 3-21, diferenciados por critérios de conforto estabelecidos conforme o nível de expectativa dos ocupantes, onde:

- A categoria I considera um alto nível de expectativa do ocupante, sendo aconselhada para pessoas sensíveis e/ou frágeis;
- A categoria II considera um nível médio de expectativa do ocupante, recomendada para uso em novas edificações e reformas;

- A categoria III considera um nível baixo de expectativa do ocupante e é adotada para edificações já existentes.

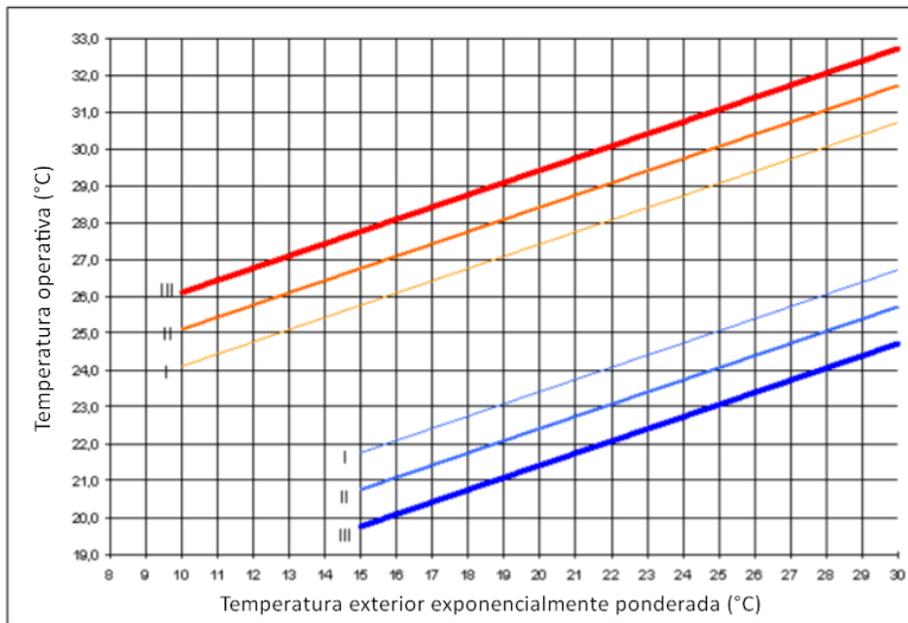


Figura 3-21: Zona de conforto para edifícios naturalmente ventilados, adaptado de [43]

Neste trabalho foi considerado a categoria II, recomendada para ocupantes com nível médio de expectativa e indicada para reabilitações de edificações, que seria o caso deste trabalho, uma vez que foram testados cenários com possibilidades reais de implementação.

Como simplificação, foi considerado que as heterogeneidades devidas ao efeito da radiação e à velocidade do ar são negligenciáveis, considerando-se desprezíveis a diferença entre a temperatura do ar interno e a temperatura operativa. Portanto, devido suas proximidades, a temperatura interna (T_i) foi considerada igual à temperatura operativa (T_{op}).

A utilização deste modelo de conforto pressupõe o cumprimento de determinadas premissas sobre a edificação, que se encontram em conformidade com o presente estudo. São eles:

- O espaço é equipado com janelas com a possibilidade de serem prontamente abertas e ajustadas pelos ocupantes;
- Ausência de sistema de arrefecimento mecânico em operação no espaço;
- Os ocupantes estão em atividade do tipo sedentária e podem adicionar ou remover livremente peças de roupa a fim de um melhor conforto térmico no ambiente.

Para o período quente, os limites superior e inferior de temperatura de conforto da categoria II são estabelecidos através da Equação (3-2) e Equação (3-3), respectivamente.

$$T_{i \text{ máx}} = 0,33 \cdot T_{mp} + 18,8 + 3 \quad (3-2)$$

$$T_{i \text{ mín}} = 0,33 \cdot T_{mp} + 18,8 - 3 \quad (3-3)$$

Onde:

- ' $T_{i\ máx}$ ' representa a temperatura interna máxima, em °C;
- ' $T_{i\ mín}$ ' representa a temperatura interna mínima, em °C;
- ' T_{mp} ' representa a temperatura exterior média exponencialmente ponderada, em °C, que leva em consideração a experiência do usuário durante a semana anterior ao dia em análise, considerando diferentes pesos para cada dia e pode ser calculada segundo a Expressão 3-3;
- ' T_{n-i} ' representa a temperatura média exterior do dia (i) anterior, em °C.

$$T_{mp} = \frac{T_{n-1}+0,8 \cdot T_{n-2}+0,6 \cdot T_{n-3}+0,5 \cdot T_{n-4}+0,4 \cdot T_{n-5}+0,3 \cdot T_{n-6}+0,2 \cdot T_{n-7}}{3,8} \quad (3-3)$$

Já para o período frio, pode-se utilizar os valores da temperatura de referência sugeridos pela norma. No caso do estudo de caso, o limite superior corresponde ao limite mínimo do período quente, enquanto o limite inferior é de 20°C. Portanto, qualquer temperatura simulada que estiver fora destes limites (seja no período quente ou no período frio) é considerada um ponto de desconforto térmico.

4. Apresentação e discussão dos resultados

4.1 Considerações iniciais

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos nas simulações executadas nas três cidades escolhidas para o estudo, onde a primeira simulação se refere ao estado atual do estudo de caso trabalhado e as demais, às alterações relativas ao cenário base, ou seja, com o emprego das estratégias de sombreamento com condições próprias de aplicação individualmente estabelecidas.

Para cada simulação são expostos os dados das temperaturas internas e externas nos solstícios de verão e inverno e dos equinócios de outono e primavera e a partir destes, suas respectivas análises. Além disso, para cada um desses cenários de simulação de cada cidade também são expostos a representação gráfica da aplicação do modelo de conforto térmico proposto pela EN 15251 e sua análise assim como os dados utilizados para sua construção.

Na discussão final é feito um comparativo geral entre todos os cenários de acordo com as estações do ano e uma análise mais aprofundada de seus comportamentos em si.

4.2 Apresentação dos resultados

4.2.1 Simulação do cenário I

O cenário de simulação I representa o estudo de caso em seu estado atual, ou seja, sem elementos de sombreamento.

4.2.1.1 Curitiba

As Figura 4-1 e Figura 4-2 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos solstícios de verão, 21 de dezembro e inverno, 21 de junho, respectivamente, para a cidade de Curitiba.

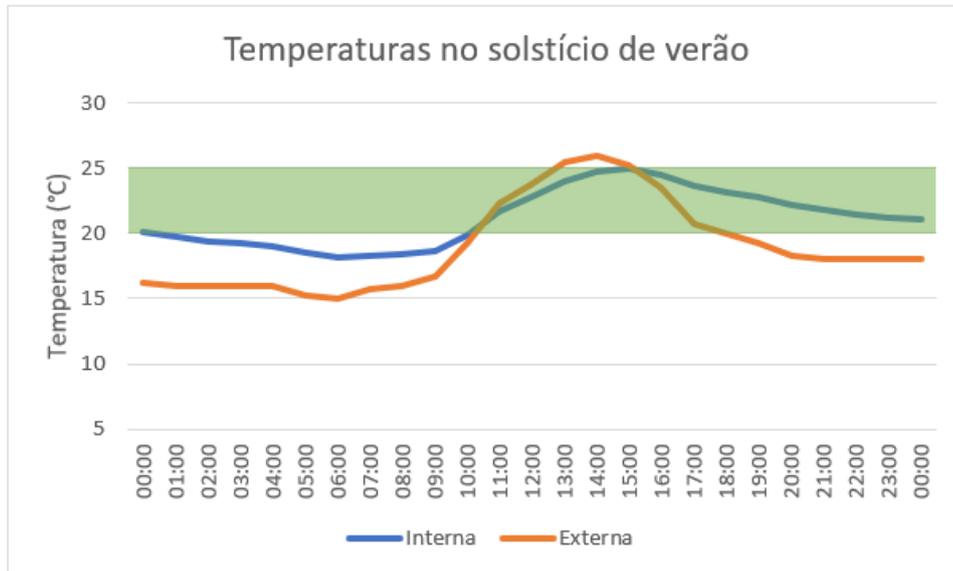


Figura 4-1: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação I na cidade de Curitiba

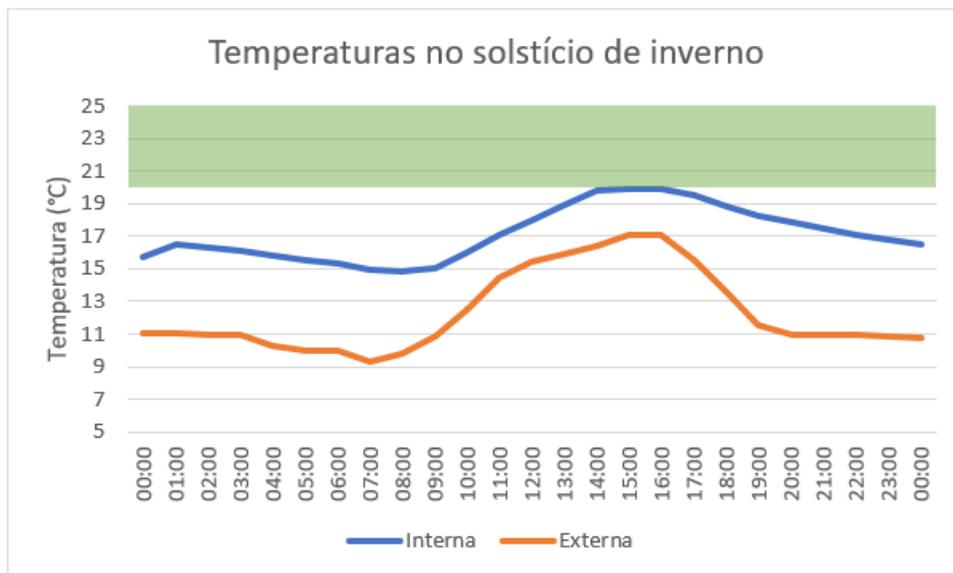


Figura 4-2: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação I na cidade de Curitiba

Analisando as Figura 4-1 e Figura 4-2, pode-se observar que no solstício de verão o edifício passa a maior parte do dia em situação de conforto térmico, atingindo esta perto das 11h00 da manhã e se mantendo até o final do dia, mesmo com a temperatura exterior ultrapassando esses limites. Já no solstício de inverno, observa-se o contrário. O edifício passa o dia todo em desconforto térmico, com suas temperaturas abaixo do limite inferior de conforto, onde

apenas num breve momento de duração em que esta, no período da tarde, parece atingir a zona de conforto térmico. Porém, apesar de ainda estar em situação de desconforto, as temperaturas internas se mantêm maiores que as externas, observando-se também uma diferença mais acentuada entre estas no solstício de inverno do que no solstício de verão. Também é possível perceber claramente que no solstício de inverno, o declínio das temperaturas ao fim do dia se dá por volta do horário do pôr do sol, perto das 17h00.

As Figura 4-3 e Figura 4-4 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos equinócios de outono, em 20 de março e primavera, em 22 de setembro, respectivamente.

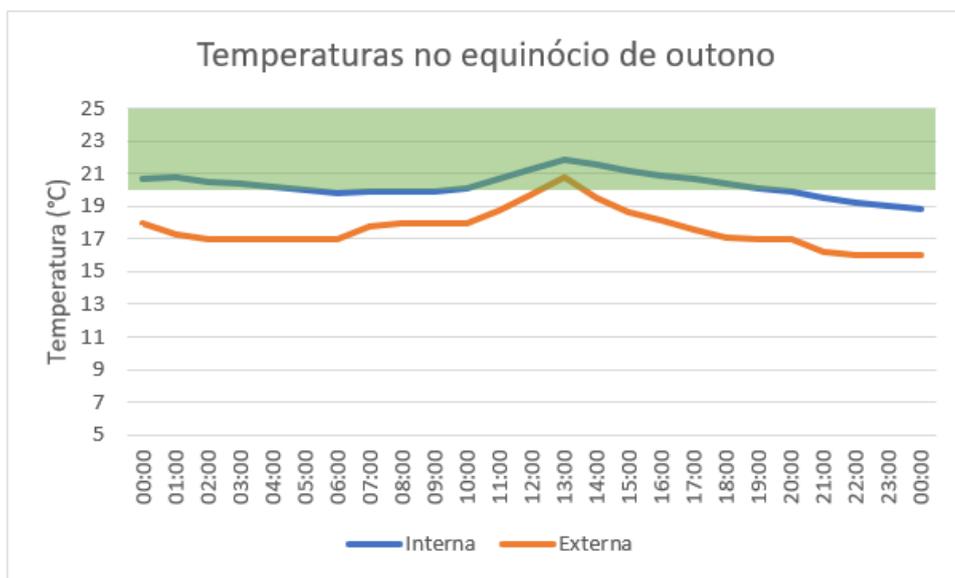


Figura 4-3: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação I na cidade de Curitiba

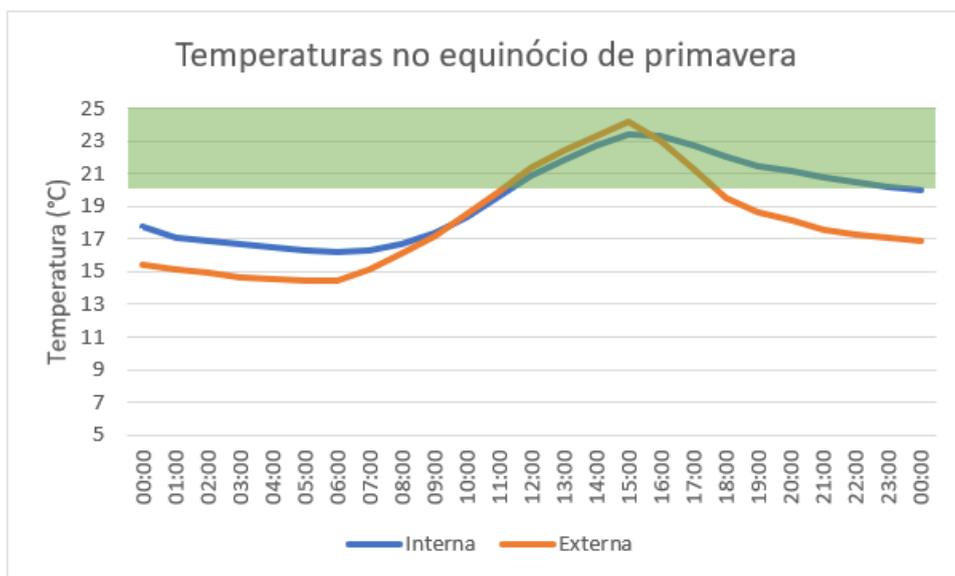


Figura 4-4: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação I na cidade de Curitiba

Já, ao analisar as Figura 4-3 e Figura 4-4, percebe-se um comportamento parecido, porém mais equilibrado e homogêneo das temperaturas nos equinócios de acordo as estações que as procedem (inverno para o outono e verão para a primavera). É possível perceber também que nos equinócios, em comparação com os solstícios, houve mais momentos em que a temperatura interna esteve dentro dos limites de conforto (entre 20 e 25°C), onde no equinócio de outono o limite inferior de conforto térmico só foi ultrapassado a partir das 20h00 e no equinócio de primavera a zona de conforto foi atingida entre 11h00 e 12h00 e se manteve até o final do dia.

A Figura 4-5 apresenta o resultado gráfico da aplicação do modelo de conforto térmico proposto pela EN 15251.

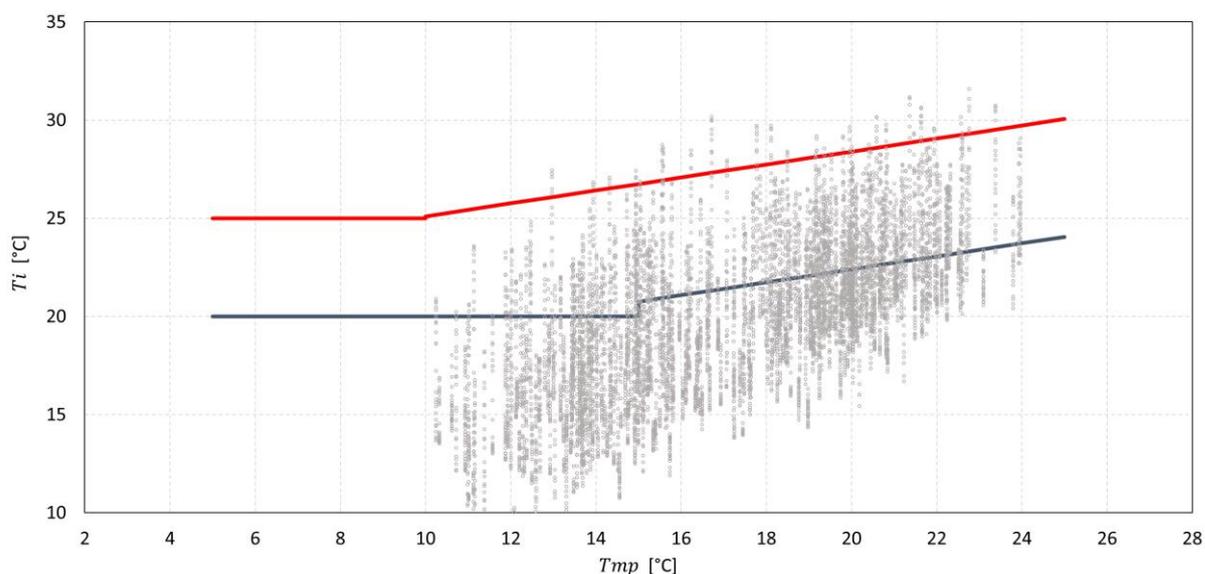


Figura 4-5: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação I na cidade de Curitiba

Através do cálculo e da análise da Figura 4-5, que utiliza dois indicadores para sua construção, o primeiro indicando as médias das temperaturas abaixo ou acima dos limites inferiores e superiores de conforto térmico, respectivamente e o segundo, a porcentagem de dias ao longo do ano que o edifício passou em desconforto térmico por frio ou sobreaquecimento, constata-se no cenário de simulação I, onde não há o uso de elementos de sombreamento, a média de 3,3°C abaixo do limite inferior de conforto, de 20°C e a média de 0,92°C acima do limite superior, de 25°C.

A partir desses valores, é possível constatar que durante 67,18% do ano o edifício passa em desconforto por frio e em 1,42% em desconforto por sobreaquecimento, restando 31,40% do ano em que este passa em temperaturas dentro dos limites de conforto.

4.2.1.2 Brasília

As Figura 4-6 e Figura 4-7 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos solstícios de verão, 21 de dezembro e inverno, 21 de junho, respectivamente, para a cidade de Brasília.

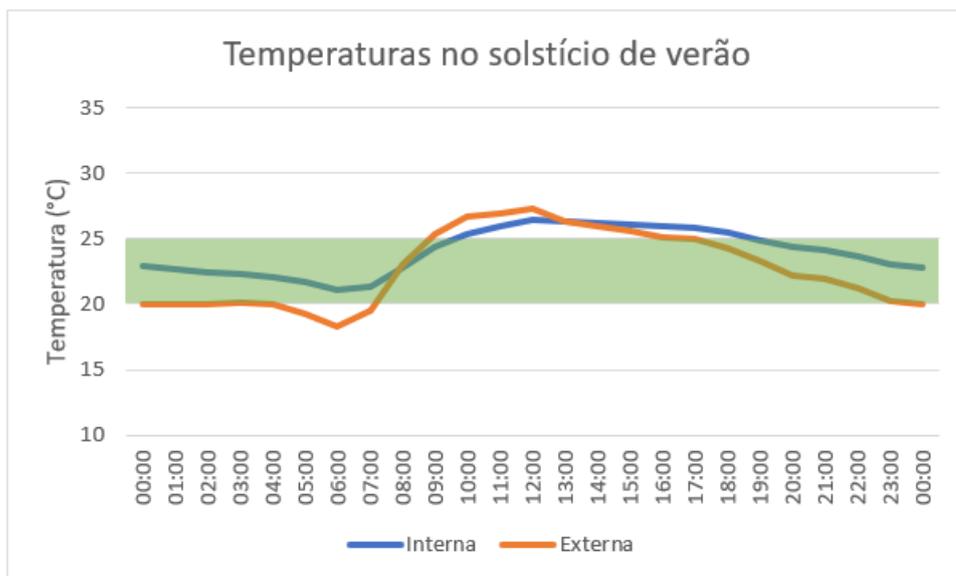


Figura 4-6: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação I na cidade de Brasília

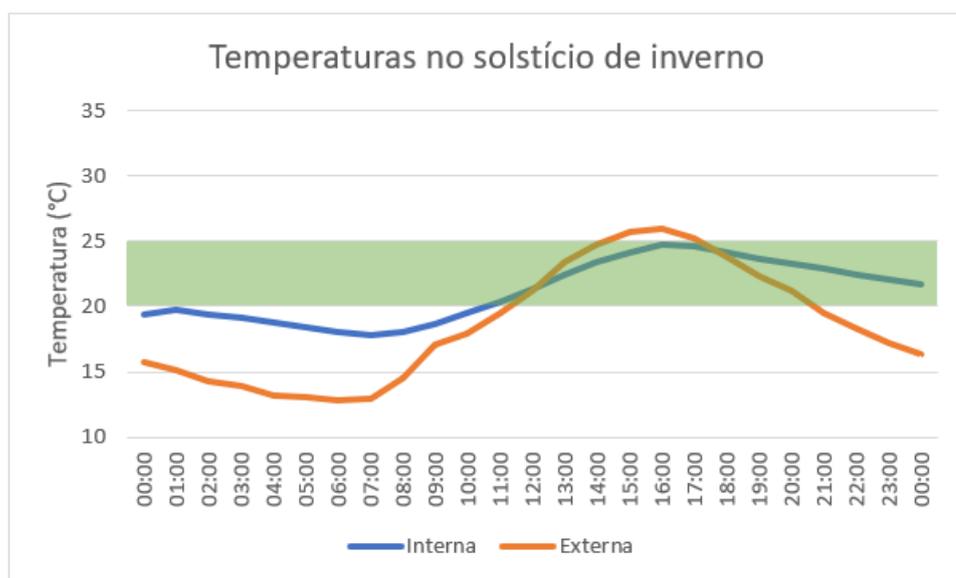


Figura 4-7: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação I na cidade de Brasília

Analisando as Figura 4-6 e Figura 4-7, pode-se observar que no solstício de verão o edifício passa a maior parte do dia em situação de conforto térmico, já começando o dia em conforto e se mantendo até pouco depois das 10h00 da manhã e voltando a essa faixa por volta das 19h00 e se mantendo até o final do dia. No solstício de inverno, observa-se algo parecido. O edifício passa também a maior parte do dia em situação de conforto térmico, atingindo-o perto das 11h00 da manhã e se mantendo até o final do dia. No primeiro terço do dia do solstício de inverno, observa-se também que as temperaturas interna e externa possuem uma diferença acentuada, onde a temperatura interna está mais próxima da zona de conforto.

As Figura 4-8 e Figura 4-9 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos equinócios de outono, em 20 de março e primavera, em 22 de setembro, respectivamente.

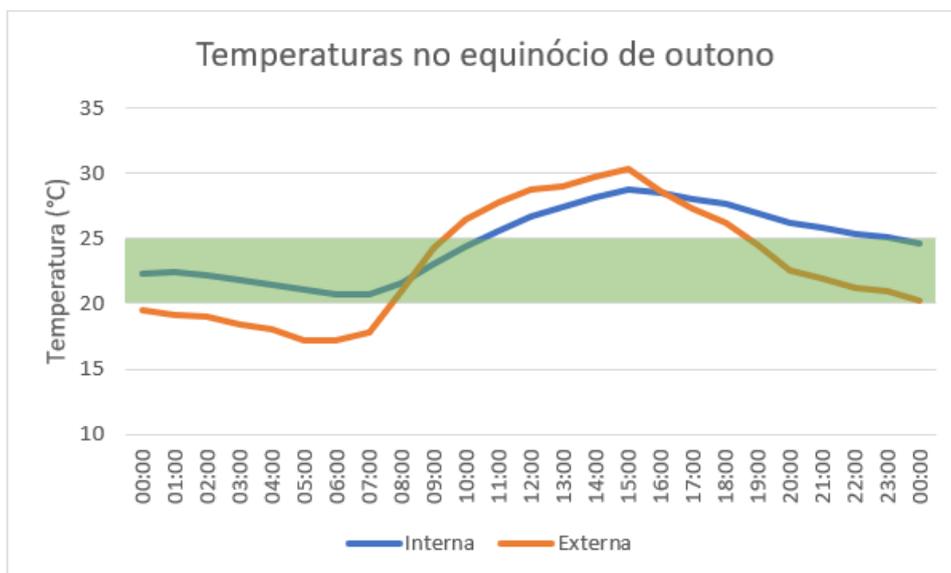


Figura 4-8: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação I na cidade de Brasília

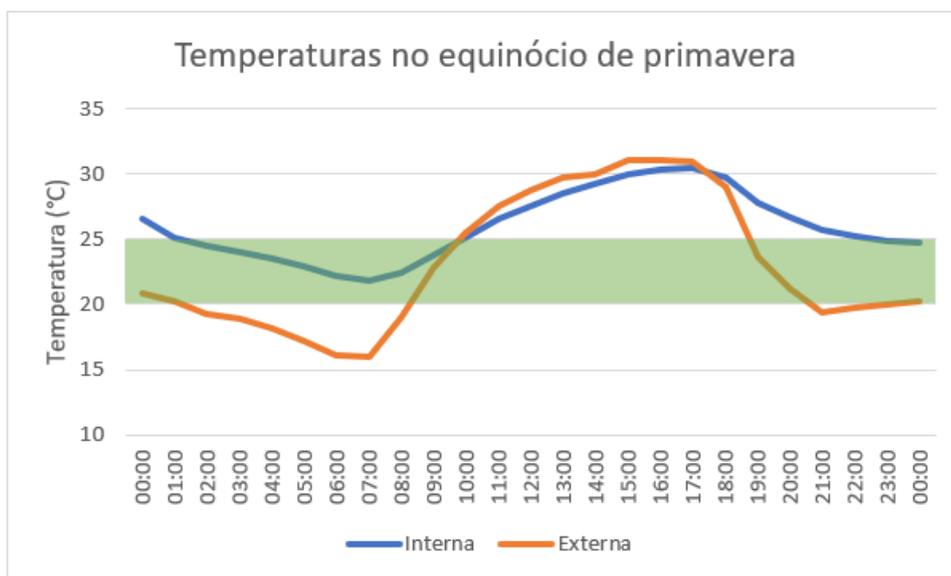


Figura 4-9: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação I na cidade de Brasília

Ao analisar as Figura 4-8 e Figura 4-9, percebe-se que no equinócio de outono há um certo equilíbrio entre a quantidade de horas do dia em que o edifício se encontra no estado de conforto térmico e os momentos em que não está, onde esse desconforto se inicia no perto do começo do período da tarde e vai até quase o fim do dia, às 22h00. Já no equinócio de primavera, percebe-se uma diferença acentuada das temperaturas interna e externa tanto no começo quanto no fim do dia, mas que ainda por quase metade do dia esteve dentro dos limites de conforto térmico. (de 01h00 até 10h00 e de 22h00 até 23h59)

A Figura 4-10 apresenta o resultado gráfico da aplicação do modelo de conforto térmico proposto pela EN 15251.

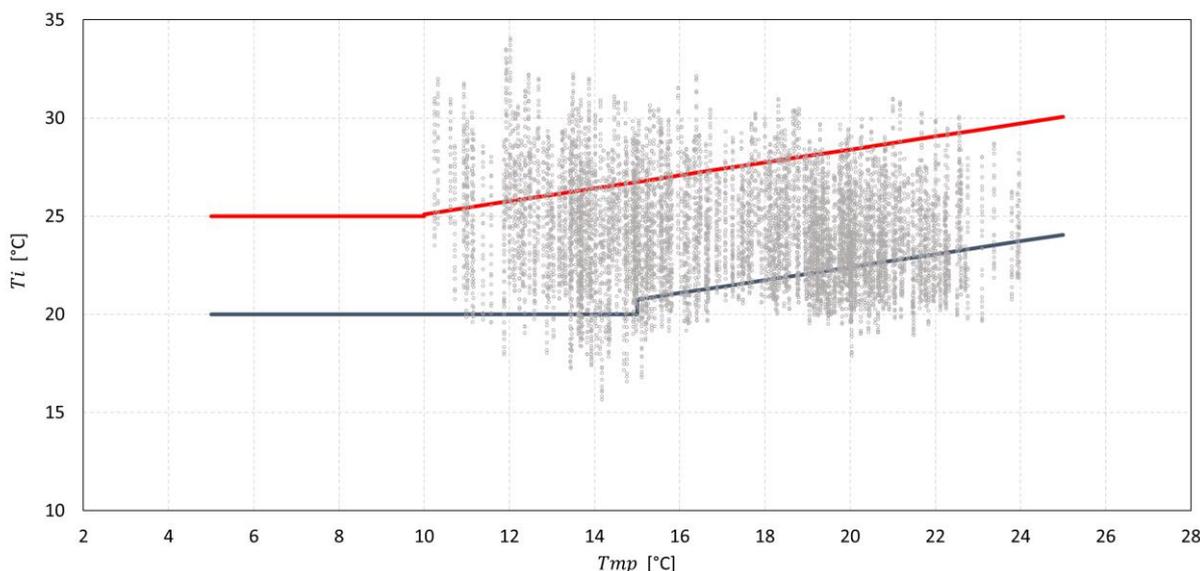


Figura 4-10: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação I na cidade de Brasília

Através do cálculo e da análise da Figura 4-10, que utiliza dois indicadores para sua construção, o primeiro indicando as médias das temperaturas abaixo ou acima dos limites inferiores e superiores de conforto térmico, respectivamente e o segundo, a porcentagem de dias ao longo do ano que o edifício passou em desconforto térmico por frio ou sobreaquecimento, constata-se no cenário de simulação I, onde não há o uso de elementos de sombreamento, a média de 1,13°C abaixo do limite inferior de conforto, de 20°C e a média de 1,86°C acima do limite superior, de 25°C.

A partir desses valores, é possível constatar que durante 19,93% do ano o edifício passa em desconforto por frio e em 16,28% em desconforto por sobreaquecimento, restando 63,79% do ano em que este passa em temperaturas dentro dos limites de conforto.

4.2.1.3 Picos

As Figura 4-11 e Figura 4-12 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos solstícios de verão, 21 de dezembro e inverno, 21 de junho, respectivamente, para a cidade de Picos.

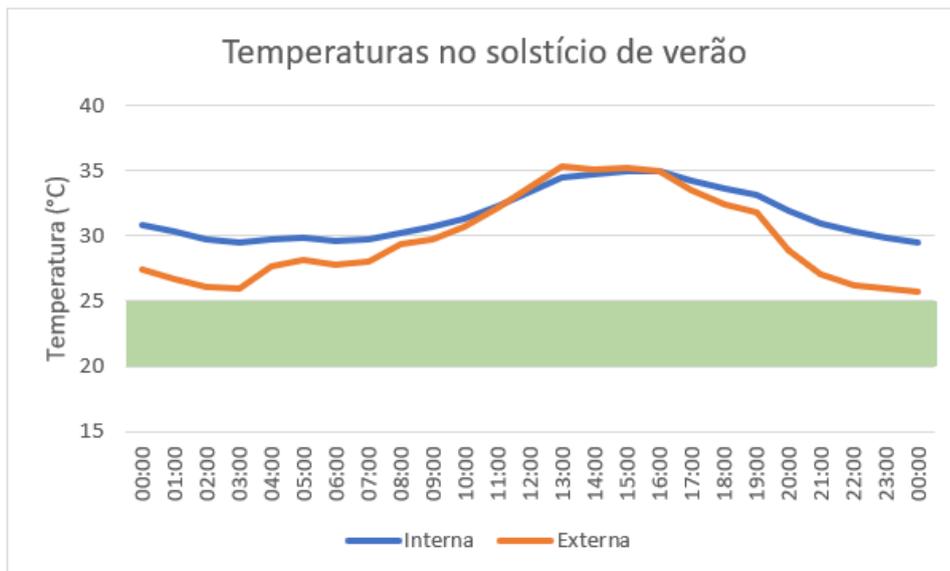


Figura 4-11: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação I na cidade de Picos

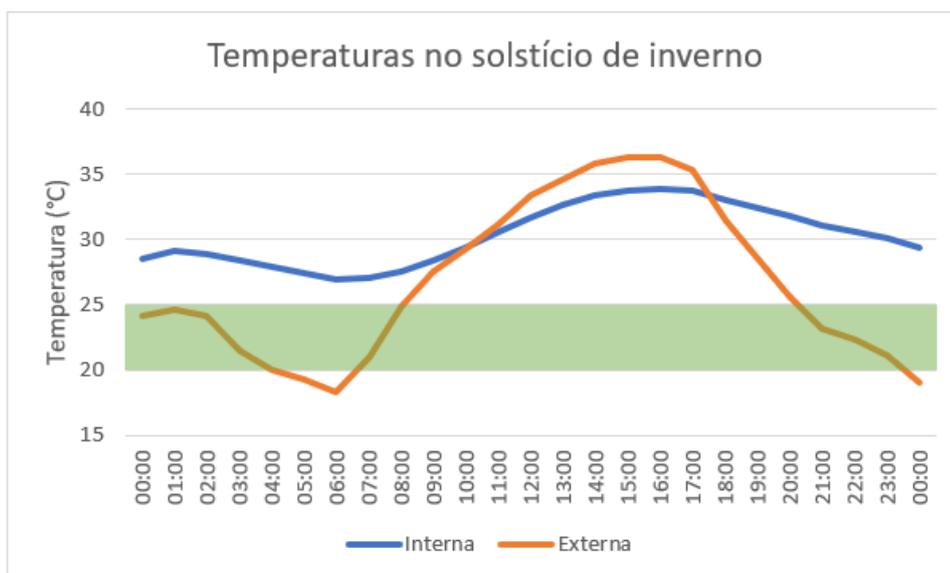


Figura 4-12: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação I na cidade de Picos

Analisando as Figura 4-11 e Figura 4-12, pode-se observar que em Picos, no solstício de verão o edifício passa o dia inteiro em situação de desconforto térmico, atingindo no período da tarde até 10°C acima do limite superior da zona de conforto. No solstício de inverno é possível observar algo parecido. Apesar de as temperaturas internas serem um pouco menores, o edifício também passa o dia todo em desconforto térmico, com suas temperaturas acima do limite superior de conforto. Um fato interessante é que no solstício de inverno a temperatura externa se comporta de forma pouco homogênea, havendo momentos em que esta se encontra em situação de conforto e até em desconforto por frio. Além disso, também é possível perceber claramente que no solstício de inverno, o declínio das temperaturas ao fim do dia se dá por volta do horário do pôr do sol, perto das 17h00.

As Figura 4-13 e Figura 4-14 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos equinócios de outono, em 20 de março e primavera, em 22 de setembro, respectivamente.

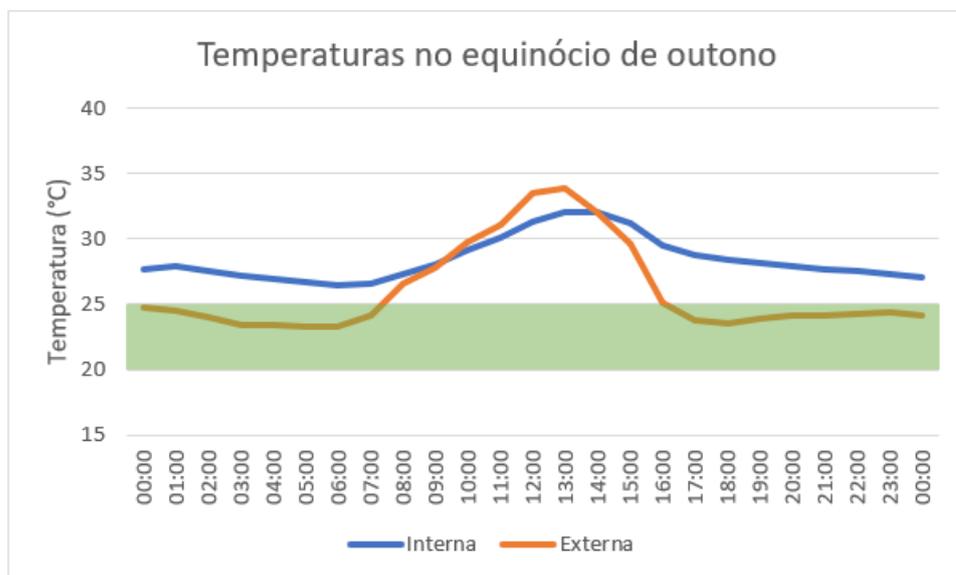


Figura 4-13: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação I na cidade de Picos

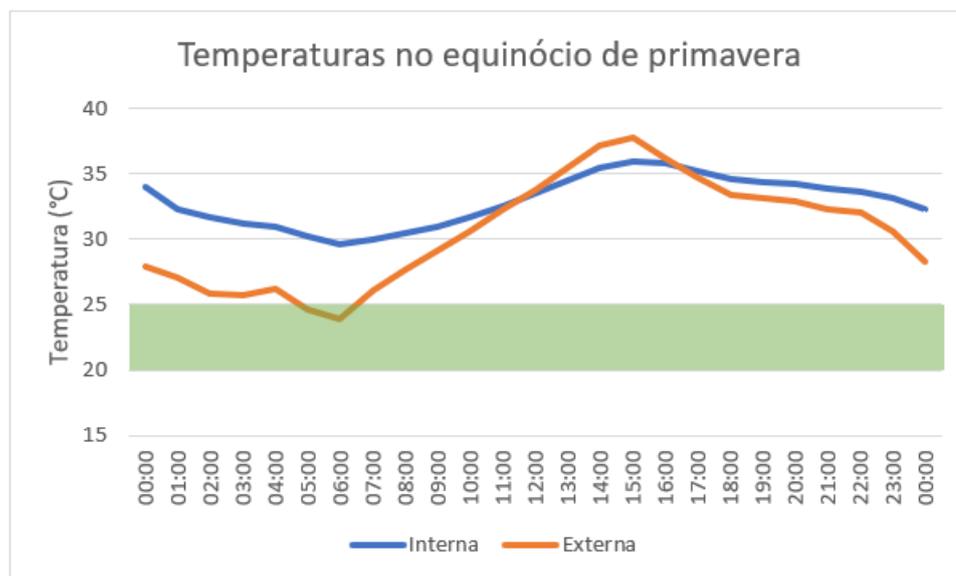


Figura 4-14: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação I na cidade de Picos

Ao analisar as Figura 4-13 e Figura 4-14 percebe-se que assim como nos solstícios, nos equinócios o edifício também passa o dia inteiro em desconforto por sobreaquecimento, havendo momentos em que as temperaturas interna e externa atingem mais de 10°C acima do limite superior de conforto.

A Figura 4-15 apresenta o resultado gráfico da aplicação do modelo de conforto térmico proposto pela EN 15251.

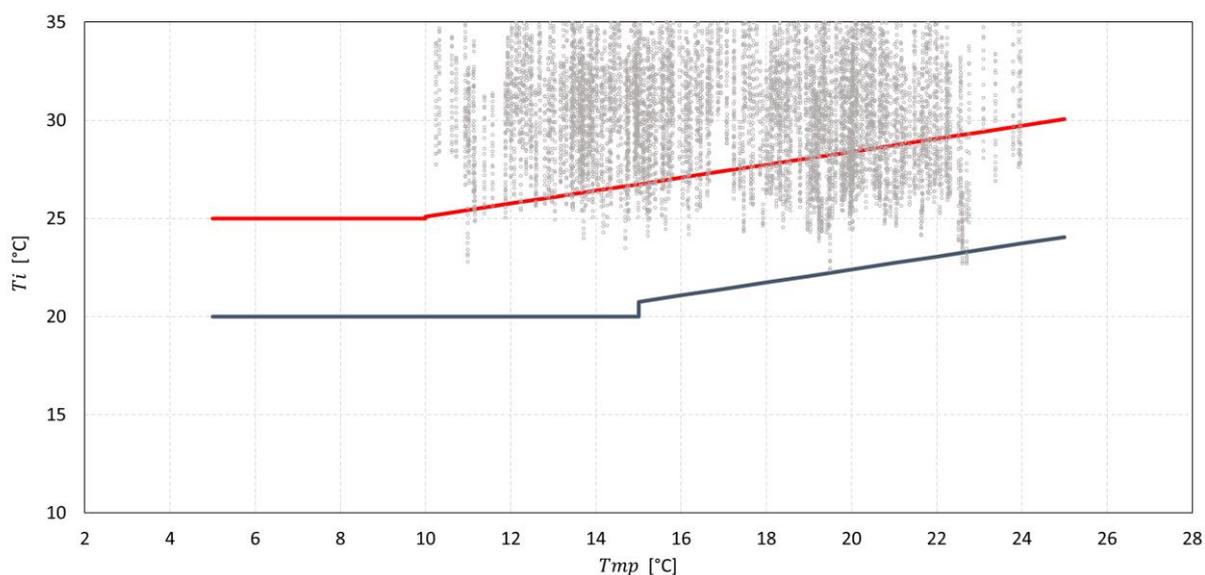


Figura 4-15: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação I na cidade de Picos

Através do cálculo e da análise da Figura 4-15, que utiliza dois indicadores para sua construção, o primeiro indicando as médias das temperaturas abaixo ou acima dos limites inferiores e superiores de conforto térmico, respectivamente e o segundo, a porcentagem de dias ao longo do ano que o edifício passou em desconforto térmico por frio ou sobreaquecimento, constata-se no cenário de simulação I, onde não há o uso de elementos de sombreamento, a média de $0,40^{\circ}\text{C}$ abaixo do limite inferior de conforto, de 20°C e a média de $4,05^{\circ}\text{C}$ acima do limite superior, de 25°C .

A partir desses valores, é possível constatar que durante 0,11% do ano o edifício passa em desconforto por frio e em 79,69% em desconforto por sobreaquecimento, restando 21,20% do ano em que este passa em temperaturas dentro dos limites de conforto.

4.2.2 Simulação do cenário II

O cenário de simulação II representa o estudo de caso com o uso de elementos de sombreamento durante todo o ano.

4.2.2.1 Curitiba

As Figura 4-16 e Figura 4-17 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos solstícios de verão, 21 de dezembro e inverno, 21 de junho, respectivamente, para a cidade de Curitiba.

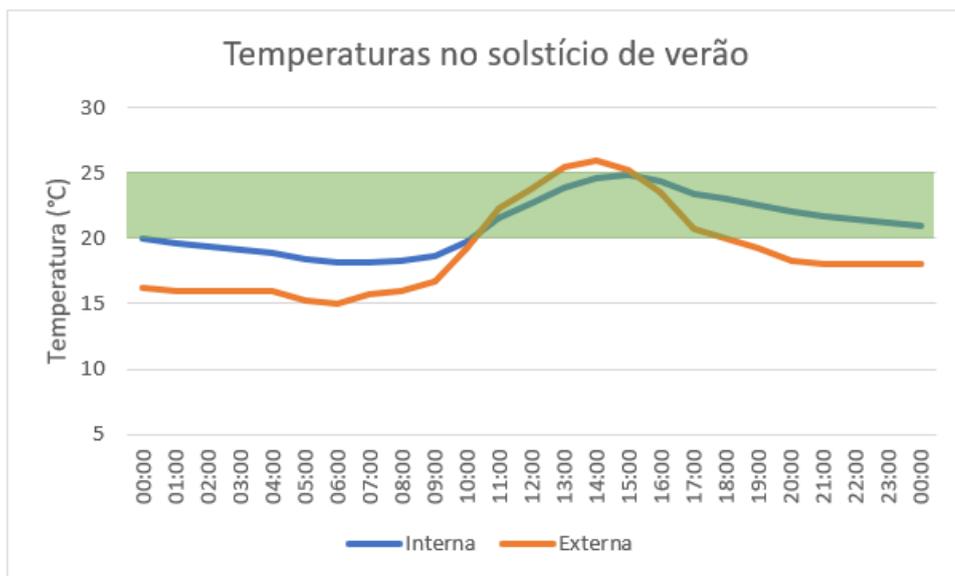


Figura 4-16: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação II na cidade de Curitiba

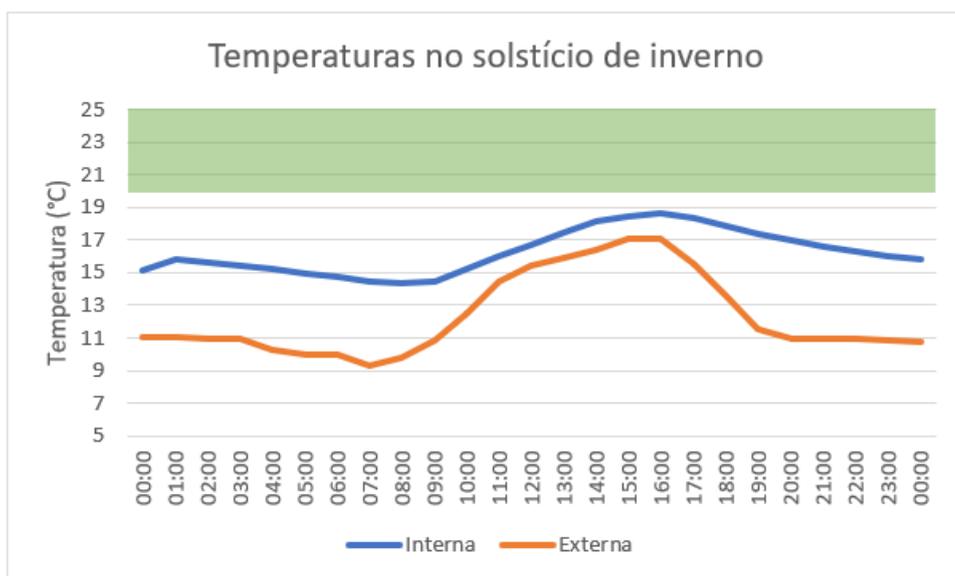


Figura 4-17: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação II na cidade de Curitiba

Analisando as Figura 4-16 e Figura 4-17, pode-se observar que no solstício de verão o edifício passa a maior parte do dia em situação de conforto térmico, atingindo esta entre 10h00 e 11h00 da manhã e se mantendo até o final do dia, mesmo com a temperatura exterior ultrapassando esses limites. Já no solstício de inverno, observa-se o contrário. Em nenhum momento a temperatura interna do edifício se encontra dentro da zona de conforto térmico, mantendo-se sempre abaixo do limite inferior de conforto, mas apesar de ainda estar em situação de desconforto, as temperaturas internas se mantêm maiores que as externas, observando-se também ainda uma diferença mais acentuada entre estas no solstício de inverno do que no solstício de verão, como no cenário I. Também é possível perceber claramente que

no solstício de inverno, o declínio das temperaturas ao fim do dia se dá por volta do horário do pôr do sol, perto das 17h00.

As Figura 4-18 e Figura 4-19 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos equinócios de outono, em 20 de março e primavera, em 22 de setembro, respectivamente.

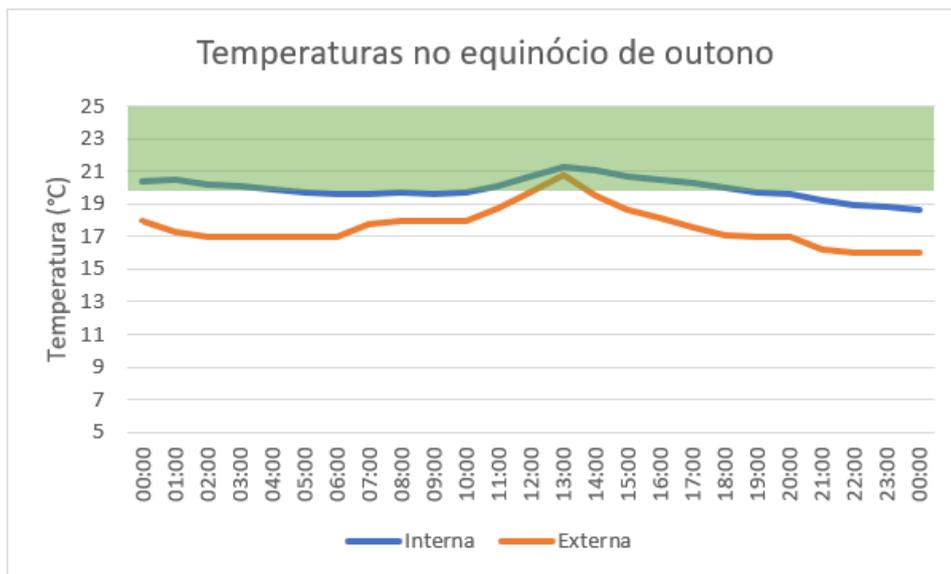


Figura 4-18: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação II na cidade de Curitiba

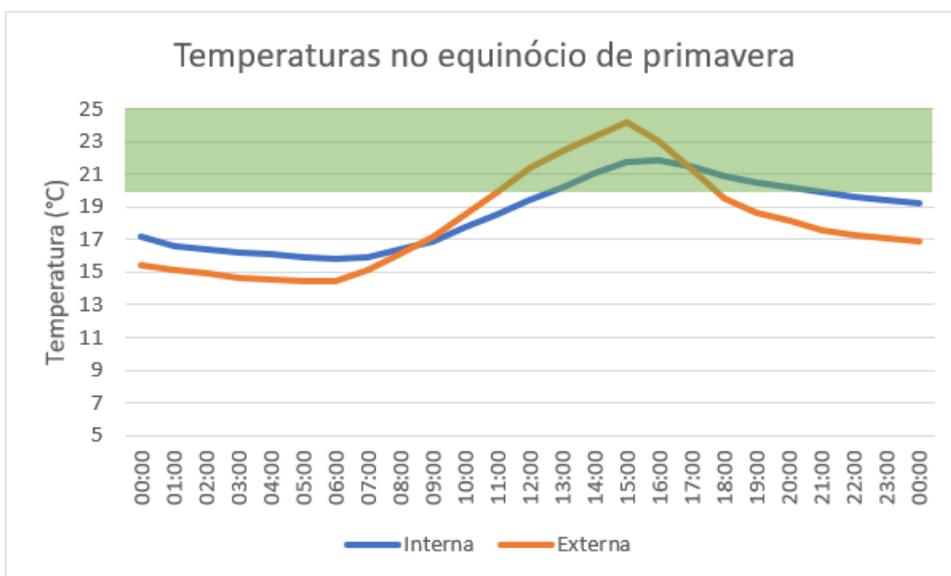


Figura 4-19: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação II na cidade de Curitiba

Ao analisar as Figura 4-18 e Figura 4-19 percebe-se um comportamento parecido, porém mais equilibrado e homogêneo das temperaturas nos equinócios de acordo as estações que as procedem (inverno para o outono e verão para a primavera). Porém, diferente do que foi visto no cenário I ao se comparar os equinócios com os solstícios, nesse cenário de simulação não houve tantos momentos a mais em que a temperatura interna esteve dentro dos limites de

conforto (entre 20 e 25°C), principalmente no equinócio de primavera que atingiu a zona de conforto térmico entre 12h00 e 13h00 e se manteve apenas até por volta de 21h00. Além disso, apesar das temperaturas atingidas no equinócio de outono estarem bem próximas da zona de conforto, poucas horas do dia estas estiveram confortáveis.

A Figura 4-20 apresenta o resultado gráfico da aplicação do modelo de conforto térmico proposto pela EN 15251.

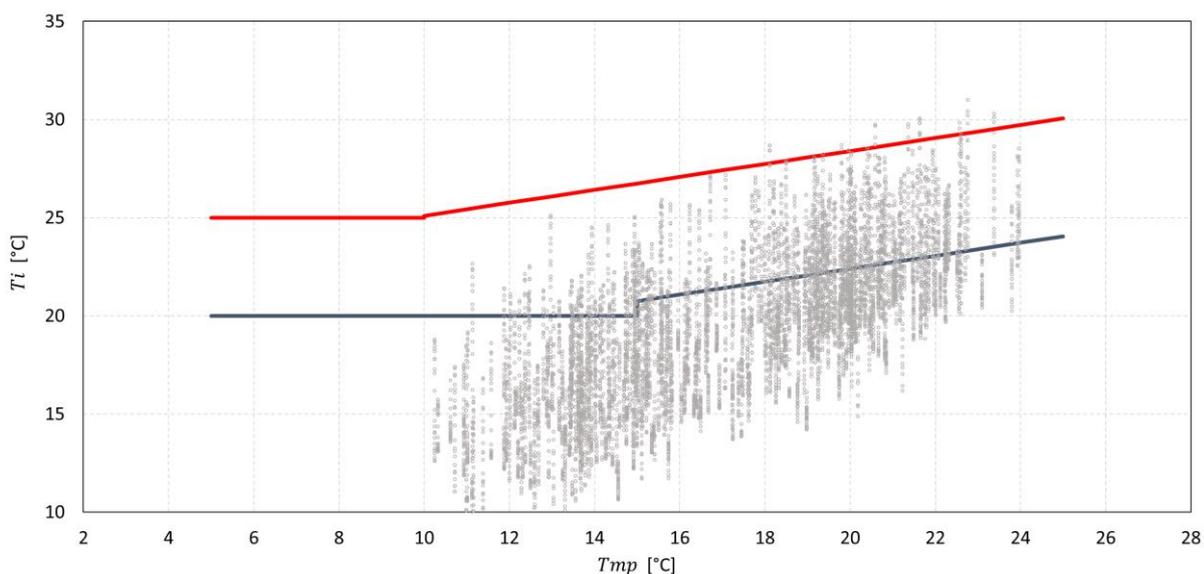


Figura 4-20: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação II na cidade de Curitiba

Através do cálculo e da análise da Figura 4-20, que utiliza dois indicadores para sua construção, o primeiro indicando as médias das temperaturas abaixo ou acima dos limites inferiores e superiores de conforto térmico, respectivamente e o segundo, a porcentagem de dias ao longo do ano que o edifício passou em desconforto térmico por frio ou sobreaquecimento, constata-se no cenário de simulação II, onde há o uso de elementos de sombreamento durante todo o ano, a média de 3,5°C abaixo do limite inferior de conforto, de 20°C e a média de 0,60°C acima do limite superior, de 25°C.

A partir desses valores, é possível constatar que durante 73,18% do ano o edifício passa em desconforto por frio e em 0,40% em desconforto por sobreaquecimento, restando 26,42% do ano em que este passa em temperaturas dentro dos limites de conforto.

4.2.2.2 Brasília

As Figura 4-21 e Figura 4-22 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos solstícios de verão, 21 de dezembro e inverno, 21 de junho, respectivamente, para a cidade de Brasília.

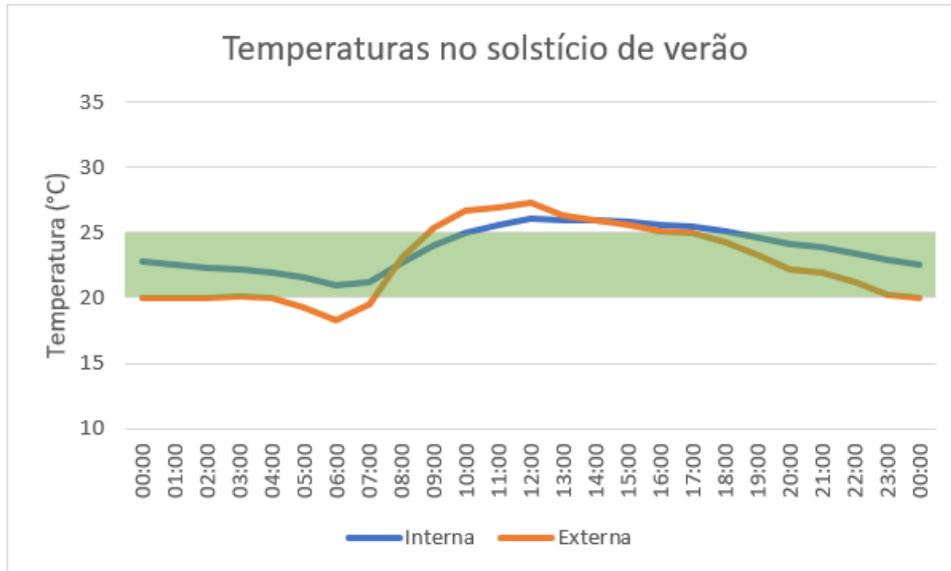


Figura 4-21: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação II na cidade de Brasília

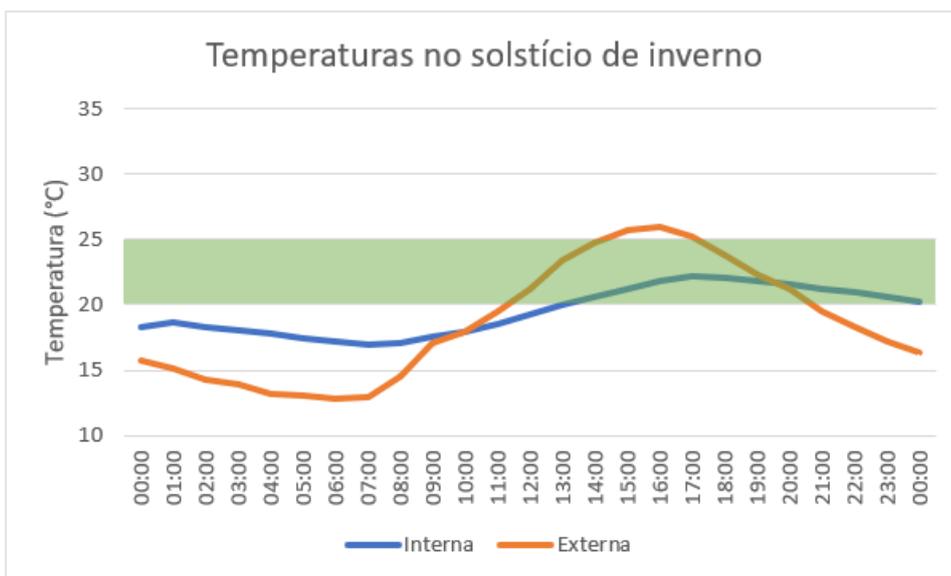


Figura 4-22: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação II na cidade de Brasília

Analisando as Figura 4-21 e Figura 4-22 e assim como no cenário I, pode-se observar que no solstício de verão o edifício passa a maior parte do dia em situação de conforto térmico, já começando o dia em conforto e se mantendo até pouco depois das 10h00 da manhã e voltando a essa faixa por volta das 18h00 e se mantendo até o final do dia. Já no solstício de inverno, diferente do cenário I, que o edifício atinge o conforto perto das 11h00, no cenário II percebe-se que essa condição só é atingida entre 13h00 e 14h00, podendo observar também que nesse cenário há uma diminuição das temperaturas nesta data ao se comparar com o primeiro cenário. Assim como no cenário I, no primeiro terço do dia do solstício de inverno, observa-se também que as temperaturas interna e externa possuem uma diferença acentuada, onde a

temperatura interna, apesar de estar em condição de desconforto por frio, está mais próxima de atingir a zona de conforto.

As Figura 4-23 e Figura 4-24 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos equinócios de outono, em 20 de março e primavera, em 22 de setembro, respectivamente.

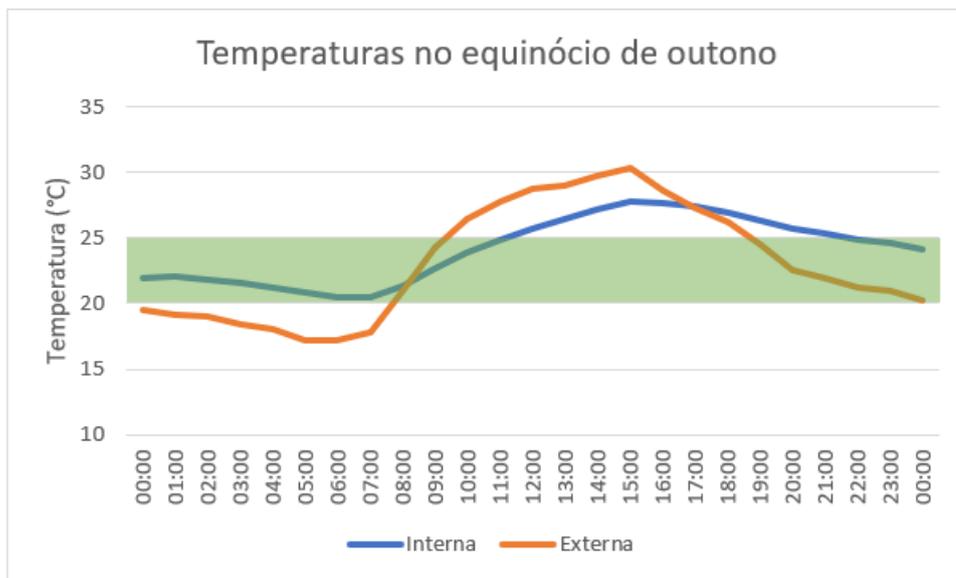


Figura 4-23: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação II na cidade de Brasília

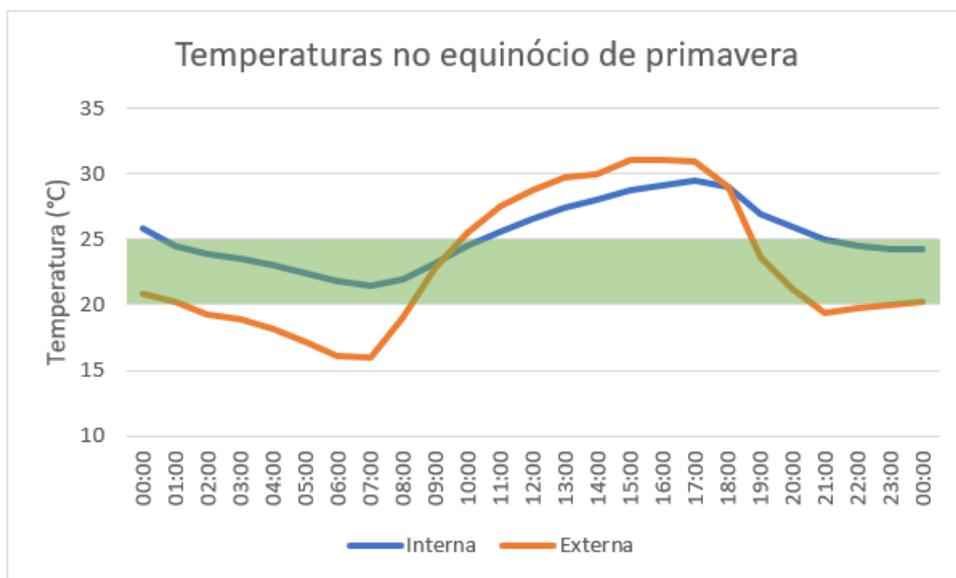


Figura 4-24: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação II na cidade de Brasília

Ao analisar as Figura 4-23 e Figura 4-24 e, novamente, como no cenário I, percebe-se que no equinócio de outono há um certo equilíbrio entre a quantidade de horas do dia em que o edifício se encontra no estado de conforto térmico e os momentos em que não está, onde esse desconforto se inicia no perto do começo do período da tarde e vai até quase o fim do dia, às

22h00. Já no equinócio de primavera, percebe-se uma diferença acentuada das temperaturas interna e externa tanto no começo quanto no fim do dia, mas que ainda por quase metade do dia esteve dentro dos limites de conforto térmico. (de 01h00 até 10h00 e de 22h00 até 23h59).

Outro ponto a se observar em comparação com o cenário I é a diminuição das temperaturas internas, apesar do comportamento ser bastante parecido. Tal diminuição é, de certa forma, esperada, uma vez que no cenário II os elementos de sombreamento são utilizados durante todo o ano.

A Figura 4-25 apresenta o resultado gráfico da aplicação do modelo de conforto térmico proposto pela EN 15251.

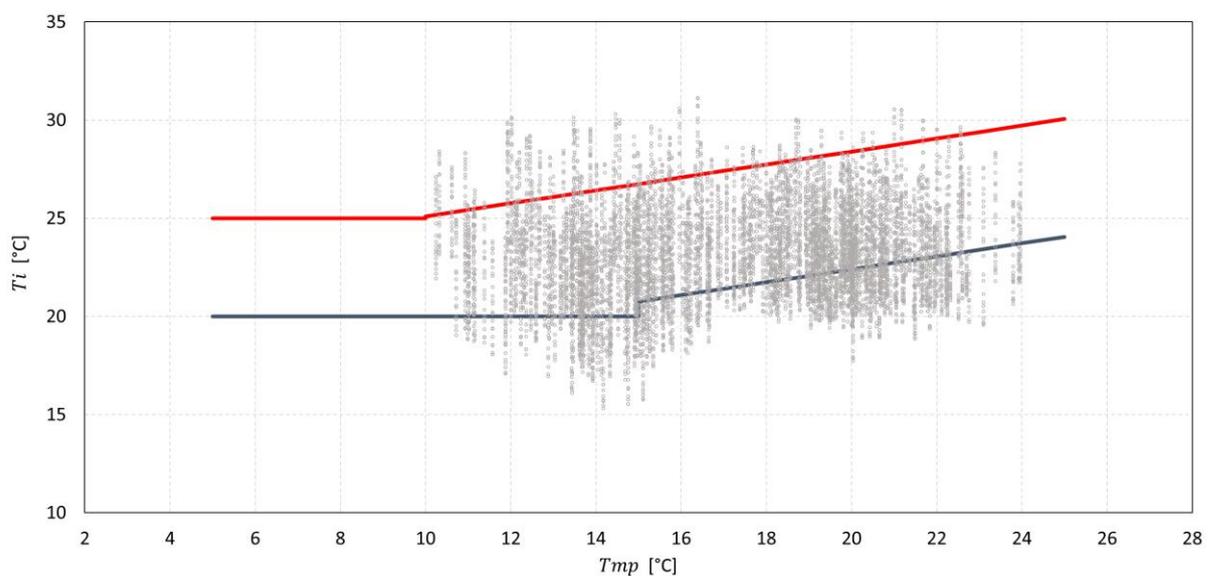


Figura 4-25: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação II na cidade de Brasília

Através do cálculo e da análise da Figura 4-25, que utiliza dois indicadores para sua construção, o primeiro indicando as médias das temperaturas abaixo ou acima dos limites inferiores e superiores de conforto térmico, respectivamente e o segundo, a porcentagem de dias ao longo do ano que o edifício passou em desconforto térmico por frio ou sobreaquecimento, constata-se no cenário de simulação II, onde há o uso de elementos de sombreamento durante todo o ano, a média de 1,24°C abaixo do limite inferior de conforto, de 20°C e a média de 1,35°C acima do limite superior, de 25°C.

A partir desses valores, é possível constatar que durante 27,23% do ano o edifício passa em desconforto por frio e em 6,05% em desconforto por sobreaquecimento, restando 66,72% do ano em que este passa em temperaturas dentro dos limites de conforto.

4.2.2.3 Picos

As Figura 4-26 e Figura 4-27 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos solstícios de verão, 21 de dezembro e inverno, 21 de junho, respectivamente, para a cidade de Picos.

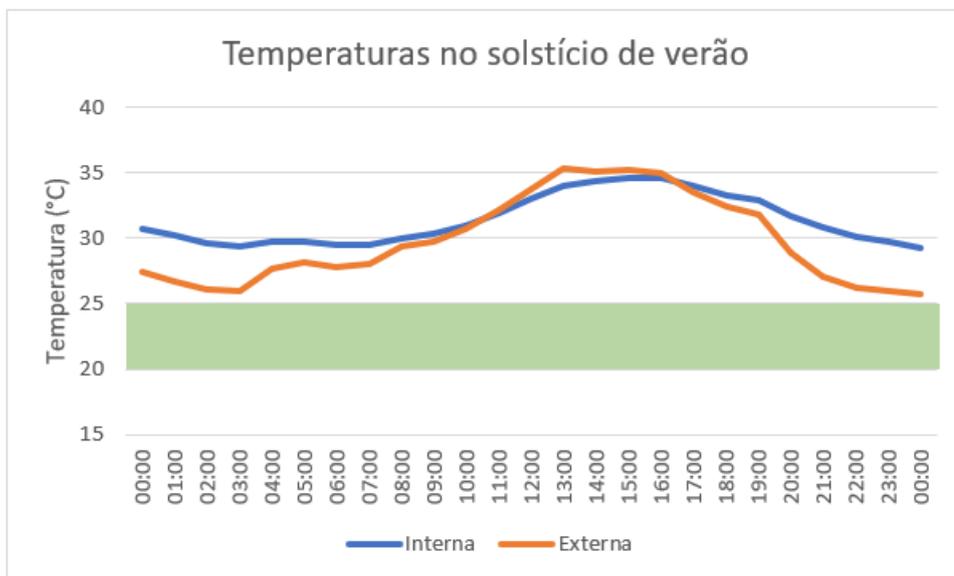


Figura 4-26: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação II na cidade de Picos

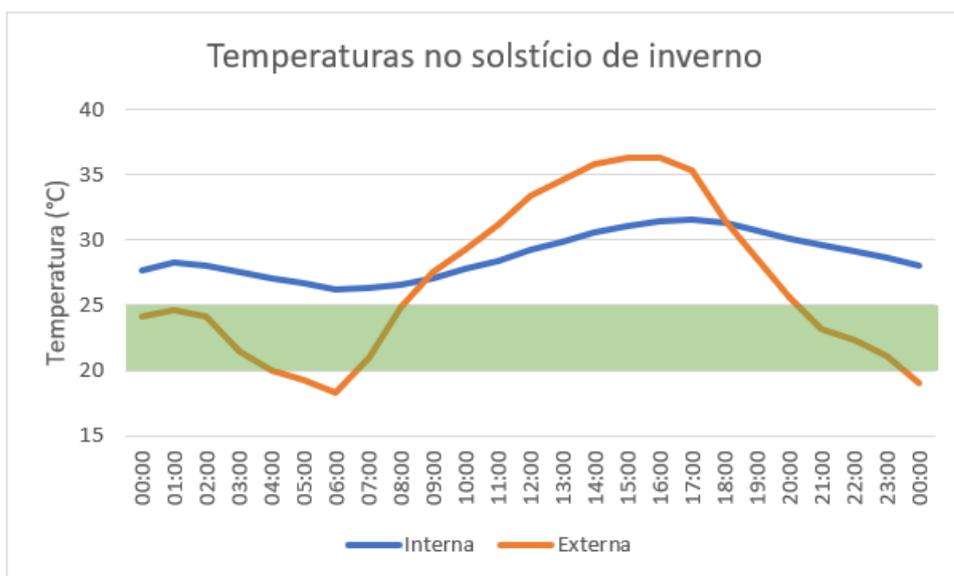


Figura 4-27: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação II na cidade de Picos

Analisando as Figura 4-26 e Figura 4-27, pode-se observar que em Picos, no solstício de verão o edifício passa o dia inteiro em situação de desconforto térmico, atingindo no período da tarde até 10°C acima do limite superior da zona de conforto, com uma leve diminuição da temperatura interna no período da tarde, em comparação com o cenário I. No solstício de inverno é possível observar algo parecido. Apesar de as temperaturas internas serem um pouco menores, o edifício também passa o dia todo em desconforto térmico, com suas temperaturas acima do limite superior de conforto. É possível observar também o efeito do uso dos elementos de sombreamento. Ao se comparar a mesma data com o cenário I, percebe-se que no cenário II, no período da tarde, há uma diferença de até 3°C entre as temperaturas interna dos dois cenários.

As Figura 4-28 e Figura 4-29 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos equinócios de outono, em 20 de março e primavera, em 22 de setembro, respectivamente.

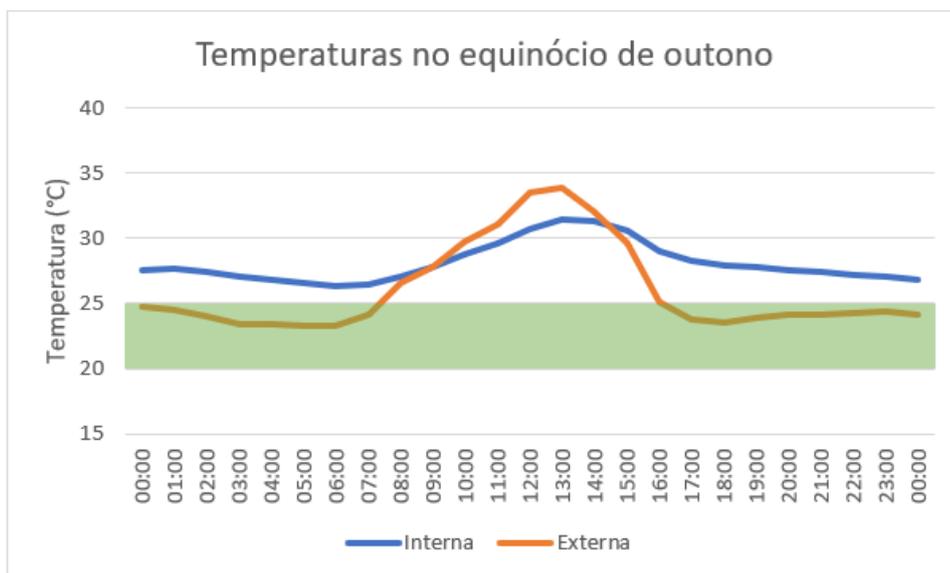


Figura 4-28: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação II na cidade de Picos

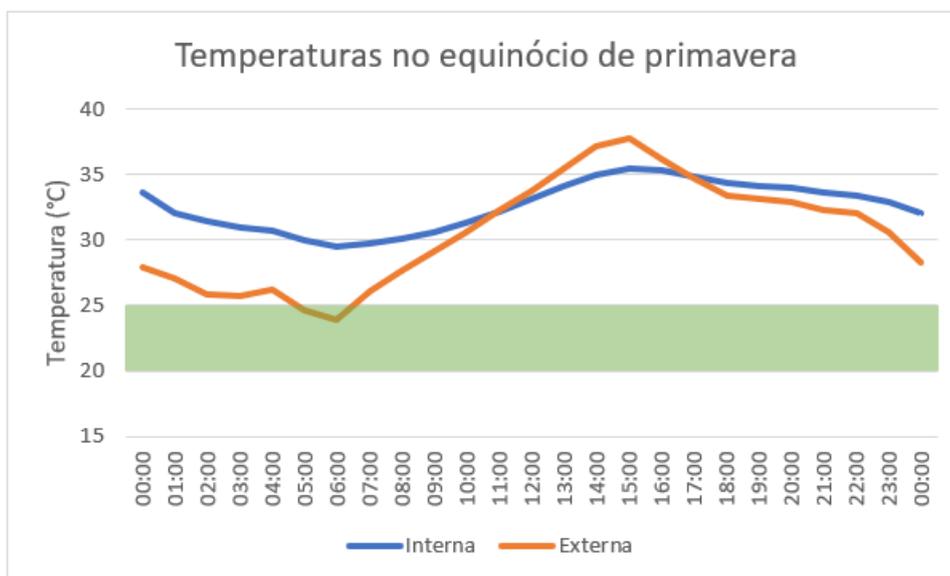


Figura 4-29: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação II na cidade de Picos

Ao analisar as Figura 4-28 e Figura 4-29 percebe-se que assim como nos solstícios, nos equinócios o edifício também passa o dia inteiro em desconforto por sobreaquecimento, havendo momentos em que as temperaturas interna e externa atingem mais de 10°C acima do limite superior de conforto. Mas diferente do que se pode constatar nos solstícios ao se comparar com o primeiro cenário, nos equinócios praticamente não há diminuição das temperaturas internas de um cenário para o outro.

A Figura 4-30 apresenta o resultado gráfico da aplicação do modelo de conforto térmico proposto pela EN 15251.

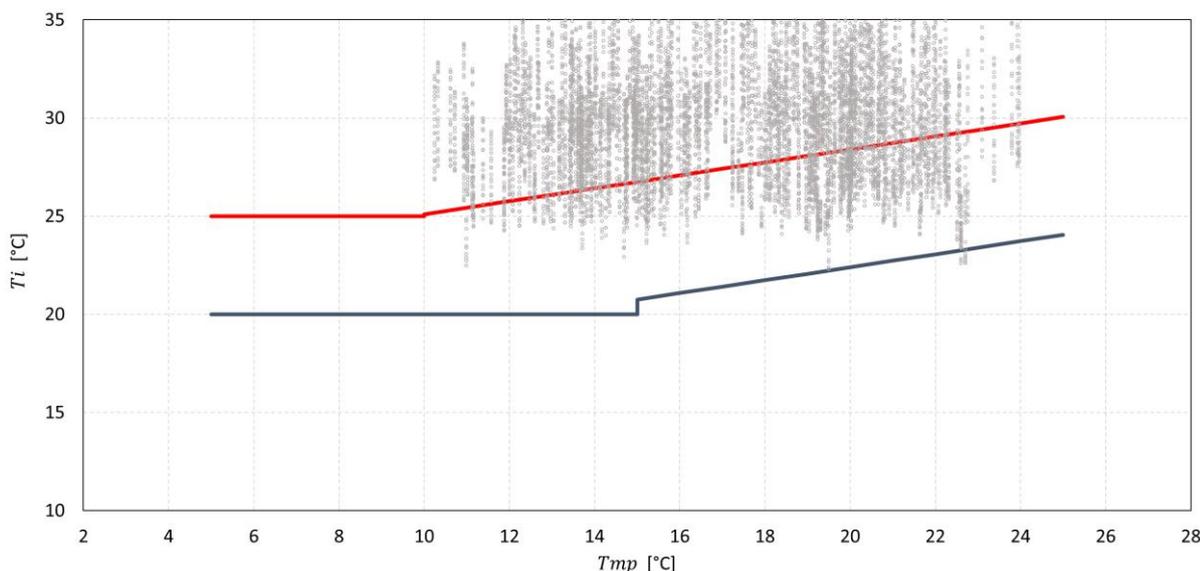


Figura 4-30: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação II na cidade de Picos

Através do cálculo e da análise da Figura 4-30, que utiliza dois indicadores para sua construção, o primeiro indicando as médias das temperaturas abaixo ou acima dos limites inferiores e superiores de conforto térmico, respectivamente e o segundo, a porcentagem de dias ao longo do ano que o edifício passou em desconforto térmico por frio ou sobreaquecimento, constata-se no cenário de simulação II, onde há o uso de elementos de sombreamento durante todo o ano, a média de $0,51^{\circ}\text{C}$ abaixo do limite inferior de conforto, de 20°C e a média de $3,55^{\circ}\text{C}$ acima do limite superior, de 25°C .

A partir desses valores, é possível constatar que durante 0,11% do ano o edifício passa em desconforto por frio e em 74,89% em desconforto por sobreaquecimento, restando 25,0% do ano em que este passa em temperaturas dentro dos limites de conforto.

4.2.3 Simulação do cenário III

O cenário de simulação III representa o estudo de caso com o uso de elementos de sombreamento apenas no período de verão.

4.2.3.1 Curitiba

As Figura 4-31 e Figura 4-32 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos solstícios de verão, 21 de dezembro e inverno, 21 de junho, respectivamente, para a cidade de Curitiba.

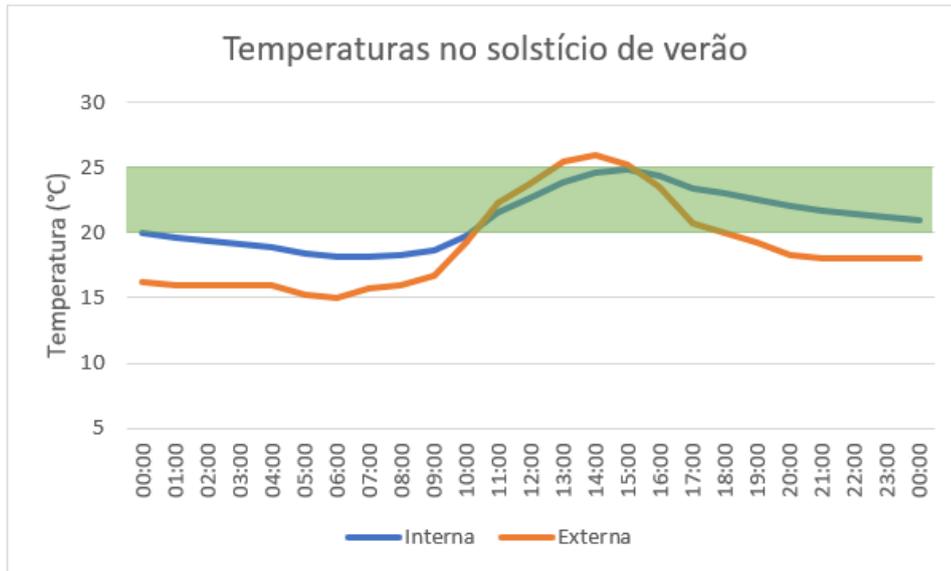


Figura 4-31: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação III na cidade de Curitiba

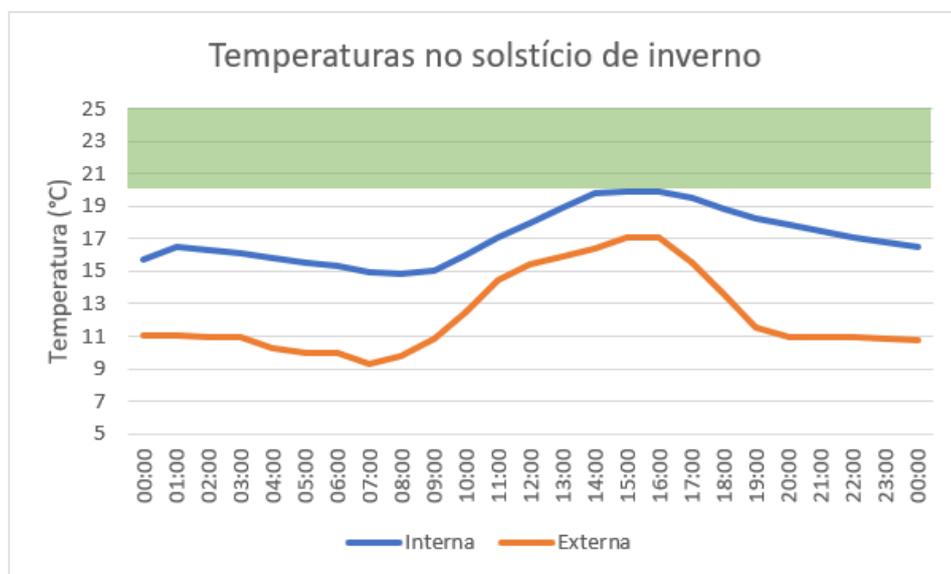


Figura 4-32: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação III na cidade de Curitiba

Analisando as Figura 4-31 e Figura 4-32, assim como nos cenários anteriores, observa-se que no solstício de verão o edifício passa a maior parte do dia em situação de conforto térmico, atingindo esta perto das 11h00 da manhã e se mantendo até o final do dia, mesmo com a temperatura exterior ultrapassando esses limites em certo momento do dia. No solstício de inverno pode-se observar o contrário. O edifício passa praticamente o dia todo em desconforto térmico, com suas temperaturas abaixo do limite inferior de conforto onde apenas num breve momento de duração no período da tarde em que esta parece atingir a zona de conforto térmico. De qualquer maneira, apesar de ainda estar em situação de desconforto, as temperaturas internas se mantêm maiores que as externas, observando-se também uma diferença mais acentuada entre estas no solstício de inverno do que no solstício de verão.

Assim como nos outros cenários, também é possível perceber claramente que no solstício de inverno, o declínio das temperaturas ao fim do dia se dá por volta do horário do pôr do sol, perto das 17h00.

As Figura 4-33 e Figura 4-34 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos equinócios de outono, em 20 de março e primavera, em 22 de setembro, respectivamente.

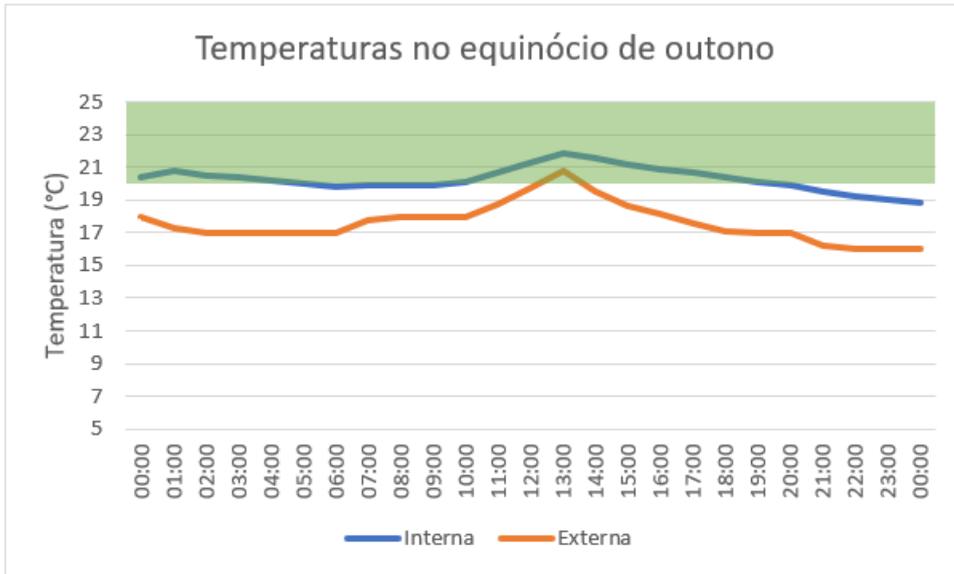


Figura 4-33: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação III na cidade de Curitiba

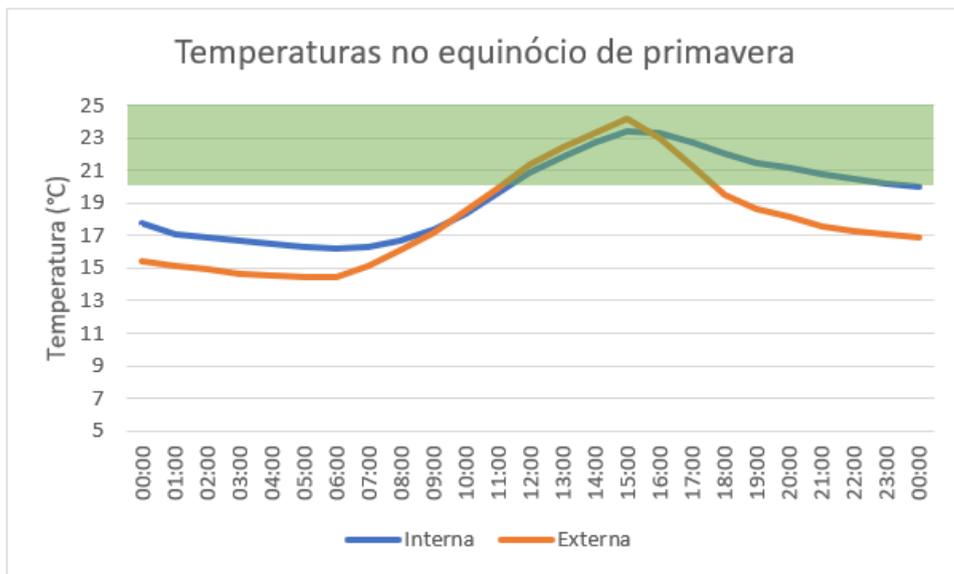


Figura 4-34: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação III na cidade de Curitiba

Ao analisar as Figura 4-33 e Figura 4-34, como esperado, percebe-se um comportamento parecido das temperaturas nos equinócios de acordo as estações que as procedem (inverno para o outono e verão para a primavera). Assim como no cenário I, é possível perceber

também que nos equinócios, em comparação com os solstícios, houveram mais momentos em que a temperatura interna esteve dentro dos limites de conforto (entre 20 e 25°C), onde no equinócio de outono o limite inferior de conforto térmico só foi ultrapassado a partir das 20h00 e no equinócio de primavera a zona de conforto foi atingida entre 11h00 e 12h00 e se manteve até o final do dia.

A Figura 4-35 apresenta o resultado gráfico da aplicação do modelo de conforto térmico proposto pela EN 15251.

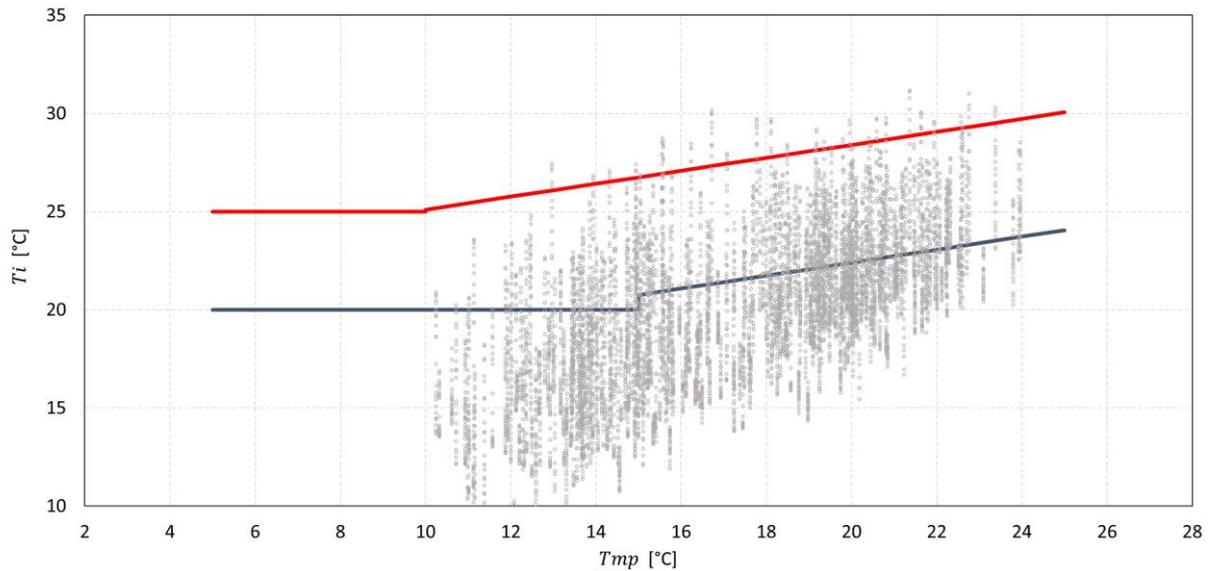


Figura 4-35: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação III na cidade de Curitiba

Através do cálculo e da análise da Figura 4-35, que utiliza dois indicadores para sua construção, o primeiro indicando as médias das temperaturas abaixo ou acima dos limites inferiores e superiores de conforto térmico, respectivamente e o segundo, a porcentagem de dias ao longo do ano que o edifício passou em desconforto térmico por frio ou sobreaquecimento, constata-se no cenário de simulação III, onde há o uso de elementos de sombreamento apenas no período de verão, a média de 3,3°C abaixo do limite inferior de conforto, de 20°C e a média de 0,88°C acima do limite superior, de 25°C.

A partir desses valores, é possível constatar que durante 68,05% do ano o edifício passa em desconforto por frio e em 1,29% em desconforto por sobreaquecimento, restando 30,66% do ano em que este passa em temperaturas dentro dos limites de conforto.

4.2.3.2 Brasília

As Figura 4-36 e Figura 4-37 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos solstícios de verão, 21 de dezembro e inverno, 21 de junho, respectivamente, para a cidade de Brasília.

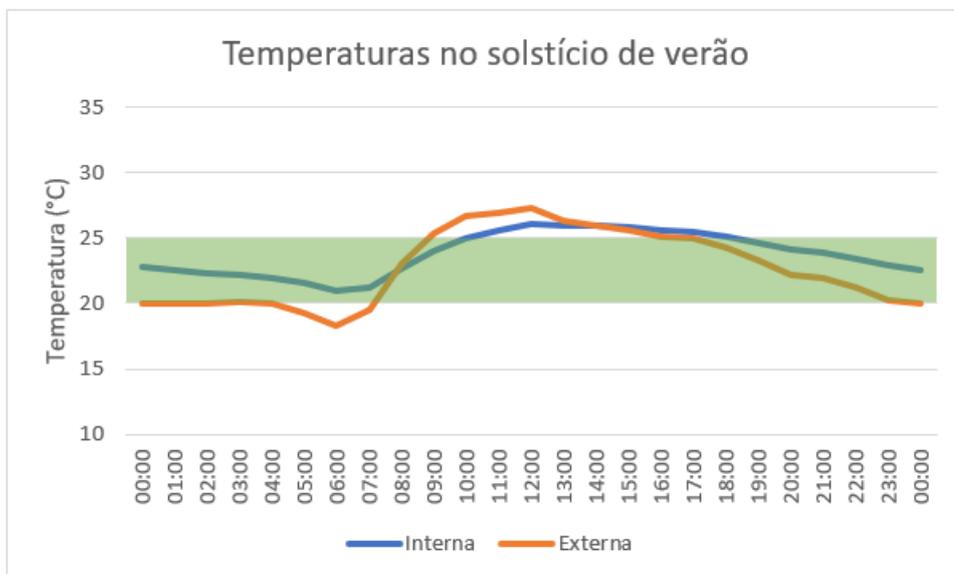


Figura 4-36: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação III na cidade de Brasília

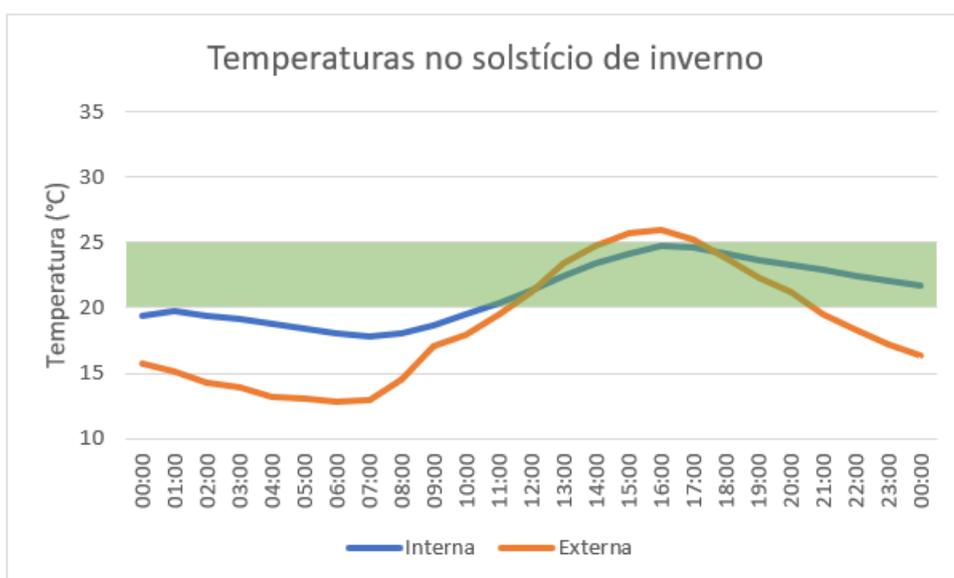


Figura 4-37: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação III na cidade de Brasília

Analisando as Figura 4-36 e Figura 4-37 e assim como no cenário II, pode-se observar que no solstício de verão o edifício passa a maior parte do dia em situação de conforto térmico, já começando o dia em conforto e se mantendo até pouco depois das 10h00 da manhã e voltando a essa faixa por volta das 18h00 e se mantendo até o final do dia. Já no solstício de inverno, assim como no cenário I, o edifício passa também a maior parte do dia em situação de conforto térmico, atingindo-o perto das 11h00 da manhã e se mantendo até o final do dia. Tal comportamento similar se justifica pelo fato de que no cenário III não há uso de elementos de sombreamento no inverno, assim como no cenário I.

As Figura 4-38 e Figura 4-39 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos equinócios de outono, em 20 de março e primavera, em 22 de setembro, respectivamente.

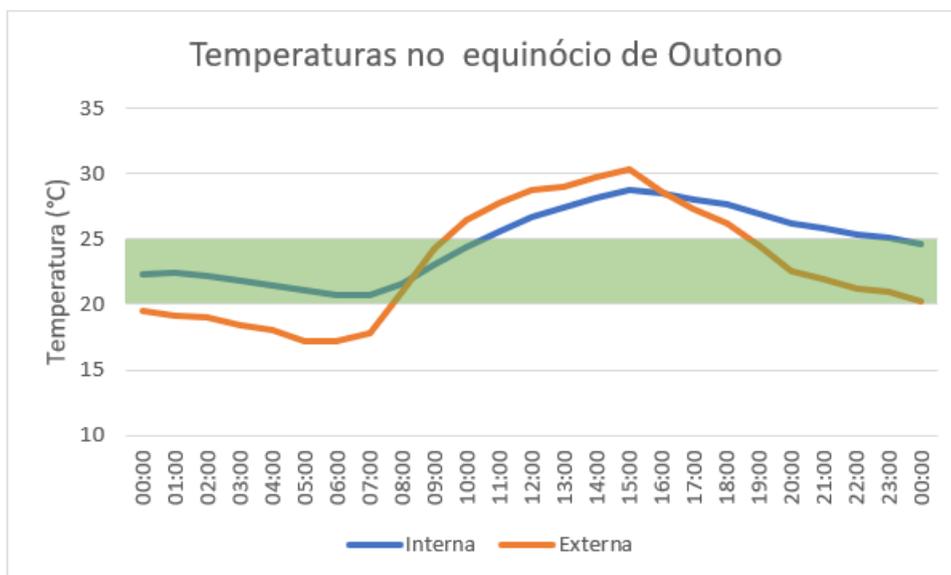


Figura 4-38: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação III na cidade de Brasília

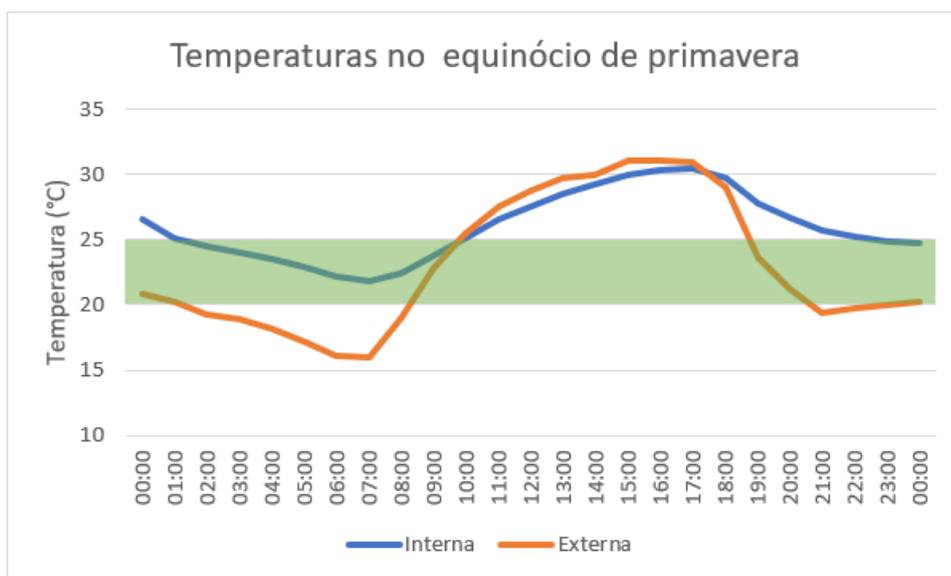


Figura 4-39: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação III na cidade de Brasília

Ao analisar as Figura 4-38 e Figura 4-39, percebe-se o mesmo comportamento do cenário I, ou seja, no equinócio de outono há um certo equilíbrio entre a quantidade de horas do dia em que o edifício se encontra no estado de conforto térmico e os momentos em que não está, onde esse desconforto se inicia no perto do começo do período da tarde e vai até quase o fim do dia, às 22h00. No equinócio de primavera, percebe-se uma diferença acentuada das temperaturas interna e externa tanto no começo quanto no fim do dia, mas que ainda por quase metade do dia esteve dentro dos limites de conforto térmico. (de 01h00 até 10h00 e de

22h00 até 23h59). Esse mesmo comportamento dos dois cenários se justifica pelo fato de que no cenário III também não há uso de elementos de sombreamento no outono e na primavera, assim como no cenário I.

A Figura 4-40 apresenta o resultado gráfico da aplicação do modelo de conforto térmico proposto pela EN 15251.

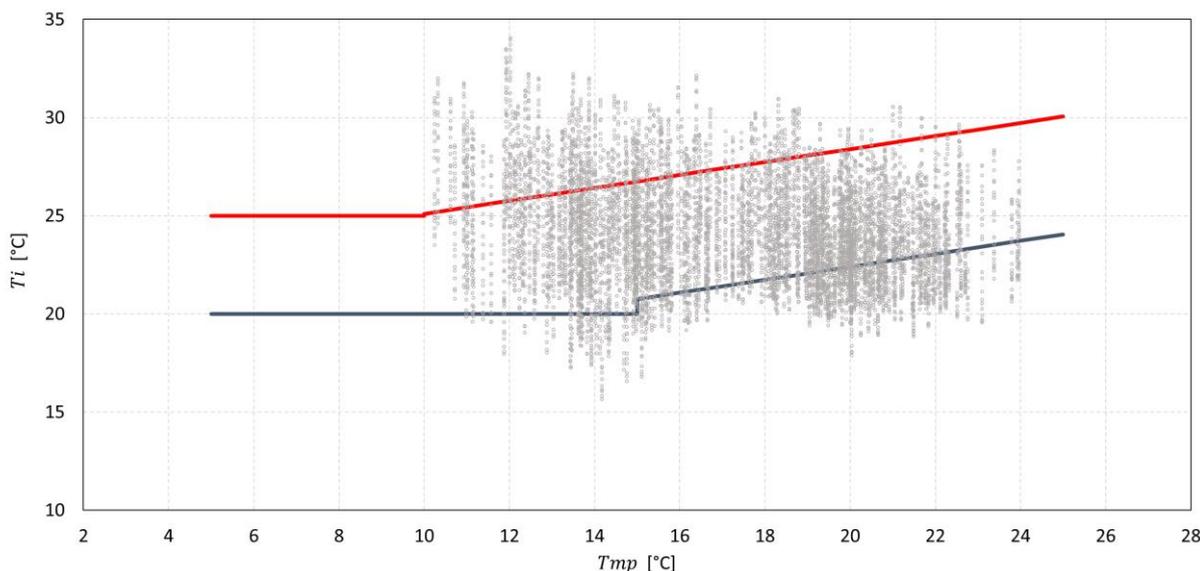


Figura 4-40: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação III na cidade de Brasília

Através do cálculo e da análise da Figura 4-40, que utiliza dois indicadores para sua construção, o primeiro indicando as médias das temperaturas abaixo ou acima dos limites inferiores e superiores de conforto térmico, respectivamente e o segundo, a porcentagem de dias ao longo do ano que o edifício passou em desconforto térmico por frio ou sobreaquecimento, constata-se no cenário de simulação III, onde há o uso de elementos de sombreamento apenas no período de verão, a média de 1,16°C abaixo do limite inferior de conforto, de 20°C e a média de 1,87°C acima do limite superior, de 25°C.

A partir desses valores, é possível constatar que durante 20,79% do ano o edifício passa em desconforto por frio e em 15,99% em desconforto por sobreaquecimento, restando 63,22% do ano em que este passa em temperaturas dentro dos limites de conforto.

4.2.3.3 Picos

As Figura 4-41 e Figura 4-42 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos solstícios de verão, 21 de dezembro e inverno, 21 de junho, respectivamente, para a cidade de Picos.

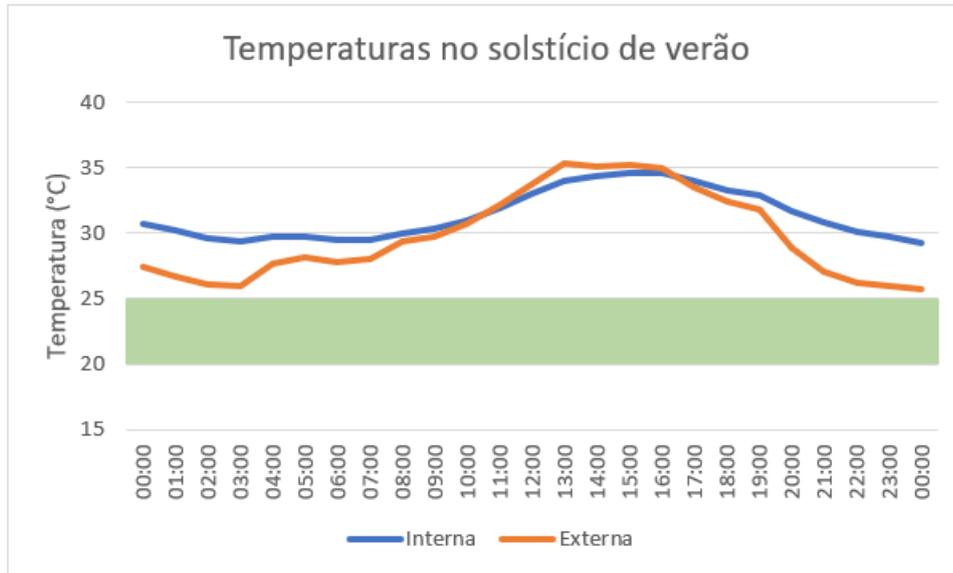


Figura 4-41: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação III na cidade de Picos

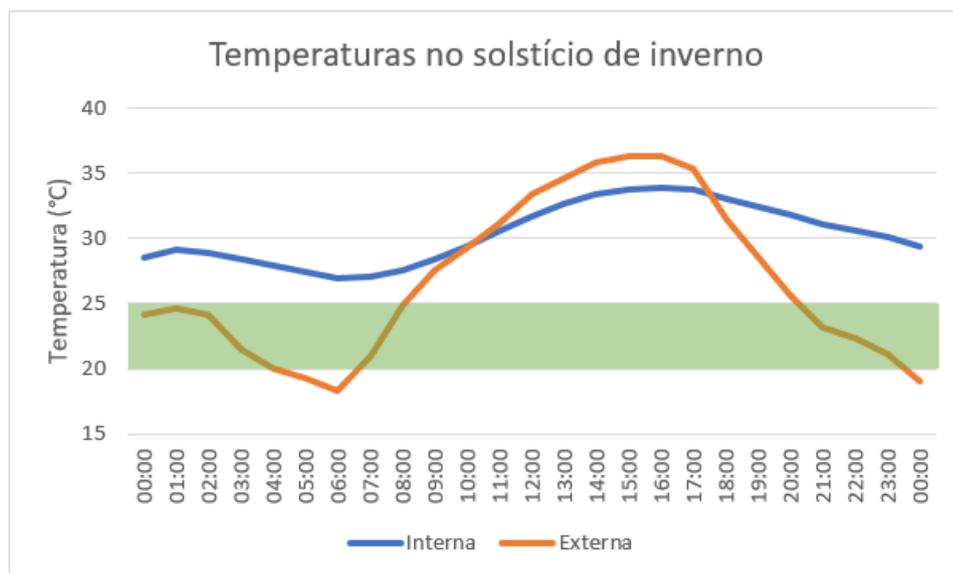


Figura 4-42: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação III na cidade de Picos

Analisando as Figura 4-41 e Figura 4-42, pode-se observar que em Picos, no solstício de verão o edifício passa o dia inteiro em situação de desconforto térmico, atingindo no período da tarde até 10°C acima do limite superior da zona de conforto, com uma leve diminuição da temperatura interna no período da tarde, em comparação com o cenário I, assim como ocorre no cenário II, visto que nos cenários II e III os elementos de sombreamento são utilizados nessa época do ano. No solstício de inverno, assim como nos outros cenários, apesar de as temperaturas internas serem um pouco menores, o edifício também passa o dia todo em desconforto térmico, com suas temperaturas acima do limite superior de conforto.

As Figura 4-43 e Figura 4-44 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos equinócios de outono, em 20 de março e primavera, em 22 de setembro, respectivamente.

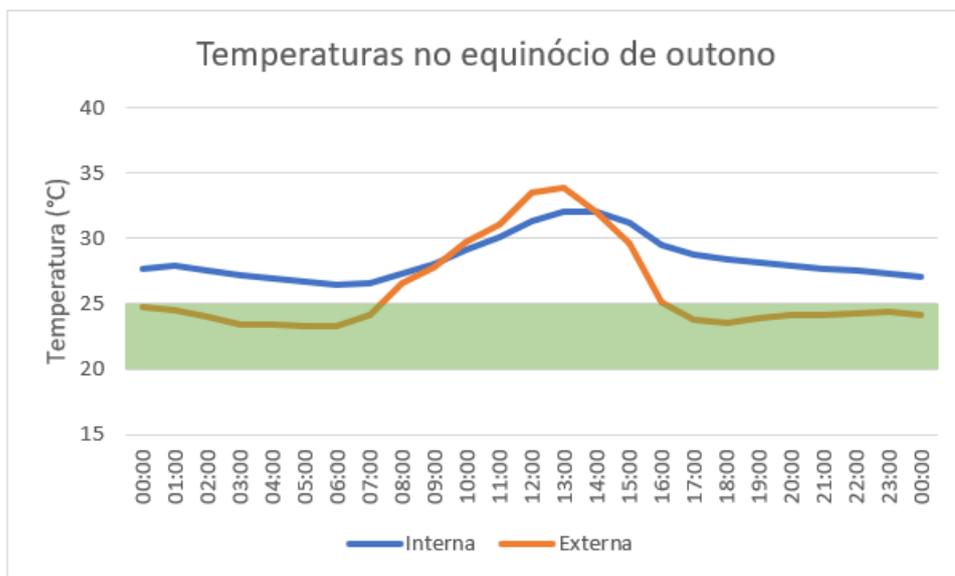


Figura 4-43: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação III na cidade de Picos

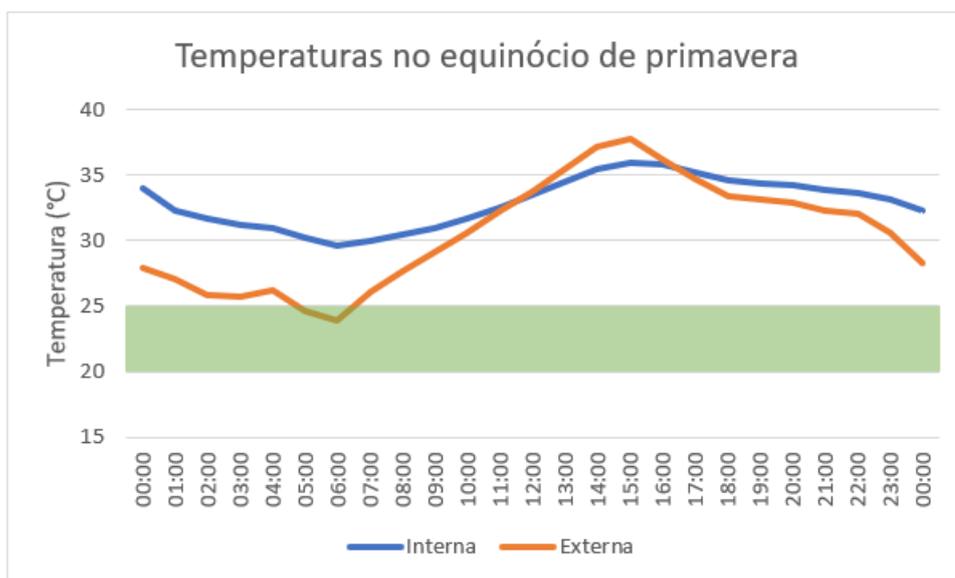


Figura 4-44: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação III na cidade de Picos

Ao analisar as Figura 4-43 e Figura 4-44 percebe-se que assim como nos solstícios, nos equinócios o edifício também passa o dia inteiro em desconforto por sobreaquecimento, havendo momentos em que as temperaturas interna e externa atingem mais de 10°C acima do limite superior de conforto. Esse mesmo comportamento pôde ser observado nos cenários anteriores.

A Figura 4-45 apresenta o resultado gráfico da aplicação do modelo de conforto térmico proposto pela EN 15251.

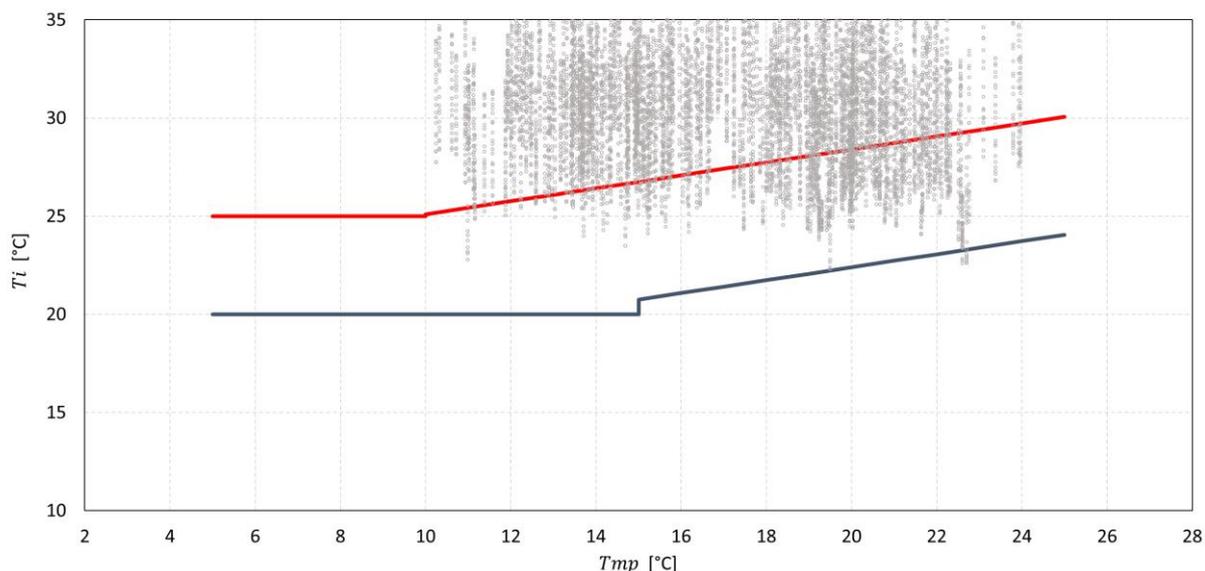


Figura 4-45: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação III na cidade de Picos

Através do cálculo e da análise da Figura 4-45, que utiliza dois indicadores para sua construção, o primeiro indicando as médias das temperaturas abaixo ou acima dos limites inferiores e superiores de conforto térmico, respectivamente e o segundo, a porcentagem de dias ao longo do ano que o edifício passou em desconforto térmico por frio ou sobreaquecimento, constata-se no cenário de simulação III, onde há o uso de elementos de sombreamento apenas no período de verão, a média de 0,51°C abaixo do limite inferior de conforto, de 20°C e a média de 4,04°C acima do limite superior, de 25°C.

A partir desses valores, é possível constatar que durante 0,11% do ano o edifício passa em desconforto por frio e em 79,13% em desconforto por sobreaquecimento, restando 20,76% do ano em que este passa em temperaturas dentro dos limites de conforto.

4.2.4 Simulação do cenário IV

O cenário de simulação IV representa o estudo de caso com o uso de elementos de sombreamento de forma responsiva, levando em consideração o parâmetro temperatura. Ou seja, quando a temperatura interna do ar estiver acima de 25°C, conforme definido anteriormente, o elemento de sombreamento é ativado.

4.2.4.1 Curitiba

As Figura 4-46 e Figura 4-47 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos solstícios de verão, 21 de dezembro e inverno, 21 de junho, respectivamente, para a cidade de Curitiba.

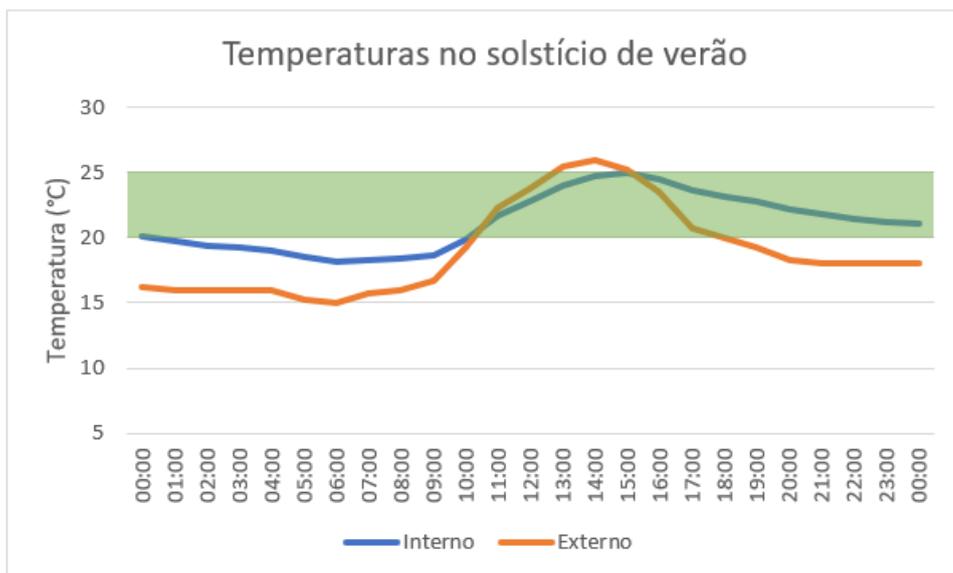


Figura 4-46: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação IV na cidade de Curitiba

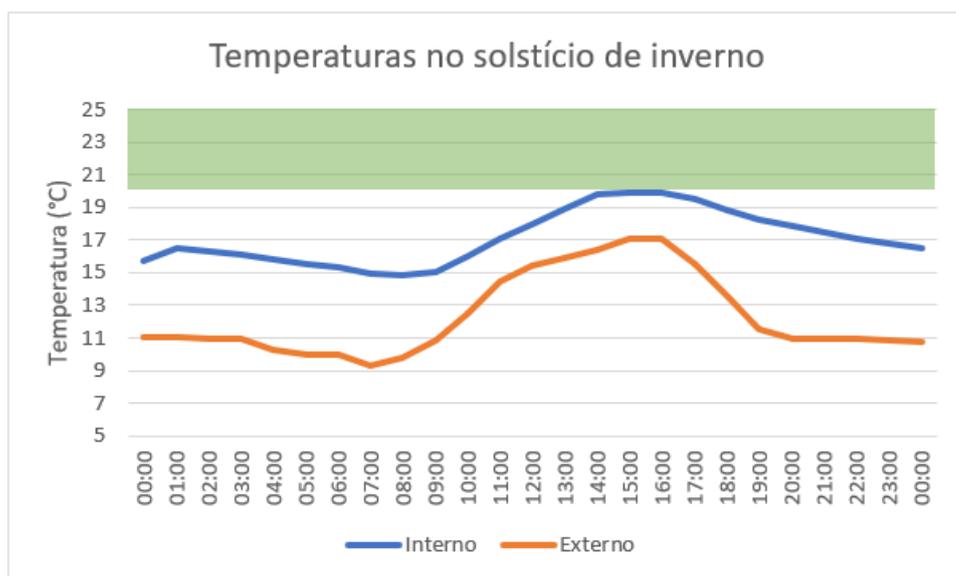


Figura 4-47: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação IV na cidade de Curitiba

Analisando as Figura 4-46 e Figura 4-47, assim como no cenário I, pode-se observar que no solstício de verão o edifício passa a maior parte do dia em situação de conforto térmico, atingindo esta perto das 11h00 da manhã e se mantendo até o final do dia, mesmo com a temperatura exterior ultrapassando esses limites. Já no solstício de inverno, observa-se o contrário. O edifício passa o dia todo em desconforto térmico, com suas temperaturas abaixo do limite inferior de conforto, onde apenas num breve momento de duração em que esta, no período da tarde, parece atingir a zona de conforto térmico. Porém, apesar de ainda estar em situação de desconforto, as temperaturas internas se mantêm maiores que as externas, observando-se também uma diferença mais acentuada entre estas no solstício de inverno do que no solstício de verão. Também é possível perceber claramente que no solstício de

inverno, o declínio das temperaturas ao fim do dia se dá por volta do horário do pôr do sol, perto das 17h00.

A extrema semelhança dos dados e gráficos com o cenário I se dá pelo fato de que, no cenário IV, os elementos de sombreamento são ativos apenas quando a temperatura interna do ar atinge valor superior a 25°C, o que não ocorreu em nenhum dos solstícios. Ou seja, assim como no cenário I, nos solstícios não houve o uso de elementos de sombreamento.

As Figura 4-48 e Figura 4-49 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos equinócios de outono, em 20 de março e primavera, em 22 de setembro, respectivamente.

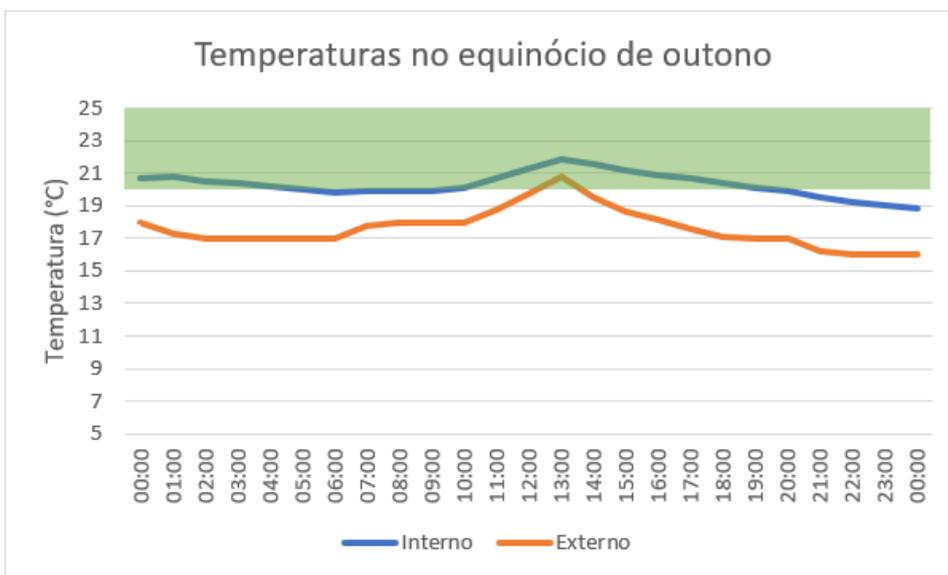


Figura 4-48: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação IV na cidade de Curitiba

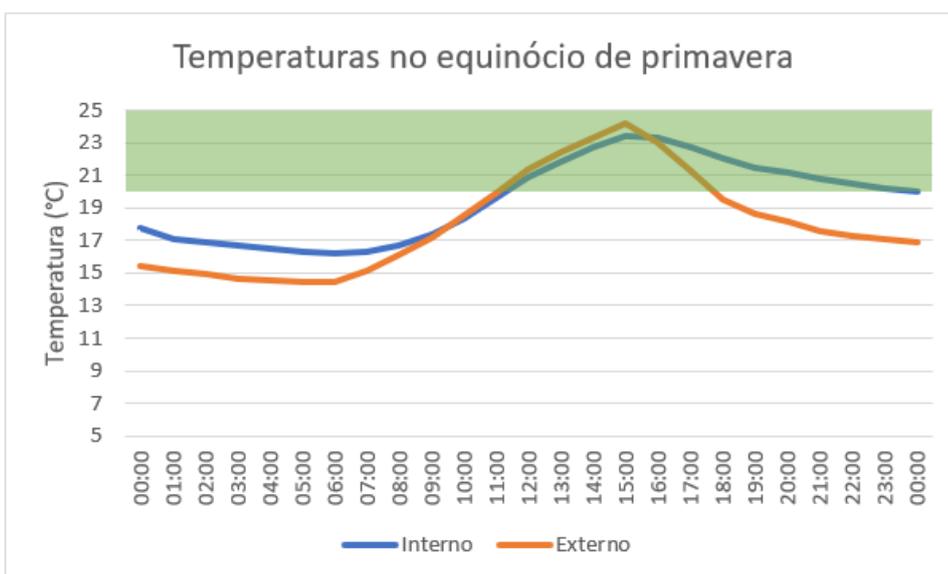


Figura 4-49: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação IV na cidade de Curitiba

Ao analisar as Figura 4-48 e Figura 4-49 e, novamente, como no cenário I, percebe-se um comportamento parecido, porém mais equilibrado e homogêneo das temperaturas nos equinócios de acordo as estações que as procedem (inverno para o outono e verão para a primavera). É possível perceber também que nos equinócios, em comparação com os solstícios, houve mais momentos em que a temperatura interna esteve dentro dos limites de conforto (entre 20 e 25°C), onde no equinócio de outono o limite inferior de conforto térmico só foi ultrapassado a partir das 20h00 e no equinócio de primavera a zona de conforto foi atingida entre 11h00 e 12h00 e se manteve até o final do dia.

Assim como relatado nos solstícios, a extrema semelhança dos dados e gráficos com o cenário I se dá pelo fato de que, no cenário IV, os elementos de sombreamento são ativos apenas quando a temperatura interna do ar atinge valor superior a 25°C, o que não ocorreu em nenhum dos equinócios. Ou seja, assim como no cenário I, nos equinócios também não houve o uso de elementos de sombreamento.

A Figura 4-50 apresenta o resultado gráfico da aplicação do modelo de conforto térmico proposto pela EN 15251.

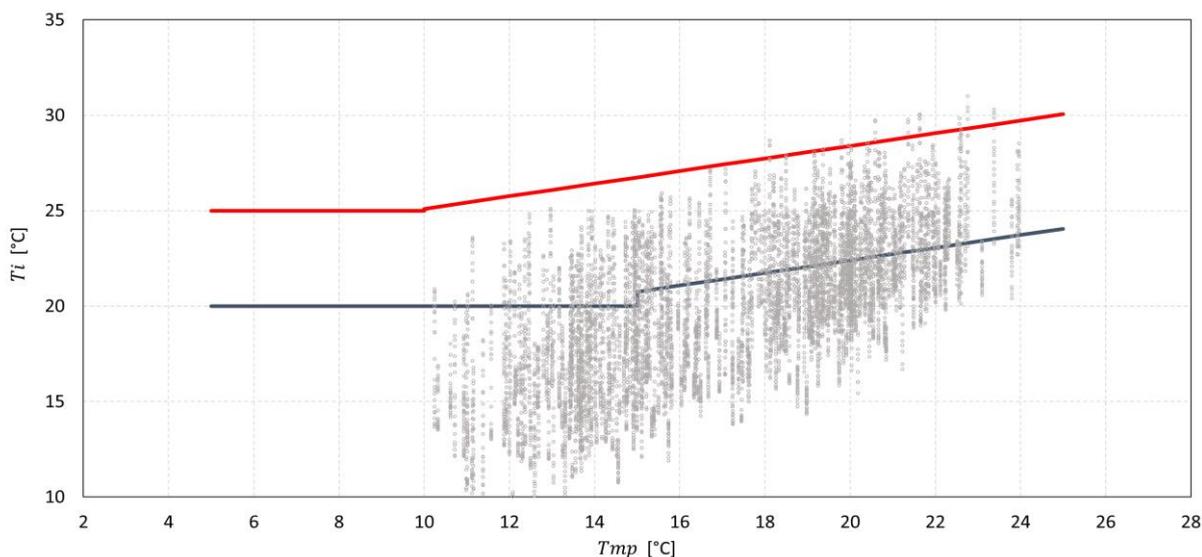


Figura 4-50: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação IV na cidade de Curitiba

Através do cálculo e da análise da Figura 4-50, que utiliza dois indicadores para sua construção, o primeiro indicando as médias das temperaturas abaixo ou acima dos limites inferiores e superiores de conforto térmico, respectivamente e o segundo, a porcentagem de dias ao longo do ano que o edifício passou em desconforto térmico por frio ou sobreaquecimento, constata-se no cenário de simulação IV, onde há o uso de elementos de sombreamento de forma responsiva de acordo com a temperatura interna do ar, a média de 3,3°C abaixo do limite inferior de conforto, de 20°C e a média de 0,60°C acima do limite superior, de 25°C.

A partir desses valores, é possível constatar que durante 67,18% do ano o edifício passa em desconforto por frio e em 0,40% em desconforto por sobreaquecimento, restando 32,42% do ano em que este passa em temperaturas dentro dos limites de conforto.

4.2.4.2 Brasília

As Figura 4-51 e Figura 4-52 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos solstícios de verão, 21 de dezembro e inverno, 21 de junho, respectivamente, para a cidade de Brasília

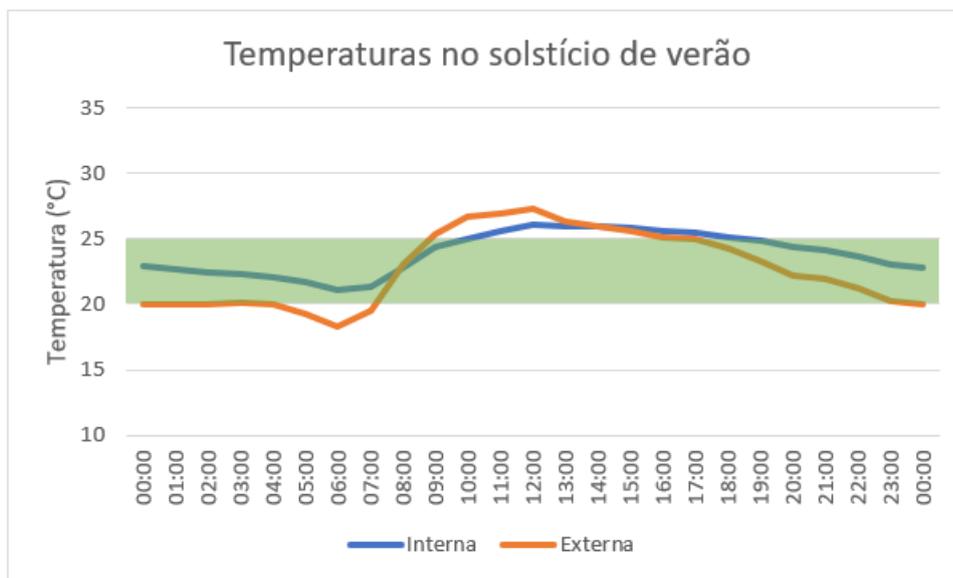


Figura 4-51: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação IV na cidade de Brasília

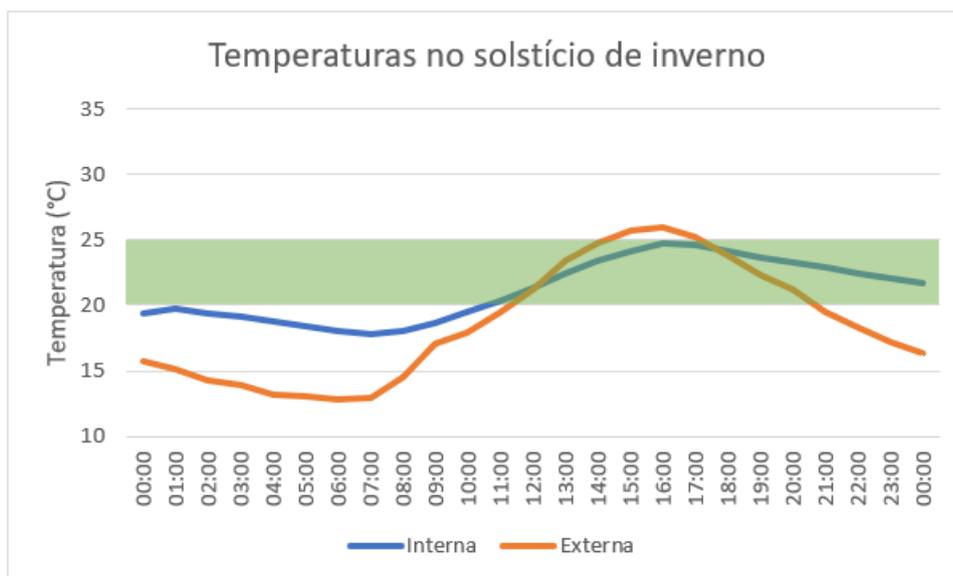


Figura 4-52: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação IV na cidade de Brasília

Analisando as Figura 4-51 e Figura 4-52, pode-se observar que no solstício de verão, em comparação com o cenário I, além das observações já feitas de que o edifício passa a maior

parte do dia em situação de conforto térmico, há uma leve diminuição da temperatura interna no período da tarde, referente ao fato dos elementos de sombreamento estarem sendo utilizados de forma responsiva à temperatura interna. No solstício de inverno, observa-se o mesmo comportamento obtido no cenário I, ou seja, o edifício passa também a maior parte do dia em situação de conforto térmico, atingindo-o perto das 11h00 da manhã e se mantendo até o final do dia. Isso ocorre pois no cenário IV, os elementos de sombreamento são ativos apenas quando a temperatura interna do ar atinge valor superior a 25°C, o que não ocorreu em no solstício de inverno, ou seja, assim como no cenário I, no solstício de inverno também não houve o uso de elementos de sombreamento.

As Figura 4-53 e Figura 4-54 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos equinócios de outono, em 20 de março e primavera, em 22 de setembro, respectivamente.

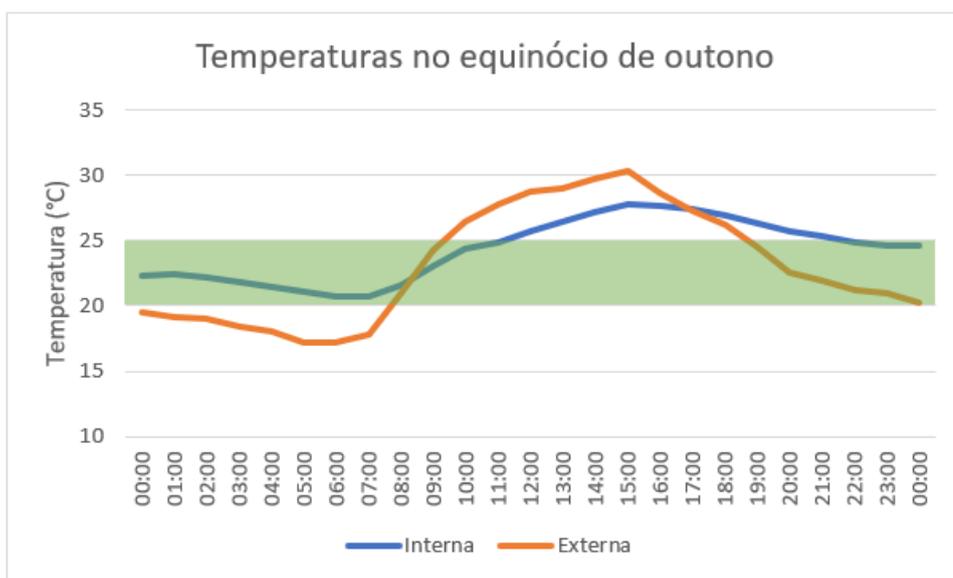


Figura 4-53: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação IV na cidade de Brasília

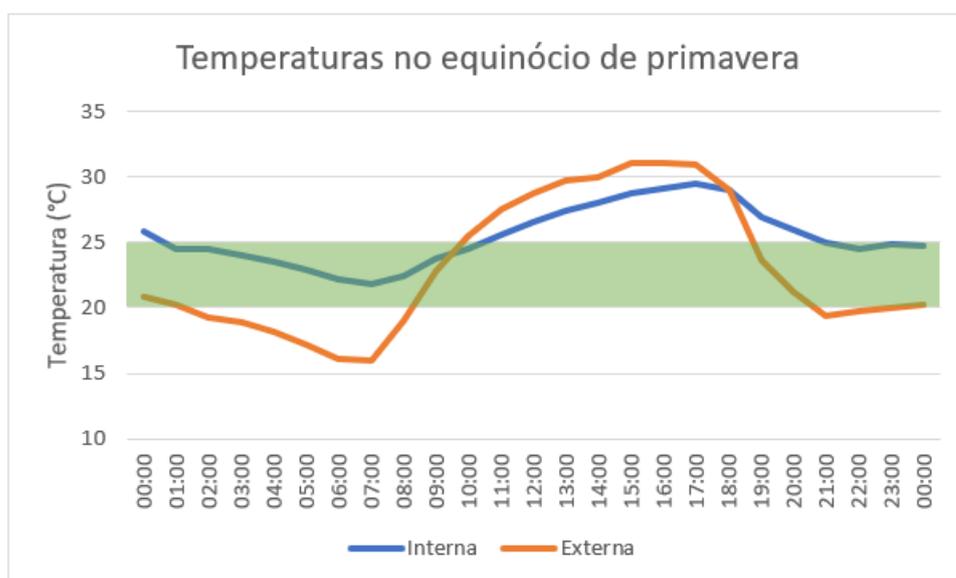


Figura 4-54: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação IV na cidade de Brasília

Ao analisar as Figura 4-53 e Figura 4-54 e comparar com o cenário I, é possível perceber que no equinócio de outono há uma leve diminuição das temperaturas a partir das 11h00 e que se estende até o fim do dia. Já no equinócio de primavera pode-se observar o mesmo fenômeno, porém a partir das 10h00.

A Figura 4-55 apresenta o resultado gráfico da aplicação do modelo de conforto térmico proposto pela EN 15251.

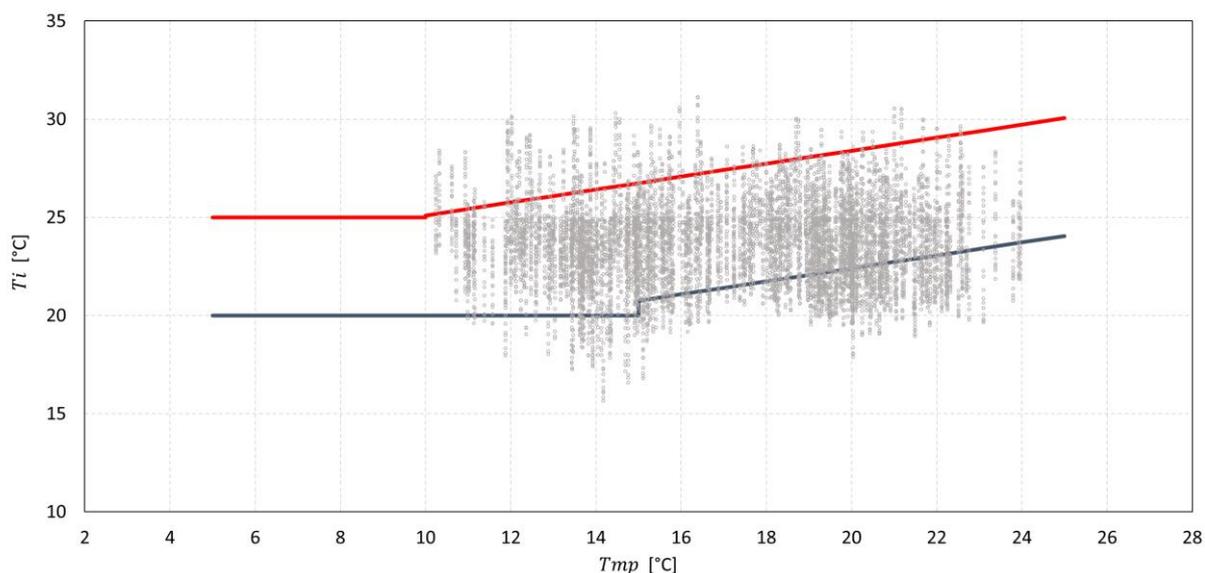


Figura 4-55: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação IV na cidade de Brasília

Através do cálculo e da análise da Figura 4-55, que utiliza dois indicadores para sua construção, o primeiro indicando as médias das temperaturas abaixo ou acima dos limites inferiores e superiores de conforto térmico, respectivamente e o segundo, a porcentagem de dias ao longo do ano que o edifício passou em desconforto térmico por frio ou sobreaquecimento, constata-se no cenário de simulação IV, onde há o uso de elementos de sombreamento de forma responsiva de acordo com a temperatura interna do ar, a média de 1,13°C abaixo do limite inferior de conforto, de 20°C e a média de 1,35°C acima do limite superior, de 25°C.

A partir desses valores, é possível constatar que durante 19,94% do ano o edifício passa em desconforto por frio e em 6,05% em desconforto por sobreaquecimento, restando 74,01% do ano em que este passa em temperaturas dentro dos limites de conforto.

4.2.4.3 Picos

As Figura 4-56 e Figura 4-57 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos solstícios de verão, 21 de dezembro e inverno, 21 de junho, respectivamente, para a cidade de Picos.

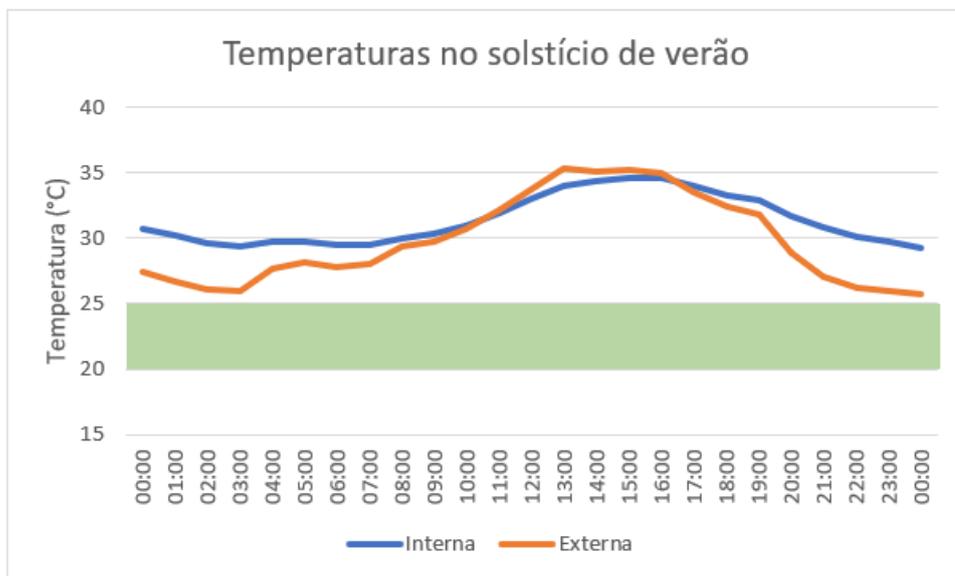


Figura 4-56: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de verão para o cenário de simulação IV na cidade de Picos

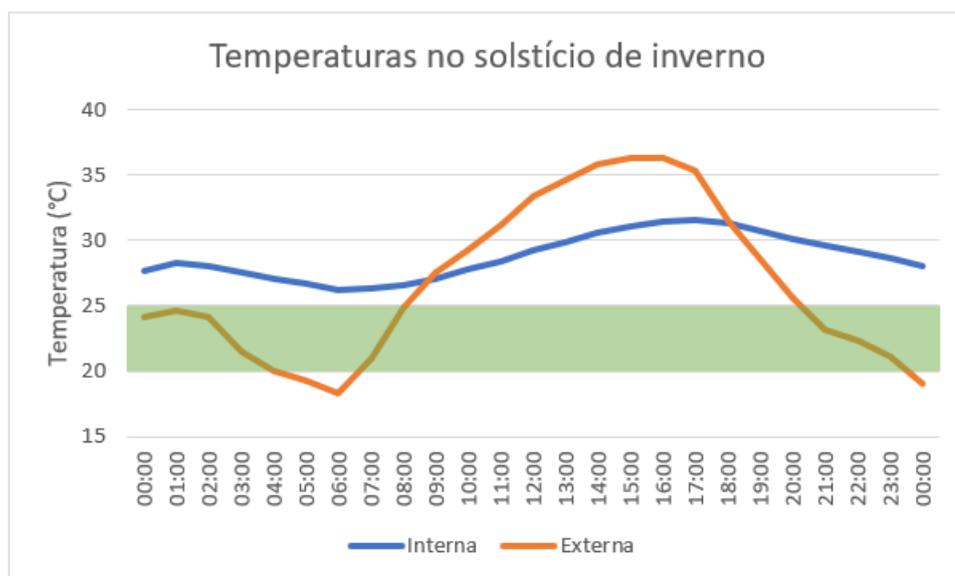


Figura 4-57: Variação horária das temperaturas interna e externa no solstício de inverno para o cenário de simulação IV na cidade de Picos

Analisando as Figura 4-56 e Figura 4-57, pode-se observar que em Picos, apesar do uso dos elementos de sombreamento e como em todos os outros cenários, no solstício de verão o edifício passa o dia inteiro em situação de desconforto térmico por sobreaquecimento, atingindo em alguns momentos do dia até 10°C acima do limite superior da zona de conforto. No solstício de inverno, apesar de as temperaturas internas serem um pouco menores, o edifício também passa o dia todo em desconforto térmico, com suas temperaturas acima do limite superior de conforto, mesmo com os elementos de sombreamento ativos. Porém, ao se comparar a mesma data com o cenário I, percebe-se que no cenário IV, assim como no cenário II, há momentos do dia em que se pode perceber uma diferença de até 3°C entre as temperaturas internas desses cenários.

As Figura 4-58 e Figura 4-59 apresentam a variação das temperaturas interna e externa do edifício nos equinócios de outono, em 20 de março e primavera, em 22 de setembro, respectivamente.

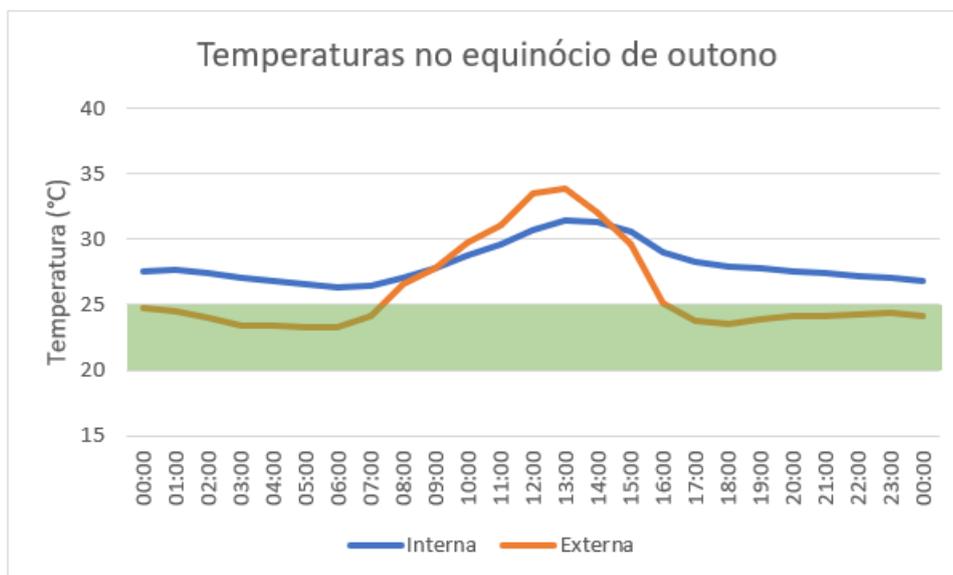


Figura 4-58: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de outono para o cenário de simulação IV na cidade de Picos

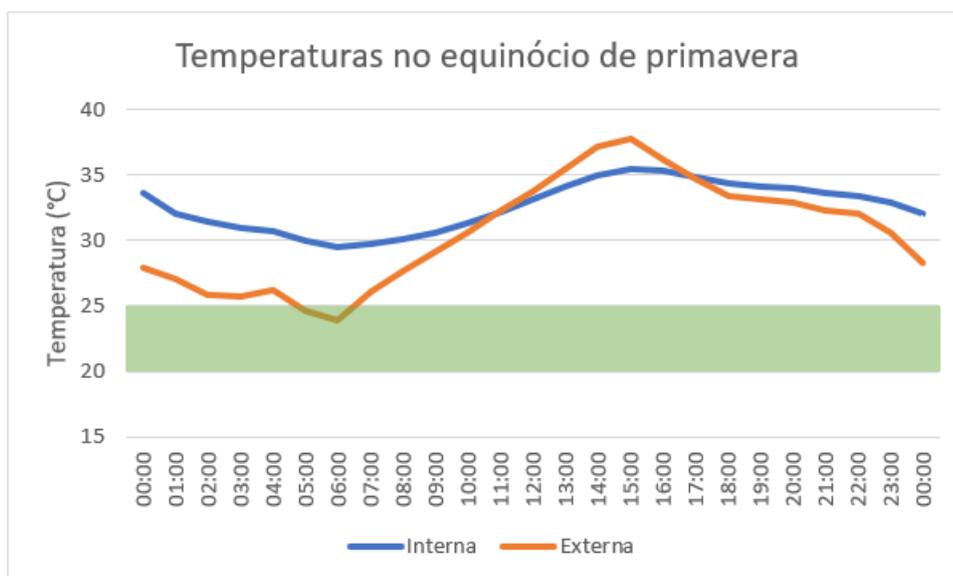


Figura 4-59: Variação horária das temperaturas interna e externa no equinócio de primavera para o cenário de simulação IV na cidade de Picos

Ao analisar as Figura 4-58 e Figura 4-59 percebe-se que assim como nos solstícios, nos equinócios o edifício também passa o dia inteiro em desconforto por sobreaquecimento, havendo momentos em que as temperaturas interna e externa atingem mais de 10°C acima do limite superior de conforto. Mas diferente do que se pode constatar nos solstícios ao se comparar com o primeiro cenário, nos equinócios praticamente não há diminuição das temperaturas internas de um cenário para o outro, mesmo com o uso dos elementos de sombreamento.

A Figura 4-60 apresenta o resultado gráfico da aplicação do modelo de conforto térmico proposto pela EN 15251.

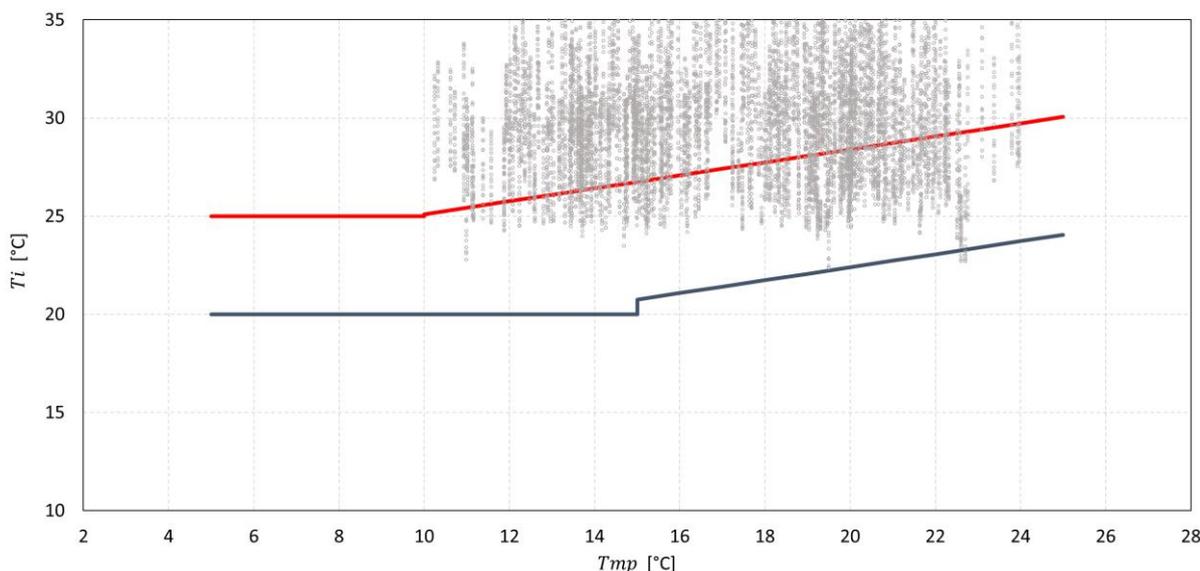


Figura 4-60: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para o cenário de simulação IV na cidade de Picos

Através do cálculo e da análise da Figura 4-60, que utiliza dois indicadores para sua construção, o primeiro indicando as médias das temperaturas abaixo ou acima dos limites inferiores e superiores de conforto térmico, respectivamente e o segundo, a porcentagem de dias ao longo do ano que o edifício passou em desconforto térmico por frio ou sobreaquecimento, constata-se no cenário de simulação IV, onde há o uso de elementos de sombreamento de forma responsiva de acordo com a temperatura interna do ar, a média de 0,40°C abaixo do limite inferior de conforto, de 20°C e a média de 3,55°C acima do limite superior, de 25°C.

A partir desses valores, é possível constatar que durante 0,11% do ano o edifício passa em desconforto por frio e em 74,89% em desconforto por sobreaquecimento, restando 25,00% do ano em que este passa em temperaturas dentro dos limites de conforto.

4.3 Discussão dos resultados e avaliação em diferentes zonas climáticas

Se tratando da questão de conforto, dentre todos os cenários de simulação analisados, e em termos de temperatura média, o cenário II, cujo elementos de sombreamento foram utilizados durante todo o ano, foi o que apresentou pior desempenho para a cidade de Curitiba, o que pode ser confirmado ao se observar a Figura 4-61, ao mesmo tempo em que representa um dos melhores cenários para a cidade de Brasília e Picos, como se pode constatar através das Figura 4-62 e Figura 4-63, respectivamente, que apresentam um comparativo das temperaturas internas ao longo do ano para os quatro cenários analisados.

Isso mostra que o desempenho de cada cenário é relativo ao clima local. Nem sempre significando que um resultado obtido para um lugar, necessariamente possui os mesmos benefícios ou malefícios para outros.

Porém, algo que se pôde observar é que a adesão da característica responsiva aos elementos, os permitiram obter o melhor desempenho frente aos outros cenários simulados, mostrando que através da adaptação aos parâmetros de cada local, pode-se obter em grande parte das vezes, resultados satisfatórios ao se comparar com os outros que não possuem essa característica adaptativa.

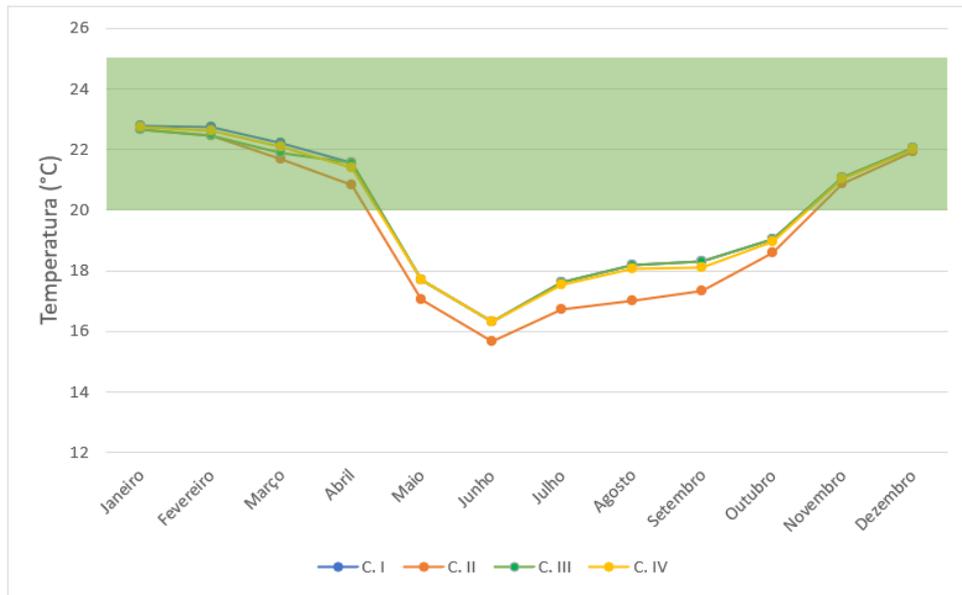


Figura 4-61: Temperaturas internas médias ao longo do ano dos cenários de simulação analisados na cidade de Curitiba

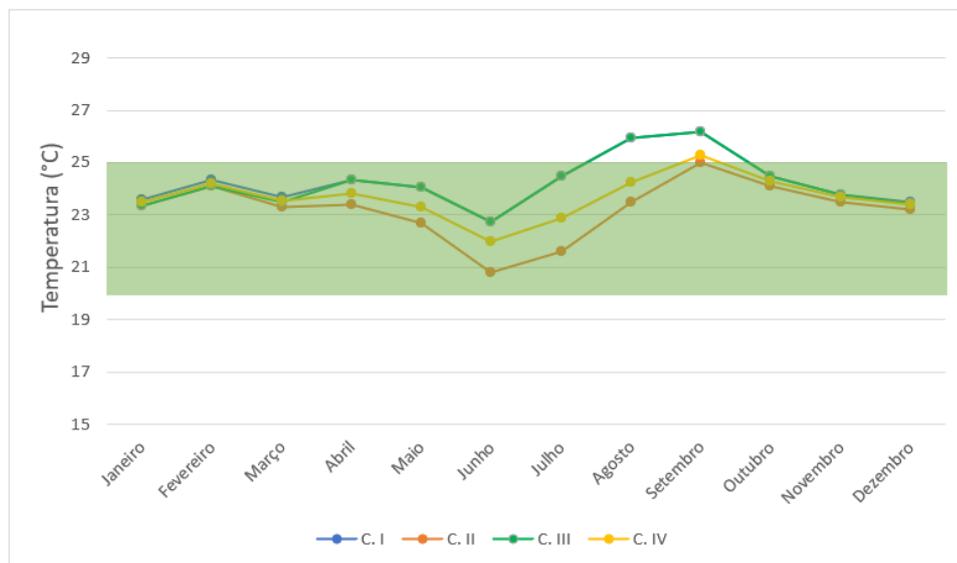


Figura 4-62: Temperaturas internas médias ao longo do ano dos cenários de simulação analisados na cidade de Brasília

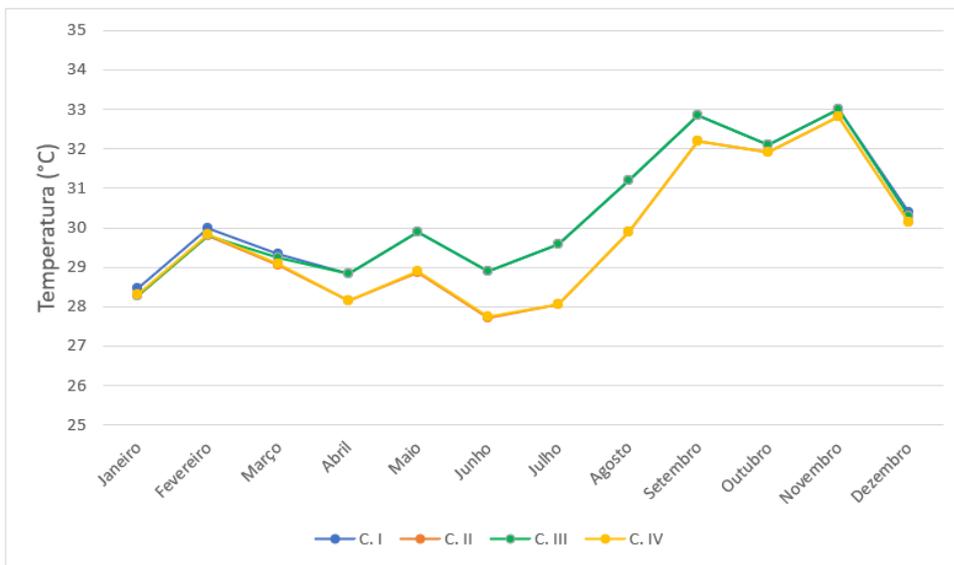


Figura 4-63: Temperaturas internas médias ao longo do ano dos cenários de simulação analisados na cidade de Picos

As Figura 4-64, Figura 4-65 e Figura 4-66 representam as amplitudes térmicas para os quatro cenários de simulação ao longo da estação de verão no período diurno adotado de 06h00 às 18h00 para as cidades de Curitiba, Brasília e Picos, respectivamente.

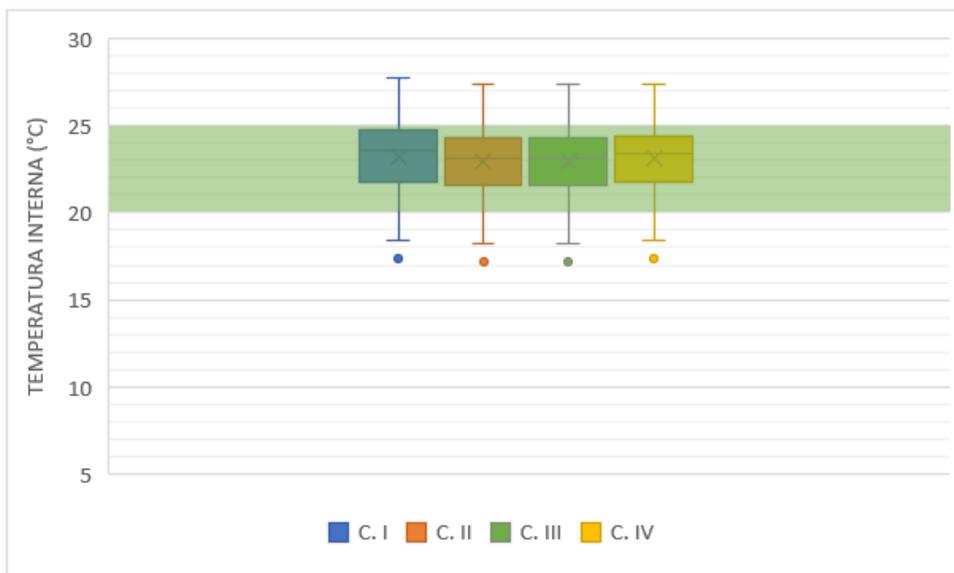


Figura 4-64: Variação das temperaturas internas do ar no verão durante o período diurno dos cenários de simulação analisados para a cidade de Curitiba

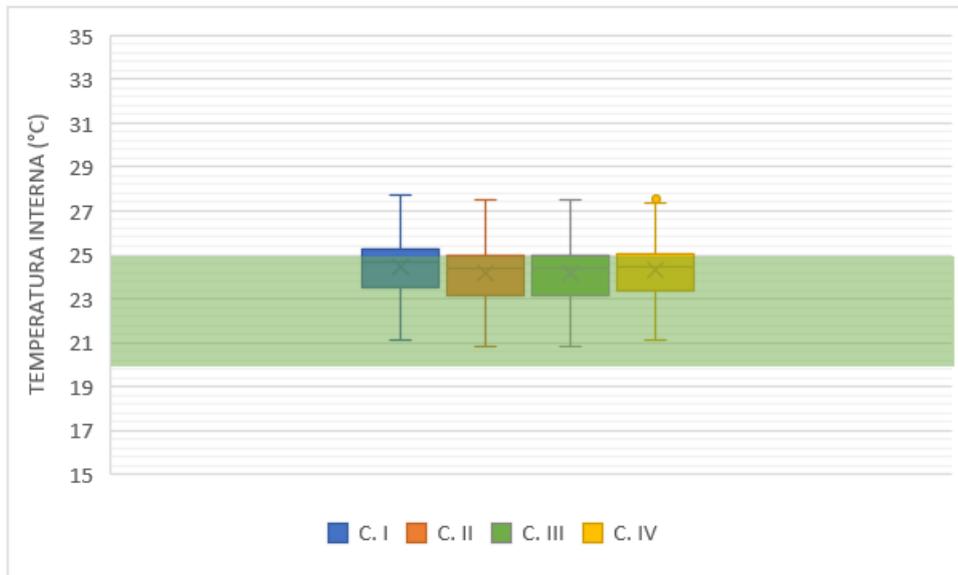


Figura 4-65: Variação das temperaturas internas do ar no verão durante o período diurno dos cenários de simulação analisados para a cidade de Brasília

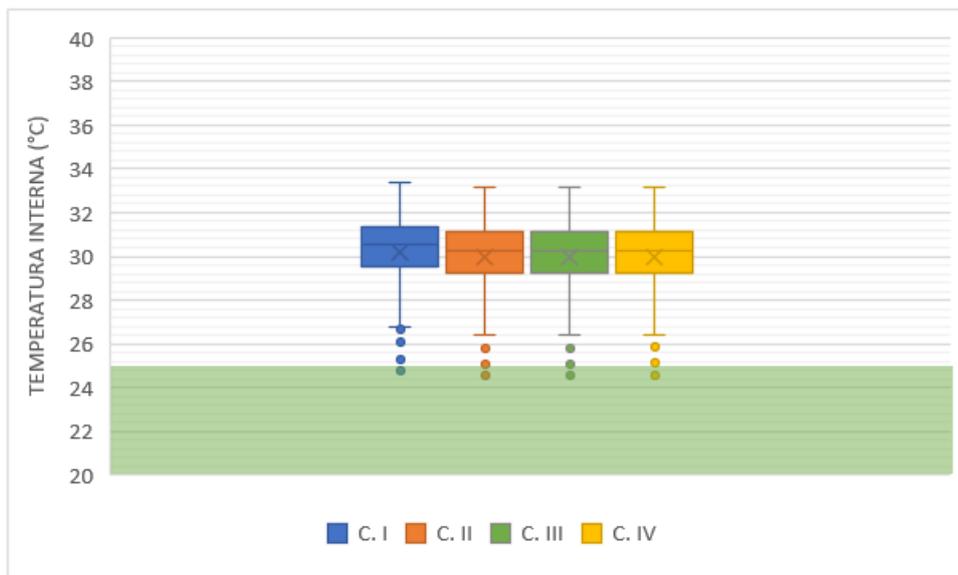


Figura 4-66: Variação das temperaturas internas do ar no verão durante o período diurno dos cenários de simulação analisados para a cidade de Picos

Ao analisar as Figura 4-64, Figura 4-65 e Figura 4-66 é possível observar que, no verão, as temperaturas apresentam uma menor amplitude e uma baixa variabilidade e desvio padrão. Através dessa análise é possível afirmar também que, para as cidades de Curitiba e Brasília, em todos os cenários grande parte dos seus dados estão dentro da zona de conforto térmico, sendo a única estação do ano em que isso ocorre. Já para a cidade de Picos, em nenhum dos cenários as temperaturas se adentram à zona de conforto, demonstrando um grande desconforto térmico por sobreaquecimento, com temperaturas médias de mais de 30°C para todos os cenários.

Um ponto interessante a se destacar é a baixa influência dos elementos de sombreamento na temperatura interna durante a estação de verão, onde ao se comparar o cenário I com os cenários II, III e IV, que fazem uso desses elementos nesse período do ano, percebe-se uma diferença bem baixa.

As Figura 4-67, Figura 4-68 e Figura 4-69 representam as amplitudes térmicas para os quatro cenários de simulação ao longo da estação de inverno no período diurno adotado de 06h00 às 18h00 para as cidades de Curitiba, Brasília e Picos, respectivamente.

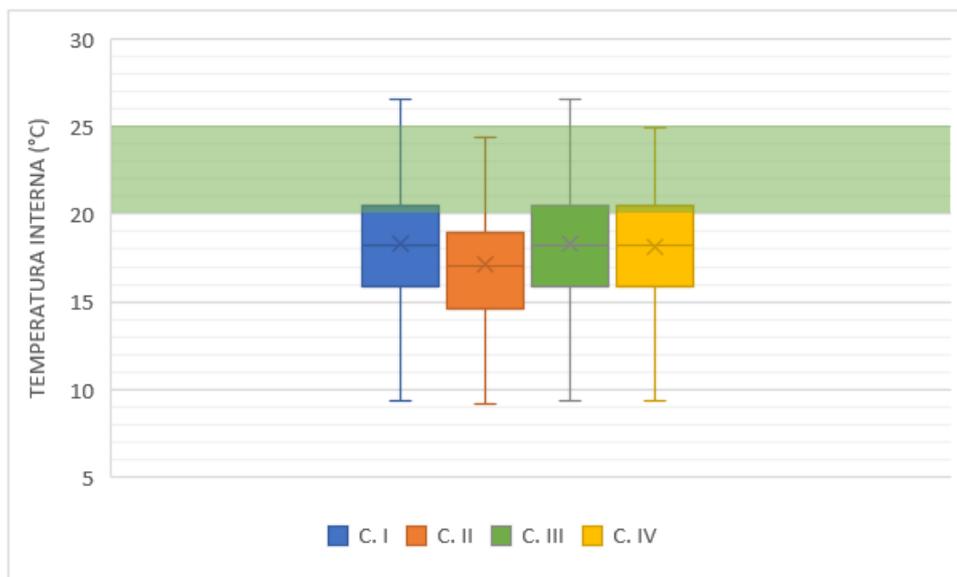


Figura 4-67: Variação das temperaturas internas do ar no inverno durante o período diurno dos cenários de simulação analisados para a cidade de Curitiba

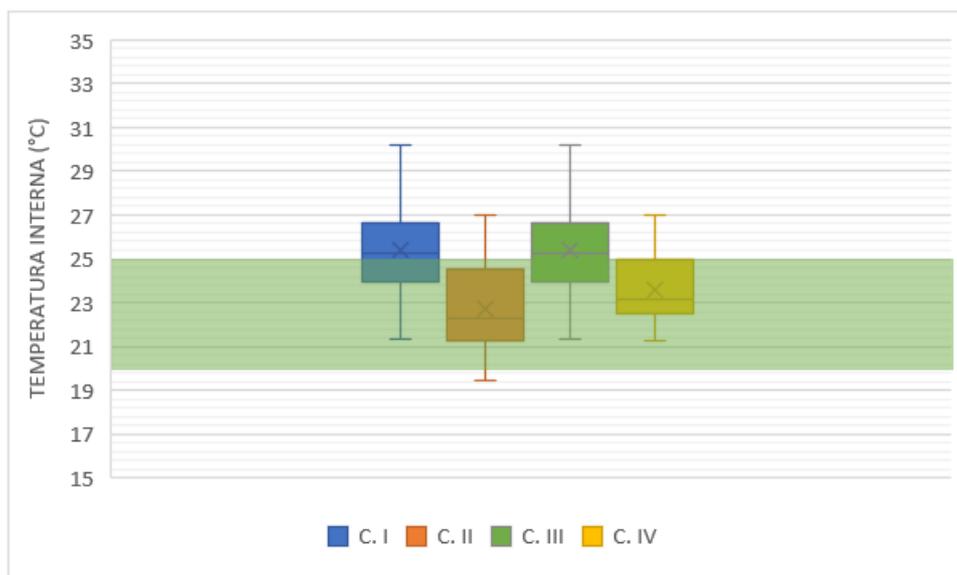


Figura 4-68: Variação das temperaturas internas do ar no inverno durante o período diurno dos cenários de simulação analisados para a cidade de Brasília

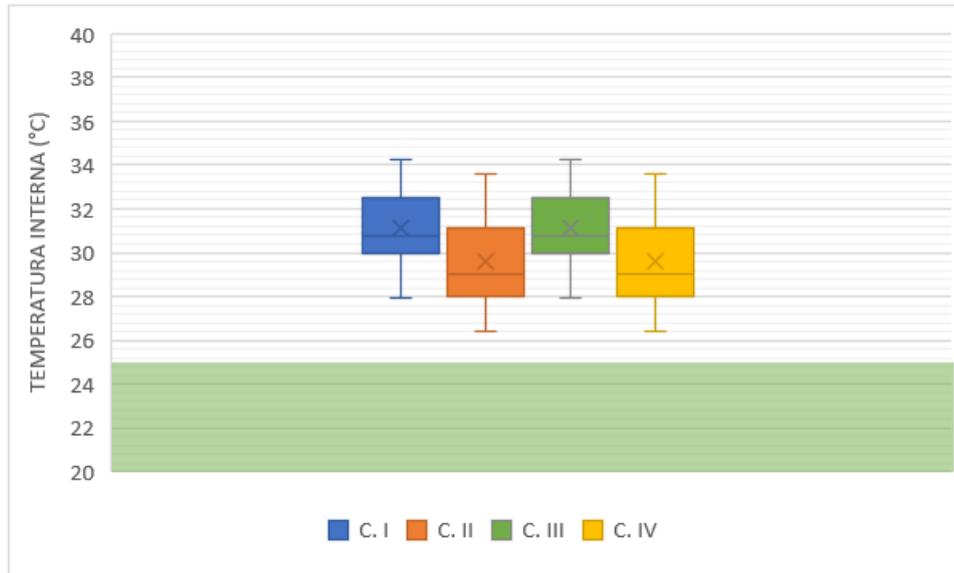


Figura 4-69: Variação das temperaturas internas do ar no inverno durante o período diurno dos cenários de simulação analisados para a cidade de Picos

Já no inverno, através das Figura 4-67, Figura 4-68 e Figura 4-69, pode-se observar uma maior amplitude térmica, destacando-se Curitiba que apresenta registros que vão de pouco mais de 9°C até 25°C. Além disso, em Curitiba a concentração dos dados para os quatro cenários estão abaixo do limite inferior de conforto térmico de 20°C, com as médias de temperatura em torno dos 18°C. Em Brasília percebe-se nitidamente o conforto adquirido no período diurno para essa estação do ano ao se analisar os cenários II e IV dessa mesma cidade, que fazem uso dos elementos de sombreamento nessa época do ano. Já em Picos, percebe-se um grande desconforto térmico por sobreaquecimento em todos os cenários, onde em nenhum momento durante o período diurno a temperatura interna do ar se adentra à zona de conforto térmico, com temperaturas médias variando de 29°C para os cenários com uso de sombreamento à perto de 31°C para os cenários que não fazem uso dos elementos de sombreamento.

Para essa estação do ano, o cenário II, onde há uso de elementos de sombreamento durante todo o ano e, conseqüentemente, o único cenário em que usa o sombreamento de forma ininterrupta, destaca-se como o cenário que apresenta maior desconforto em relação ao frio para a cidade de Curitiba e, portanto, pior desempenho energético, uma vez que se pressupõe o uso de equipamentos elétricos pelos ocupantes para sanar a questão do desconforto relacionado ao frio. Ao mesmo tempo, esse mesmo cenário apresenta um dos melhores para as cidades de Brasília e Picos que possuem climas mais quentes, podendo-se afirmar também como um de melhor desempenho energético, uma vez que pressupõe-se o não uso de equipamentos elétricos pelos ocupantes para questões de conforto já que a temperatura interna já estaria em conforto térmico.

As Figura 4-70, Figura 4-71 e Figura 4-72 representam a porcentagem de dias ao longo do ano que o edifício passou em conforto e desconforto térmico por frio ou sobreaquecimento para as cidades de Curitiba, Brasília e Picos, respectivamente, onde os valores foram obtidos conforme um dos indicadores utilizados pela normativa europeia 15251.

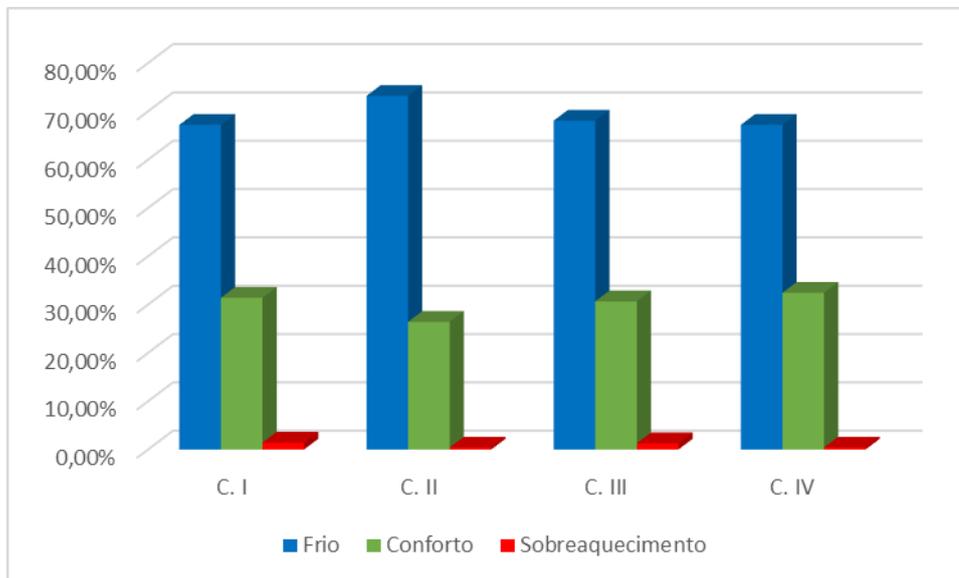


Figura 4-70: Porcentagem de períodos de conforto e desconforto segundo a EN 15251 ao longo do ano para os cenários de simulação analisados na cidade de Curitiba

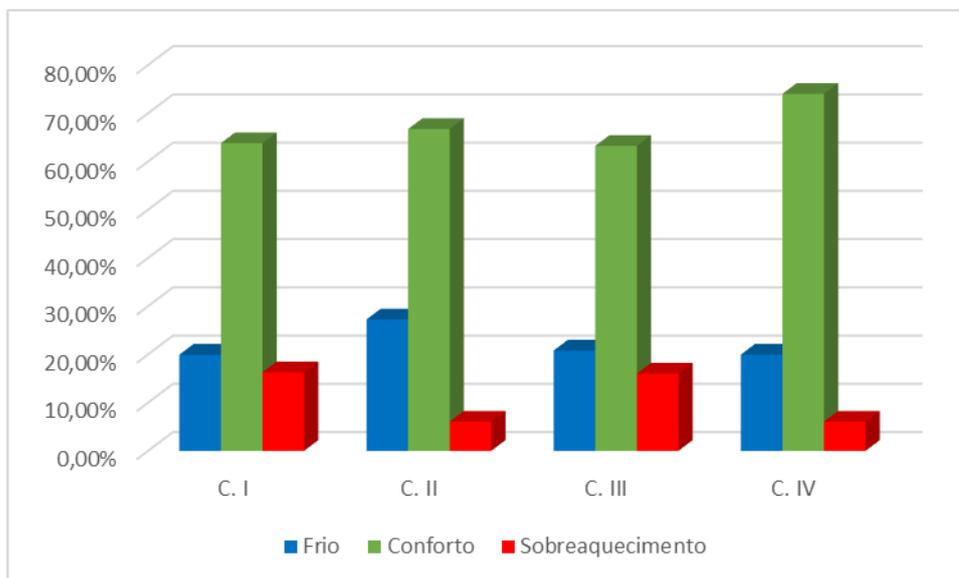


Figura 4-71: Porcentagem de períodos de conforto e desconforto segundo a EN 15251 ao longo do ano para os cenários de simulação analisados na cidade de Brasília

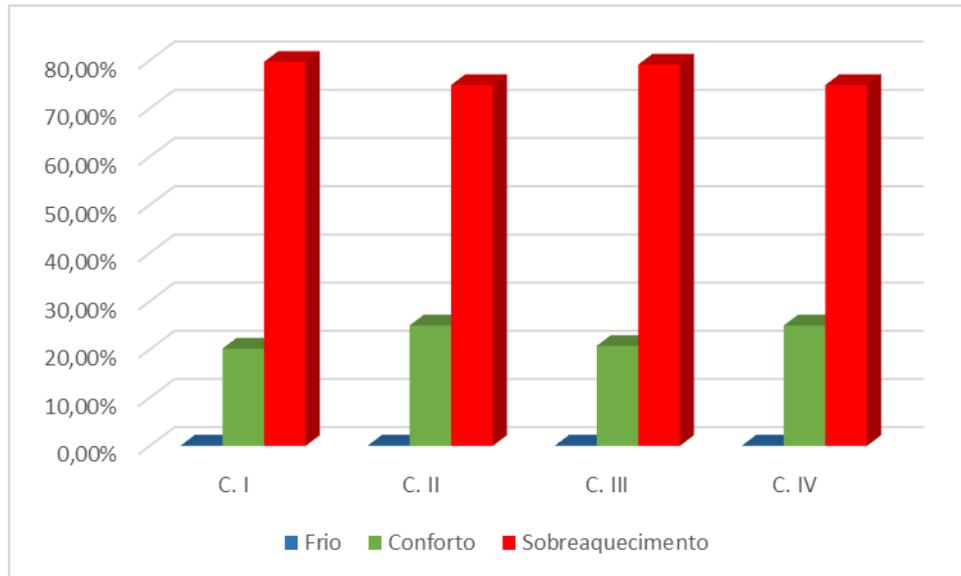


Figura 4-72: Porcentagem de períodos de conforto e desconforto segundo a EN 15251 ao longo do ano para os cenários de simulação analisados na cidade de Picos

Analisando a Figura 4-70 e a Tabela 4-1 é possível afirmar que o cenário que teve melhor desempenho em todas as cidades estudadas, em questões de conforto e, conseqüentemente, energético foi o cenário IV, que representa o estudo de caso com o uso de elementos de sombreamento de forma responsiva, levando em consideração o parâmetro temperatura, onde em Brasília conseguiu alcançar a porcentagem de 74,01% do ano em estado de conforto térmico.

Porém, apesar disso, para a cidade de Curitiba destaca-se na edificação um grande desconforto térmico em relação ao frio ao longo do ano, algo que elementos de sombreamento são incapazes de resolver, uma vez que esse tipo de solução é utilizada para problemáticas com sobreaquecimento. Esse fato é justificado pela localização e clima da cidade de Curitiba, que pertence à Zona Bioclimática 1 (ZB1), a mais fria do Brasil [34] e possui características climáticas com verões frescos, sem estação seca e com ocorrência frequente de geadas severas no inverno [39]. Além disso, a cidade possui a temperatura média de 21°C no verão e de 13°C no inverno [40].

Um ponto interessante a se destacar é que o conforto gerado pela diminuição do sobreaquecimento teve uma maior influência por outras estações do ano que não fossem o verão. O que pode ser comprovado ao se constatar que a diferença de desconforto entre o cenário I, onde não há o uso de elementos de sombreamento e o cenário III, onde há o uso de elementos de sombreamento apenas no período de verão, é de apenas 0,13% para Curitiba, 0,29% para Brasília e de 0,56% para Picos. Isso pode ser justificado pelas taxas de renovação de ar utilizadas nas simulações, uma vez que quanto maior esta, mais a temperatura interna estaria condicionada pela temperatura exterior e no presente trabalho a maior taxa de trocas horárias de ar foi utilizada no período de verão.

Tabela 4-1: síntese das porcentagens de períodos de conforto e desconforto segundo a EN 15251 ao longo do ano para os cenários de simulação analisados

		Frio	Conforto	Sobreaquecimento
Curitiba	C. I	67,18%	31,40%	1,42%
	C. II	73,18%	26,42%	0,40%
	C. III	68,05%	30,66%	1,29%
	C. IV	67,18%	32,42%	0,40%
Brasília	C. I	19,93%	63,79%	16,28%
	C. II	27,23%	66,72%	6,05%
	C. III	20,79%	63,22%	15,99%
	C. IV	19,94%	74,01%	6,05%
Picos	C. I	0,11%	20,20%	79,69%
	C. II	0,11%	25,00%	74,89%
	C. III	0,11%	20,76%	79,13%
	C. IV	0,11%	25,00%	74,89%

A Tabela 4-1 traz uma síntese das Figura 4-70, Figura 4-71 e Figura 4-72 e mostra as porcentagens dos períodos de conforto e desconforto segundo a EN 15251 ao longo do ano para os cenários de simulação analisados e a partir de sua análise, pode-se perceber que para todas as cidades o cenário que melhor se destacou em cada uma delas, em termos de conforto, foi o cenário IV, que representa o estudo de caso com o uso de elementos de sombreamento de forma responsiva. Assim, pode-se destacar a sobressalência de elementos responsivos em comparação com elementos não responsivos.

5. Conclusões

5.1 Conclusões gerais

Este trabalho pretendia avaliar as condições de conforto térmico no interior de uma Câmara Bioclimática de Baixo Custo (CBBC), cujos módulos foram concebidos à maneira de ambientes de escritório a fim de subsidiar estudos de Qualidade Ambiental em Ambientes Internos (IEQ) e testar a eficácia de elementos de sombreamento nesta com o objetivo de melhorar seu desempenho térmico.

A partir dos resultados obtidos nesse trabalho, pode-se concluir que:

- O estudo de caso em seu estado atual não apresenta condições de conforto adequadas, demonstrando grande índice de desconforto por frio em Curitiba e desconforto por sobreaquecimento em Picos ao longo do ano;
- Levando em conta o item anterior, o desconforto térmico em relação ao frio é algo que elementos de sombreamento são incapazes de resolver, uma vez que esse tipo de solução é utilizada para problemáticas com desconforto por sobreaquecimento;
- Dentre os cenários simulados no presente trabalho, o que teve melhor desempenho para todas as cidades estudadas em questões de conforto e, conseqüentemente, energético foi o cenário IV, que representa o estudo de caso com o uso de elementos de sombreamento de forma responsiva, dessa forma, destacando a importância e eficácia do uso de elementos responsivos como solução para problemáticas que envolvam conforto e eficiência energética;

5.2 Desenvolvimentos futuros

Na sequência do presente trabalho recomenda-se levar em consideração os seguintes pontos para oportunidades de trabalhos futuros:

- Diversificar a composição do material e/ou a espessura dos elementos de sombreamento, buscando a melhor combinação para desempenho térmico-energético esperado e/ou buscado.
- Analisar a influência de diferentes dimensões, diferentes graus de proteção e trabalhar com aumento de massa térmica e sombreamento externo de telhados e fachadas em caso de aplicação em cidades como Picos ou Brasília.
- Realizar simulações semelhantes, porém desta vez considerando o uso de ar-condicionado
- Realizar estudos utilizando o mesmo estudo de caso ou edificações localizadas em locais com o mesmo tipo de clima da cidade de Curitiba, mas desta vez com soluções para desconforto por frio, aplicando o conceito adaptativo/responsivo no trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] IEA, “Technology roadmap - Energy efficient building envelopes,” 2013.
- [2] D. Aelenei, L. Aelenei, and C. P. Vieira, “Adaptive Façade: Concept, Applications, Research Questions,” *Energy Procedia*, vol. 91, pp. 269–275, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.218.
- [3] R. Loonen *et al.*, “Design for façade adaptability: Towards a unified and systematic characterization,” *10th Conf. Adv. Build. Ski.*, no. 2015, pp. 1284–1294, 2015.
- [4] M. Brzezicki, D. Aelenei, L. Aelenei, R. Romano, E. S. Mazzucchelli, and J. M. Rico-Martinez, “Introduction,” in *Case Studies - Adaptive Facade Network*, L. Aelenei, D. Aelenei, R. Romano, E. S. Mazzucchelli, M. Brzezicki, and J. M. Rico-Martinez, Eds. TU Delft Open for the COST Action 1403 adaptive facade network, 2018, pp. 11–13.
- [5] M. Doya and F. Goia, “Mapping of Test facilities to evaluate key performances of Adaptive Façade Components,” in *Building Performance Simulation and Characterization of Adaptive Facades – Adaptive Facade Network*, F. Favoino, R. C. G. M. Loonen, M. Doya, F. Goia, C. Bedon, and F. Babich, Eds. TU Delft Open for the COST Action 1403 adaptive facade network, 2018, p. 127.
- [6] R. C. G. M. Loonen and F. Favoino, “Computational performance prediction of switchable windows,” in *Building Performance Simulation and Characterization of Adaptive Facades – Adaptive Facade Network*, F. Favoino, R. C. G. M. Loonen, M. Doya, F. Goia, C. Bedon, and F. Babich, Eds. TU Delft Open for the COST Action 1403 adaptive facade network, 2018, p. 53.
- [7] R. Baetens, B. P. Jelle, and A. Gustavsen, “Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, no. 2, pp. 87–105, 2010, doi: 10.1016/j.solmat.2009.08.021.
- [8] R. C. G. M. Loonen and J. L. M. Hensen, “SMART WINDOWS WITH DYNAMIC SPECTRAL SELECTIVITY – A SCOPING STUDY Unit Building Physics and Services , Department of the Built Environment Eindhoven University of Technology , the Netherlands Contact : r.c.g.m.loonen@tue.nl METHODOLOGY : SCOPING STUDY,” *Proc. Build. Simul. 2015*, pp. 2158–2165, 2015.
- [9] S. E. Kalnæs and B. P. Jelle, “Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities,” *Energy Build.*, vol. 94, no. 7491, pp. 150–176, May 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.02.023.
- [10] R. Baetens, B. P. Jelle, and A. Gustavsen, “Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 9, pp. 1361–1368, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.03.026.
- [11] J. Schröder and K. Gawron, “Latent heat storage,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 5, no. 2, pp.

-
- 103–109, 1981, doi: 10.1002/er.4440050202.
- [12] N. Zhu, Z. Ma, and S. Wang, “Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 12, pp. 3169–3181, 2009, doi: 10.1016/j.enconman.2009.08.019.
- [13] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, and H. Mehling, “Free-cooling of buildings with phase change materials,” *Int. J. Refrig.*, vol. 27, no. 8, pp. 839–849, Dec. 2004, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2004.03.015.
- [14] C.-M. Lai and S. Hokoi, “Solar façades: A review,” *Build. Environ.*, vol. 91, pp. 152–165, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.01.007.
- [15] G. Quesada, D. Rouse, Y. Dutil, M. Badache, and S. Hallé, “A comprehensive review of solar facades. Opaque solar facades,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 2820–2832, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.01.078.
- [16] G. Quesada, D. Rouse, Y. Dutil, M. Badache, and S. Hallé, “A comprehensive review of solar facades. Transparent and translucent solar facades,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 2643–2651, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.02.059.
- [17] A. Henemann, “BIPV: Built-in solar energy,” *Renew. Energy Focus*, vol. 9, no. 6, pp. 14–19, Nov. 2008, doi: 10.1016/S1471-0846(08)70179-3.
- [18] S. Andreozzi *et al.*, “Self-adaptive Multi-purpose Modular Origami Structure,” *Procedia Eng.*, vol. 161, pp. 1423–1427, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.604.
- [19] A. L. Cheng and H. Bier, “Adaptive building-skin components as context-aware nodes in an extended cyber-physical network,” in *2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, Dec. 2016, pp. 257–262, doi: 10.1109/WF-IoT.2016.7845436.
- [20] P. Jayathissa, S. Caranovic, J. Hofer, Z. Nagy, and A. Schlueter, “Performative design environment for kinetic photovoltaic architecture,” *Autom. Constr.*, vol. 93, pp. 339–347, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.05.013.
- [21] T.-W. Chang, H.-Y. Huang, and S. Datta, “Design and Fabrication of a Responsive Carrier Component Envelope,” *Buildings*, vol. 9, no. 4, p. 84, Apr. 2019, doi: 10.3390/buildings9040084.
- [22] S. D. Kotsopoulos and F. Casalegno, “Responsive architectures: Prototyping components and processes for the built environments of the late digital age,” in *20th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, 2015, pp. 335–344.
- [23] G. Thun and K. Velikov, “Special issue: National Science Foundation Workshop. North house: Prototyping climate responsive envelope and control systems,” *Perkins Will Res. J.*, vol. 05, 2013.
- [24] H. Yi, D. Kim, Y. Kim, D. Kim, J. Koh, and M.-J. Kim, “3D-printed attachable kinetic shading device with alternate actuation: Use of shape-memory alloy (SMA) for climate-adaptive responsive architecture,” *Autom. Constr.*, vol. 114, p. 103151, Jun.

- 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103151.
- [25] A. Mahdavi, “Predictive simulation-based lighting and shading systems control in buildings,” *Build. Simul.*, vol. 1, no. 1, pp. 25–35, 2008, doi: 10.1007/s12273-008-8101-4.
- [26] M. L. Beaman and S. Bader, “Responsive Shading | Intelligent Façade Systems,” pp. 263–269, 2010.
- [27] A. Tabadkani, S. Banihashemi, and M. R. Hosseini, “Daylighting and visual comfort of oriental sun responsive skins: A parametric analysis,” *Build. Simul.*, vol. 11, no. 4, pp. 663–676, Aug. 2018, doi: 10.1007/s12273-018-0433-0.
- [28] “Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Simulação Termo-Energética de Edificações,” 2021. <https://labeee.ufsc.br/linhas-de-pesquisa/simulacao-termo-energetica-de-edificacoes> (accessed Oct. 25, 2021).
- [29] A. P. de A. M. Alves, “Simulação térmica multizona de um edifício escolar: uma comparação de programas no âmbito do RSECE,” Universidade do Minho: Braga, Portugal, 2011.
- [30] P. D. da S. Pereira, “Reabilitação da cantina da FEUP para melhoria do conforto higrotérmico,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal, 2015.
- [31] L. Y. I. Trevisan, “Concepção, construção e verificação da aplicabilidade de uma câmara bioclimática de baixo custo em estudos de conforto ambiental,” Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.
- [32] “Governo do Estado do Paraná. Agência de notícias do Paraná,” 2021. <http://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=102949>. (accessed Oct. 30, 2021).
- [33] E. Krüger, L. Iwamura, G. Celligoi, and E. González, “Desarrollo de una instalación de bajo costo para la investigación de confort interior,” *Monit. y evaluación la habitabilidad, Calid. del aire y Efic. energética los Edif. Exp. en España. Inst. Eduardo Torroja*, pp. 150–158, 2020.
- [34] *NBR 15.220: Desempenho térmico de edificações. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)*. Brasil, 2003.
- [35] D. A. Ribeiro, “Recomendação para a replicação de câmara bioclimática de baixo custo nas zonas bioclimáticas brasileiras,” Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.
- [36] *NBR 15.575-4: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)*. 2013.
- [37] Projeteee, “Dados Climáticos,” 2021. <http://projeteee.mma.gov.br/dados-climaticos/> (accessed Oct. 30, 2021).

-
- [38] “Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil – INMET. Banco de Dados Meteorológicos.” 2021. .
- [39] F. Mendonça and I. M. Danni-Oliveira, *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.
- [40] “Prefeitura Municipal de Curitiba. Perfil.” 2021. <https://www.curitiba.pr.gov.br/conteudo/perfil-da-cidade-de-curitiba/174> (accessed Oct. 30, 2021).
- [41] M. R. D. Cardoso, F. F. N. Marcuzzo, and J. R. Barros, “Climatic Classification of Köppen-Geiger For the State of Goiás and Federal District,” *Acta Geográfica*, vol. 8, no. 16, pp. 40–55, 2014, doi: 10.5654/actageo2014.0004.0016.
- [42] A. R. Esperidião, L. A. Soares, and E. González, “Proyecto Arquitectónico bajo el enfoque bioclimático.” .
- [43] CEN, *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings-addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, EN 15251: 2006*. Comité Europeu de Normalização, 2006.