

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE
TELHADO VERDE EXTENSIVO: ESTUDO DE CASO NO
CONTEXTO CLIMÁTICO DE BRASÍLIA**



Dissertação de Mestrado
dezembro de 2022.

Fernanda Moreira

Orientadora:

Marta Adriana Bustos
Romero

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E
URBANISMO

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE TELHADO VERDE
EXTENSIVO: ESTUDO DE CASO NO CONTEXTO CLIMÁTICO DE
BRASÍLIA

FERNANDA MOREIRA

ORIENTADOR: MARTA ADRIANA BUSTOS ROMERO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ARQUITETURA E URBANISMO

BRASÍLIA/DF:DEZEMBRO – 2022

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E
URBANISMO**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE TELHADO VERDE
EXTENSIVO: ESTUDO DE CASO NO CONTEXTO CLIMÁTICO DE
BRASÍLIA**

ARQ.^a FERNANDA MOREIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO DA FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ARQUITETURA E URBANISMO.

APROVADA POR:

Prof. Marta Adriana Bustos Romero, Dr. (FAU/UnB)
(Orientadora)

Prof. Gustavo Cantuária, Dr. (FAU/UNICEUB)
(Examinador Externo)

Prof. Rodrigo Studart Corrêa, Dr. (FUP/UnB Planaltina)
(Examinador Interno)

BRASÍLIA/DF, 12 DE DEZEMBRO DE 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

MOREIRA, FERNANDA

Avaliação do desempenho térmico de telhado verde extensivo: estudo de caso no contexto climático de Brasília.

[Distrito Federal] 2022.

xvii, 86p., 210 x 297 mm (PPG-FAU/UnB, Mestre, Arquitetura e Urbanismo, 2022).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.

1. Conforto térmico

2. Telhado verde extensivo

3. Simulação computacional

I. FAU/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MOREIRA, FERNANDA (2022). Avaliação do desempenho térmico de um telhado verde extensivo no contexto climático de Brasília. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 86p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Fernanda Moreira

TÍTULO:). Avaliação do desempenho térmico de um telhado verde extensivo no contexto climático de Brasília

GRAU: Mestre ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Fernanda Moreira

Avenida das Araucárias, lote 1325, apto 1308, Bloco B

71936-250 Águas Claras - DF - Brasil

e-mail: fernanda.arq.moreira@gmail.com

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família, especialmente à minha mãe, por ter sido meu apoio antes e após o nascimento do meu filho Noah. Sem ela não seria possível o término do mestrado. Às minhas irmãs Déborah e Raquel pela amizade e carinho comigo, principalmente no meu puerpério.

Em segundo lugar, à professora Marta Romero pela orientação e paciência ao longo do processo e por ser referência e inspiração para aqueles que, assim como eu, acreditam na educação como caminho para um mundo melhor e mais justo.

Aos professores do PPG FAU UnB pela oportunidade de ampliar meus conhecimentos, em especial o professor Caio que me apresentou o universo das simulações computacionais. Aos amigos que fiz durante o mestrado: Thiago Góes, Adriano Lopes, Daniela Werneck, Jamilson Sousa e Rejane Viegas.

Não poderia deixar de agradecer à Universidade de Brasília que me acolheu e me ofertou duas grandes oportunidades de ir além do caminho esperado na pós-graduação. Tive o privilégio de colaborar como bolsista da pesquisa do Nuesp (Núcleo de Estudos e Pesquisas em Edificações Especiais – Penal) desenvolvido pelo Lasis, (Laboratório do Ambiente Construído, Inclusão e Sustentabilidade) com a tutoria e sabedoria dos professores Augusto Cristiano Prata Esteca e Raquel Naves Blumenschein e a convivência sempre divertida e enriquecedora de muitos colegas: Keila Takagi, Pedro Muza, Gabrielle Flores, Sophia Brancaglioni, Raí Luz e Julia Camargo. Agradeço ao Lasus, (Laboratório de Sustentabilidade Aplicada à Arquitetura e ao Urbanismo) pela bolsa de pesquisa concedida no projeto Reabilitação e Humanização de Unidades Básicas de Saúde, sob a coordenação dos professores Caio Silva, Daniel Sant’Ana, Erondina Azevedo e Marta Romero, que me possibilitou ampliar os estudos sobre o uso telhados verdes em Brasília – DF.

Agradeço à secretaria e a equipe de manutenção predial do Liceu Francês de Brasília que me recebeu com muita cordialidade possibilitando a realização das medições in loco e o levantamento fotográfico da edificação, em especial: o diretor geral M. Donnat, o engenheiro Ronnan e o encarregado Alexandre Rodrigo.

Por fim, agradeço a Deus pela minha vida e pela vida de todas as pessoas que contribuíram direta e indiretamente na realização deste trabalho.

RESUMO

Melhorar o desempenho térmico das edificações com por meio de soluções bioclimáticas e sustentáveis como o uso de envoltórias verdes tem sido tema de vários estudos em âmbito internacional e nacional. Nesta direção, este trabalho se dedica ao estudo de um telhado verde extensivo localizado no edifício Liceu Francês de Brasília – DF, cidade de clima caracterizado como tropical de altitude, com duas estações distintas: período quente e úmido: verão; período quente e seco: inverno. Os procedimentos metodológicos se configuram em três etapas: revisão bibliográfica sobre coberturas verdes, seu estado da arte e suas tipologias, com destaque os autores Dunnet e Kingsbury (2004), Saadatian (2013), Castleton e Jafall (2012); Romero (2019) relaciona ações e recomendações projetuais ponderando a existência de uma legislação bioclimática; também foram revisadas normas e regulamentos que contemplam o uso das coberturas verdes em especial os incentivos fiscais e programas governamentais vigentes em escala global, nacional e local; caracterização climática de Brasília e os métodos de simulação computacional para tetos vegetados. Foram utilizados na simulação o *Sketchup* na versão Web para a modelagem da sala de aula e a ferramenta de cálculo *Energy Plus* versão 22.1.0 para as simulações térmicas. O método de análise de sensibilidade é explorado com a simulação do teto verde na condição atual em que se encontra e mais dois cenários: um que substitui a cobertura vegetada por telha de fibrocimento com acabamento natural; e por último, uma telha de fibrocimento com a face externa pintada de branco. Conclui-se que o uso do telhado verde extensivo promove reduções de cargas térmicas para resfriamento quando comparado as tipologias de telha de fibrocimento convencional e a versão pintada de branco. As reduções de cargas térmicas variaram em mais 93% (42,5 kWh/m². ano). O balanço térmico para o período do verão (fevereiro) e final do inverno (setembro) também foi analisado para as três tipologias de cobertura e a evapotranspiração foi o parâmetro que se mostrou como o mais relevante para diminuição da demanda de resfriamento, sendo o telhado verde a melhor cobertura em desempenho térmico para ambos os períodos avaliados.

Palavras-chave: conforto térmico; bioclimatismo, telhado verde extensivo; Brasília; simulação computacional.

ABSTRACT

Improving the thermal performance of buildings through bioclimatic and sustainable solutions such as the use of green envelopes has been the subject of several studies at an international and national level. In this direction, this work is dedicated to the study of an extensive green roof located in the Liceu Francês building in Brasília – DF, a city characterized as high-altitude tropical climate, with two distinct seasons: hot and humid period: summer; hot and dry period: winter. The methodological procedures are configured in three stages: bibliographic review on green roofs, their state of the art and their typologies, with emphasis on the authors Dunnet and Kingsbury (2004), Saadatian (2013), Castleton and Jafall (2012); Romero (2019) lists design actions and recommendations considering the existence of bioclimatic legislation; rules and regulations were also reviewed that contemplate the use of green roofs, in particular tax incentives and government programs in force on a global, national and local scale; climatic characterization of Brasília and computer simulation methods for vegetated roofs. Sketchup Web version was used in the simulation for classroom modeling and the calculation tool Energy Plus version 22.1.0 for thermal simulations. The sensitivity analysis method is explored with the simulation of the green roof in its current condition and two more scenarios: one that replaces the vegetated roof with fibrocement roof with a natural finish; and finally, a fibrocement roof with the external face painted white. It is concluded that the use of the extensive green roof promotes reductions in thermal loads for cooling when compared to the conventional fiber cement tile typologies and the white painted version. The reductions in thermal loads varied by over 93% (42.5 kWh/m². year). The thermal balance for the period of summer (February) and end of winter (September) was also analyzed for the three types of coverage and evapotranspiration was the parameter that proved to be the most relevant to decrease the cooling demand, being the roof green the best coverage in thermal performance for both periods evaluated.

Key Words: thermal comfort, bioclimatism, extensive green roof; Brasília; building performance simulation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Desempenho ambiental das edificações	3
1.2	Justificativa	5
1.3	Objetivos	7
1.3.1	Objetivo geral	7
1.3.2	Objetivos específicos	7
1.3.3	Método.....	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1	Telhados verdes: origens	10
2.2	Contextualização mundial, nacional e local	12
2.3	Tipologias dos telhados verdes	15
2.3.1	Cobertura verde intensiva.....	17
2.3.2	Cobertura intensiva simples.....	17
2.3.3	Cobertura verde extensiva	18
2.3.4	Coberturas híbridas.....	18
2.3.5	Classificação pelo método construtivo de coberturas verdes	21
2.3.6	Galeria de telhados verdes.....	21
2.4	Normas e especificações	25
2.5	Vantagens ambientais e limitações	26
2.5.1	Economia de energia e coberturas verdes.....	26
2.5.2	Clima urbano e coberturas verdes	27
2.5.3	Poluição atmosférica e coberturas verdes.....	33
2.5.4	Manejo de águas pluviais e coberturas verdes.....	35
2.5.5	Biodiversidade nas coberturas verdes.....	36
2.5.6	Funções adicionais das coberturas verdes	38
2.5.7	Desvantagens e limitações das coberturas verdes	38
2.6	Desempenho e balanço térmico das coberturas verdes	41
3	BRASÍLIA E O CLIMA QUENTE	45
3.1	Caracterização climática de Brasília	45
3.2	Recomendações de estratégias bioclimáticas	48
3.3	Estudo de caso	52
4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM COBERTURAS VERDES	59
4.1	EnergyPlus e a modelagem de coberturas verdes	59
4.2	Balanço térmico do modelo	60
4.3	Metodologia de simulação para o Liceu Francês de Brasília	63
4.4	Descrição do modelo de simulação	67
4.5	Propriedades físicas dos materiais e parâmetros da cobertura verde	64
4.6	Utilização do arquivo climático de Brasília	70
4.7	Validação do modelo	74
5	SIMULAÇÕES DOS CENÁRIOS	76
5.1.1	Resumo do método	78
5.1.2	Telhado verde extensivo modular.....	78
5.1.3	Telha fibrocimento acabamento natural	78
5.1.4	Telha fibrocimento com pintura branca.....	78
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
7	CONCLUSÕES	85
8	REFERÊNCIAS	89

9	APÊNDICE	97
9.1	Apêndice I - Interface do programa para inputs e outputs	97
9.2	Apêndice II – Cálculo da troca de energia da vegetação e substrato por radiação de ondas longas	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas da Pesquisa.....	08
Figura 2 - Telhado escocês coberto com turfa.....	10
Figura 3 - Jardins suspensos da Babilônia.....	10
Figura 4 - Torre Guinigi em Lucca, Itália.	11
Figura 5 - Convento La Tourette, Le Corbusier, L'arbresle, França.....	11
Figura 6 - Edifício Solaire Building, Manhattan, New York..	12
Figura 7 - Centro Empresarial DOS, Lima, Peru	12
Figura 8 –Tipos de coberturas verdes.....	16
Figura 9 - Exemplos de coberturas intensivas em Singapura.....	17
Figura 10 - Exemplos de coberturas intensivas em Singapura.....	18
Figura 11 - Cobertura híbrida com função extra	19
Figura 12 - Coberturas verdes para biodiversidade (<i>biodiversity roof</i>).....	19
Figura 13 - Coberturas castanhas (<i>brown roofs</i>)	19
Figura 14 - Cobertura verde extensiva x intensiva.....	20
Figura 15 – Método Pré-cultivado.....	21
Figura 16 – Método Modular.....	21
Figura 17 - Método Completo	21
Figura 18 – OS House by Nolaster Architects, Santander, Espanha.....	22
Figura 19 –Nanyang School of Art, Singapura..	22
Figura 20 - Mountain Dwellings, Big Architects	23
Figura 21 - Casa Paraty, Marcio Kogan Arquitetos, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.....	23
Figura 22 - Academia de Ciências da Califórnia, San Francisco, Estados Unidos (EUA) Renzo Piano Architects.....	24
Figura 23 - Mill Valley Residence by McGlashan Architecture, Califórnia, EUA.....	24
Figura 24 - Ilha de calor urbana atmosférica.....	29
Figura 25 - Radiação solar e suas interações com a atmosfera e as superfícies.....	21
Figura 26 - Trocas de calor em edifícios.....	42
Figura 27 - Chave de Classificação de Climática de Köppen simplificada por Setzer.	45
Figura 28 - Temperatura máxima do ar.....	45
Figura 29 - Temperatura mínima do ar.....	46
Figura 30 - Temperatura mínima do ar.....	46
Figura 31 – Umidade relativa do ar	47

Figura 32 - Precipitação acumulada	61
Figura 33 - Localização do Liceu Francês De Brasília e volumetria do edifício	51
Figura 34 - Subsolo do Liceu Francês De Brasília e volumetria do edifício.....	52
Figura 35 - Térreo do Liceu Francês.	52
Figura 36 - Setorização do Liceu Francês.....	53
Figura 37 – Pavimento Superior do Liceu Francês.	53
Figura 38 - Cortes AA ilustrando o bom aproveitamento do perfil natural do terreno.....	67
Figura 39 - Soluções bioclimáticas aplicadas às fachadas da edificação. Fachadas oeste, norte e leste, respectivamente.....	55
Figura 40 - Teto verde plantado com a espécie <i>callisia repens</i> , popularmente conhecida como dinheiro-em penca.....	56
Figura 41 - Detalhamento do teto verde implantado pelo sistema modular.....	56
Figura 42 - Fluxograma da metodologia da pesquisa.....	63
Figura 43 - Planta pavimento superior do Liceu Francês de Brasília. Em destaque, (contorno azul) o bloco da sala de aula escolhida. Sem escala.....	66
Figura 44 - Ampliação do bloco em estudo.....	68
Figura 45 - Sala de aula em estudo.....	68
Figura 46 - Corte esquemático da sala e sua cobertura verde.....	68
Figura 47 - Configuração arquitetônica externa do bloco da sala de aula em estudo composta por brises e beirais generosos. Fachada leste.....	69
Figura 48- Levantamento fotográfico da sala de aula em estudo, sala F203.....	69
Figura 49 - Trajetória solar no dia 26 de março de 2022.	70
Figura 50 - Cobertura verde no dia das medições de temperatura do ar e umidade.....	71
Figura 51 - Desenho esquemático do sistema de drenagem da cobertura verde em estudo.....	71
Figura 52 - Valores para temperatura, umidade, radiação e precipitação para o arquivo climático de Brasília.	72
Figura 53 - Análise de conforto a partir do arquivo climático de Brasília.....	73
Figura 54 - EP Lunch do Energy Plus: interface do usuário.....	95
Figura 55 - IDF Editor do EnergyPlus: interface do usuário.....	96
Figura 56 - O campo Surface Convection Algorithm.....	98
Figura 57 - Thermal Zone and Surfaces.....	99
Figura 58 - Building Surface Detailed.....	99

Figura 60 - Fenestration Surface: Detailed.....	100
Figura 61 - Fenestration Surface: Detailed.....	100
Figura 62. Material.....	101
Figura 63. Material.....	101

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Camadas de solo natural X camadas de um teto verde genérico.....	29
Quadro 2 - Síntese da caracterização das tipologias de cobertura verde.....	33
Quadro 3 - Classificação das coberturas verdes de acordo com o método construtivo.....	34
Quadro 4 - Coberturas verdes e economia de energia.....	40
Quadro 5 - Ilha de Calor Urbana de Superfície e Atmosférica.....	42
Quadro 6 - Poluentes críticos da atmosfera.....	46
Quadro 7 - Redução de temperatura do ar em ambientes com envoltória verde.....	56
Quadro 8 - Relação das coberturas verdes com a economia de energia.....	56
Quadro 9 - Estratégias Bioclimáticas para a cidade de Brasília.....	63
Quadro 10 - Ações e Recomendações Projetuais.....	64
Quadro 11 - Principais características contabilizadas no modelo.....	80
Quadro 12 - Dados físicos dos materiais da envoltória dos modelos.....	91
Quadro 13 - Parâmetros físicos do vidro da janela.....	92
Quadro 14 - Dados físicos das camadas utilizadas no telhado verde.....	92
Quadro 15- Parâmetros gerais da vegetação e do substrato do telhado verde.....	92
Quadro 15 - Resumo dos valores encontrados no arquivo climático de Brasília.....	94
Quadro 16 - Resumo dos valores encontrados no arquivo climático de Brasília.....	94
Quadro 17 – Medição local.....	95
Quadro 18 - Balanço térmico da cobertura verde	97
Quadro 19 - Balanço térmico da cobertura de fibrocimento e laje impermeabilizada.....	98
Quadro 20 - Cargas térmicas ideais a partir de cargas fixas.....	98
Quadro 21 – Dados meteorológicos dos períodos selecionados em fevereiro e setembro.....	106
Quadro 22 - Campos da Classe Building na interface do <i>EnergyPlus</i> : interface do usuário....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - comparação de desempenho térmico entre cobertura verde e fibrocimento	79
Tabela 2 - comparação de desempenho térmico entre cobertura verde e fibrocimento branco	79
Tabela 3 - cargas térmicas ideais	79
Tabela 4 - desempenho térmico anual para as três coberturas simuladas	80
Tabela 5 - resultado do balanço térmico das três coberturas e seus componentes	81
Tabela 6 - carga térmica da cobertura verde e fibrocimento natural para os períodos de fevereiro e setembro	83
Tabela 7 - carga térmica da cobertura verde e fibrocimento pintado de branco para os períodos de fevereiro e setembro.....	83
Tabela 8 - temperaturas superficiais (valores máximos, médios e mínimos), cargas térmicas e calor acumulado para os períodos de fevereiro e setembro.....	84

LISTA DE SÍMBOLOS

U_T	Transmitância térmica total ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
ϕ_q	Fluxo de calor total (W)
ΔT	Varição entre a temperatura interna e externa ($^\circ C$)
h	Comprimento da superfície analisada (m)
C_T	Capacidade térmica total ($kJ/m^2 \cdot ^\circ C$)
e	Espessura da camada (m)
c	Calor específico ($kJ/kg \ ^\circ C$)
ρ	Densidade de massa aparente (Kg/m^3)
R_T	Resistência térmica total ($m^2 \cdot ^\circ C / W$)
λ	Condutividade térmica ($W/m \cdot ^\circ C$)
b	Largura (m)
T_{ext}	Temperatura externa ($^\circ C$)
T_{int}	Temperatura interna ($^\circ C$)
A	Amplitude térmica ($^\circ C$)
t	Tempo (s)
TBS_{ext}	Temperatura externa do Bulbo Seco ($^\circ C$)
$Rd_{inc.}$	Radiação Solar direta incidente sobre a superfície (W/m^2)

1 INTRODUÇÃO

A vegetação é um elemento chave para a arquitetura e o urbanismo bioclimático e seus benefícios são inúmeros a depender da escala de sua implantação (Romero, 2011). Os jardins na escala urbana formados por forrações, arbustos e árvores têm o potencial de melhorar os níveis de umidade do ar devido ao processo de evapotranspiração das folhas, além da sombra gerada pelas espécies de maior porte que protegem as superfícies dos ganhos de calor por radiação direta. Outro papel relevante da vegetação urbana é a diminuição da velocidade dos ventos e a retenção de partículas de poeira e fuligem e consequente melhoria na qualidade do ar (LUO et al., 2015; MARCHI et al., 2015). Nos dias de hoje, as superfícies vegetadas contribuem para diminuir o efeito ilha urbana de calor sendo uma importante medida adaptativa para os edifícios localizados nos grandes centros urbanos.

Na escala do edifício, os telhados e fachadas vegetais desde a arquitetura vernacular se mostram como boas superfícies para aumentar o isolamento térmico tanto no verão como no inverno. Em um clima quente e seco, a massa termorreguladora é necessária nas paredes e na cobertura, a fim de equilibrar as grandes oscilações de temperatura ao longo do dia. Além do mais realizam a retenção das águas pluviais (HARPER et al., 2015; SEBTI; BENNIS; FUAMBA, 2016; VERSINI et al., 2015). As coberturas verdes promovem um melhor isolamento acústico (AZKORRA et al., 2015; CONNELLY; HODGSON, 2015), se relacionam diretamente com a economia de energia pois diminuem a demanda por resfriamento mecânico (COMA et al., 2014; LA ROCHE; BERARDI, 2014) e aquecimento (CAMERON; TAYLOR; EMMETT, 2014; LUNDHOLM; WEDDLE; MACIVOR, 2014), ademais têm-se o aumento da biodiversidade do local onde o teto verde é implantado (LIN; PHILPOTT; JHA, 2015). O ecossistema criado pela interação do telhado verde com o seu entorno mimetiza várias propriedades do solo e gera serviços ecossistêmicos que são ausentes no telhado convencional (OBERDORFER et al., 2007).

As coberturas são as superfícies mais expostas aos elementos climáticos e por isso, as mais afetadas pela amplitude térmica. O impacto da radiação solar em dias de verão, as perdas de calor durante a noite, chuva e neve no inverno, afetam os telhados mais do que qualquer outra parte da edificação. Segundo Givoni (1976), em países de clima quente, a cobertura é a principal fonte de aquecimento de edifícios térreos ou de poucos pavimentos. Neste sentido, os revestimentos vegetais para os telhados das edificações são caminhos alternativos para eliminar

a subutilização dessa envoltória, melhorando assim o desempenho térmico dos ambientes internos.

A cidade sustentável em seu estado da arte corresponde à cidade compacta como solução mais coerente para o equilíbrio dos recursos naturais e serviços ecológicos gerados pela natureza. Contudo, os estudos mostram que a maior parte da radiação solar absorvida durante o dia pelas superfícies horizontais e verticais se transforma em energia térmica, que por sua vez, continua irradiando no período noturno criando assim uma ilha urbana de calor. Segundo Romero (2000 p.01), os efeitos do microclima dão indicações para mudanças do clima geral de forma favorável, ou seja, as pequenas superfícies podem contribuir para a melhora ou piora do clima.

Por isso, o uso de envoltórias verdes deve ser visto como meio potencial para a promoção de melhores condições de conforto térmico não somente dos espaços internos, mas de todo o conjunto urbano, fazendo parte de um ecossistema com um propósito que não só emula a natureza como faz parte dela. Essas intervenções podem se tornar mecanismos de melhoria de cidades já adensadas, porém, com sérios problemas em sua morfologia urbana e carência de espaços de qualidade que poderiam ser parcialmente compensados com a inserção de telhados verdes.

O potencial de redução de temperatura do ar interno com envoltórias verdes sejam elas aplicadas em coberturas ou fachadas tem sido tema de vários estudos em âmbito internacional e nacional. A pesquisa desenvolvida por Montanari e Labaki (2017) apresenta um panorama dos estudos científicos disponíveis sobre o tema, bem como aponta lacunas com potencial de aprofundamento para estudos futuros. Dentre os estudos compilados no referido artigo, o estudo realizado por Perez et al. (2015) explora um telhado verde pouco sombreado com cerca de 10% de predomínio de vegetação mostrando que, nessas circunstâncias, o conforto térmico acaba sendo promovido por dependência direta do material do substrato, ademais de demonstrar a influência entre a composição do substrato e o sombreamento. A respeito do aspecto climático, essa pode ser a variável mais importante, como destaca Lin et al (2013), sobre a eficiência térmica das coberturas que varia em diferentes climas. Peng e Jim (2015) em suas abordagens sobre performance térmica sazonal e diurna em telhados verdes extensivos situados em clima subtropical, mostram que 83,6 a 86% das variações térmicas dos telhados verdes se relacionam com a temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar e umidade do solo. Sendo assim, das cinco características citadas, quatro são características climáticas. O mesmo artigo de Montanari e Labaki (2017) aponta que no Brasil há poucos estudos

comparativos que levem em conta o contexto climático, os telhados verdes e telhados comumente comercializados no país como a telha cerâmica ou de fibrocimento. Um dos poucos, e não muito atual, é o experimento apresentado por Parizotto e Lamberts (2011) que comprova os efeitos benéficos dos telhados verdes em clima temperado no desempenho térmico e na eficiência energética da edificação. Na Ásia, Lee, Ryu e Jiang (2015) demonstram que os tetos verdes são mais interessantes sob o ponto de vista da economia de energia devido ao uso de condicionamento ativo que as coberturas com materiais reflexivos considerando o verão como período analisado.

Um telhado verde é uma cobertura plana ou inclinada que possui sua superfície parcialmente ou completamente revestida por algum tipo de vegetação. Denominações como coberturas vegetadas, telhados verdes, telhado jardim, coberturas vivas também podem ser vistas na literatura. Oberndorfer et al. (2007) consideram como cobertura verde toda a estrutura do telhado incluindo a vegetação e as camadas adicionais pois é o conjunto delas que define sua funcionalidade. Na prática, um teto verde precisa emular o que ocorre quando espécies vegetais são plantadas no solo, porém com uma escala reduzida e com um cuidado maior em relação à presença de água. Para sua fixação é necessária uma camada de substrato, além de outras camadas destinadas a resguardar a laje de cobertura de danos causados pela água ou as raízes das espécies plantadas.

Como definição preliminar das coberturas vegetadas, Garland (2002) as classifica como intensiva e extensiva conforme a complexidade dos elementos que o compõe. Ambos os sistemas apresentam muitos benefícios ambientais e são discutidos com mais detalhes adiante. As coberturas extensivas são consideradas eco eficientes por contribuírem para o conforto ambiental e a eficiência energética, sem demandar grandes investimentos para a sua construção e manutenção. Por isso essa tipologia é a escolhida para compor as análises do presente estudo.

1.1 Desempenho ambiental das edificações

A presença do verde no meio urbano se ampliou nos últimos anos aos edifícios e suas envoltórias devido aos aspectos desse elemento relacionados à sustentabilidade. Além dos espaços públicos vegetados como praças e parques, temos a valorização de fachadas e telhados com a inserção sistemática de vegetação.

Segundo Cook (1997), a arquitetura vernacular teve seu início a partir do confronto de três aspectos: as condições climáticas, a localização e a necessidade de uso, sendo o fator mais preponderante dos três, o fator climático. Romero (2015, p. 17) relaciona a arquitetura

bioclimática com os antecedentes vernaculares que servem como exemplos de respostas adequadas do homem às exigências do meio ambiente.

Quando se fala em desempenho ambiental do edifício, considera-se o conjunto de características da construção e do seu entorno imediato, ou adaptação de uma edificação existente, que lhe deixa apto a satisfazer as necessidades de gestão de impactos da construção sobre o ambiente exterior e criação de um ambiente interno saudável e confortável.

Os efeitos da urbanização nos elementos climáticos e ambientais é uma abordagem importante e necessária. As soluções arquitetônicas para as coberturas das edificações ainda carecem de estudos específicos no Brasil, como apontado anteriormente por meio de algumas revisões bibliográficas, e, mais ainda, para o contexto climático de Brasília que apresenta duas estações bem definidas: quente e seca e quente e úmida.

Para Corbella (2016), o objetivo do projeto de arquitetura bioclimática é prover um ambiente construído com conforto físico, sadio e agradável, adaptado ao clima local, que minimize o consumo de energia convencional e que necessite da menor potência elétrica possível, o que também leva à mínima produção de poluição. Romero (2019, p. 38) lista oito estratégias para restringir ganhos solares nas edificações: “dispositivos de proteção solar externos, coberturas duplas, colchão de ar, forro ventilado, passeios cobertos ou semicobertos, pele dupla, cores claras ou refletantes e coberturas vegetais.”

A plataforma nacional Projeteo (Projetando Edificações Energeticamente Eficientes) indica para Brasília a inércia térmica, a ventilação natural e o sombreamento como principais soluções de projeto que contemplam o bioclimatismo.

Sobre inércia térmica, quando utilizada proporciona diminuição das amplitudes térmicas no ambiente interno, ademais de promover atraso térmico no fluxo de calor, criando uma defasagem entre temperatura interna e externa. Essa estratégia é muito eficaz quando o projetista se preocupa com os materiais da envoltória do edifício, inclusive com os que são aplicados na cobertura. Quanto mais densidade nos materiais, mais elevada é sua capacidade térmica, e ainda a admitância térmica, que diz respeito à capacidade com que o material absorve e libera calor.

Como a cidade de Brasília apresenta características de clima quente e seco em grande parte do ano e retomando as considerações de Givoni (1976) sobre regiões de clima quente, onde a cobertura é a principal fonte de aquecimento de edifícios térreos ou de poucos pavimentos, enfatiza-se o interesse em investigar o desempenho térmico de telhados verdes extensivos para o clima da capital federal.

1.2 Justificativa

As cidades de clima tropical apresentam temperaturas elevadas durante o ano todo e por isso, as áreas verdes são elementos tão importantes na escala urbana e na escala do edifício. Com o crescimento desordenado das cidades, esses espaços acabam perdendo força com a predominância da massa edificada, comprometendo o equilíbrio entre áreas verdes e áreas construídas, aspecto fundamental para mitigação dos efeitos térmicos, que incorpora resiliência para a estrutura das cidades e das edificações. Em climas predominantemente quentes, como ocorre em Brasília, é relevante pensar na redução dos ganhos térmicos por radiação solar direta na envoltória da edificação e por conseguinte, o amortecimento térmico de superfícies construídas promovido pelos telhados vegetados merece mais investigações a respeito de suas variáveis e assim, uma otimização dos seus efeitos como solução bioclimática que atenda as demandas da realidade climática na qual são propostas.

A avaliação do desempenho térmico de telhados verdes pode ser realizada de diferentes maneiras, desde medições da temperatura de superfície interna da envoltória (faces internas de lajes sob a influência de camada vegetal), quanto medição da temperatura do ar do ambiente interno na altura do usuário, experimentos, cálculos e modelos de avaliação até simulações computacionais. Parizotto e Lamberts (2011) investigaram a performance térmica de um telhado verde comparado aos telhados cerâmico e metálico (painéis fotovoltaicos) instalados na mesma edificação, no contexto climático de Florianópolis. Os parâmetros meteorológicos (radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do ar foram obtidos por meio de uma estação meteorológica posicionada próximo ao edifício experimental. Moody e Sailor (2013) desenvolveram e aplicaram uma métrica para investigar o desempenho energético de telhados verdes em quatro contextos climáticos nos Estados Unidos: Portland, Oregon; Chicago, Illinois; Atlanta, Georgia, Houston e Texas. Apesar do estudo não ter sido realizado em um país tropical, ele é relevante, pois traz uma abordagem quantitativa na avaliação do desempenho térmico de telhados verdes por intermédio da simulação computacional, enfatizando os papéis da vegetação, do solo, do isolamento e das camadas de suporte ao telhado verde como fatores que afetam diretamente o seu desempenho energético. A simulação foi realizada utilizando o software *Energy Plus*.

Face aos desafios de amenizar o impacto que o clima urbano tem sobre as edificações em relação ao conforto térmico e consumo energético, entende-se que é necessário compreender melhor como as coberturas verdes extensivas podem ser uma alternativa para novas edificações ou reformas em edifícios existentes. A escolha pelo Liceu Francês de Brasília se justifica por

tratar-se de um telhado extensivo com grandes dimensões (o maior teto verde da capital com 3.300 m²) cuja existência compõe o partido arquitetônico do projeto, além de outras estratégias bioclimáticas relevantes. O intuito da pesquisa é entender se a cobertura vegetada realmente representa uma vantagem ambiental para a edificação mesmo em seu contexto urbano, margeando a reserva ambiental do Jardim Botânico no Lago Sul, uma região com inúmeros condomínios horizontais, representando uma região de baixa densidade construtiva.

Assim como os experimentos citados a avaliação quer contribuir com as produções acadêmicas voltadas para o entendimento do uso de telhados verdes no contexto climático do Distrito Federal, bem como entender o peso de algumas variáveis que configuram os tetos jardins, como o material de cobertura e sua espessura, cavidade entre a laje de forro e as camadas do telhado verde, além da coerência entre essas variáveis. A modelagem e simulação computacional tem mostrado que a tecnologia pode ser uma ferramenta relevante para validar o desempenho ambiental de propostas para novos edifícios ou retrofit e por essa razão, a pesquisa também aspira contribuir com o conhecimento que esse nicho tem gerado nos últimos anos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral é contribuir para a melhoria no entendimento sobre o uso de telhados verdes extensivos no contexto climático de Brasília.

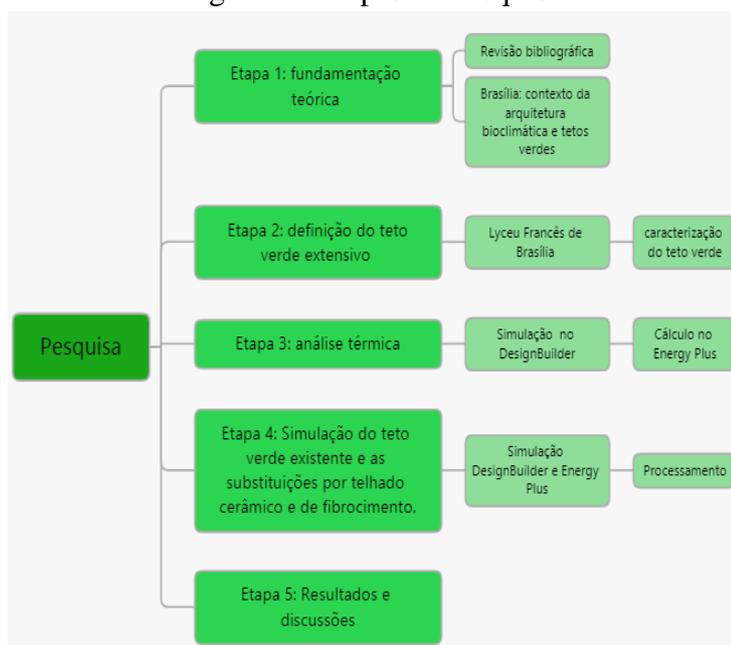
1.3.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência que os tetos verdes extensivos desempenham na temperatura interna das edificações;
- Avaliar o impacto da troca do material de cobertura na temperatura interna da edificação simulada através da Análise de Sensibilidade;
- Sugerir recomendações de projeto para telhados verdes extensivos para o clima de Brasília.

1.3.3 Método

A simulação computacional é o método adotado para realizar o estudo comparativo do desempenho térmico dos telhados verdes, cujas previsões obtidas por meio dela servem para avaliar o potencial de melhoria/ piora do desempenho térmico dos cenários composto por teto verde, telhado de fibrocimento com acabamento natural e fibrocimento pintado de branco. Os dados de entrada para as simulações são: geometria da edificação, propriedades térmicas dos materiais construtivos, padrão de uso e ocupação do edifício, considerando o foco do estudo que é o desempenho térmico dos telhados verdes do Liceu Francês de Brasília. Para alcançar o objetivo da pesquisa, as seguintes etapas serão realizadas:

Figura 1 - Etapas da Pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A revisão bibliográfica sobre tetos verdes, seu uso nos cenários internacional, nacional e local, as tipologias e as normas vigentes, vantagens e limitações dessa alternativa de cobertura são abordados na primeira etapa da pesquisa.

Na etapa seguinte, os aspectos do contexto climático de Brasília, as estratégias bioclimáticas recomendadas e o estudo de caso proposto são o foco da abordagem do capítulo.

A terceira etapa se dedica ao método de simulação computacional com a apresentação da ferramenta de cálculo *EnergyPlus*® versão 22.1.0 e como ela foi utilizada para atingir o objetivo de avaliar o desempenho térmico do telhado verde existente do Liceu Francês de Brasília.

A quarta etapa compreende à simulação dos cenários hipotéticos. Nesse sentido, a aplicação do teto verde na condição original do projeto foi investigada para avaliar seu comportamento térmico e o papel dessas superfícies na promoção de resiliência térmica quando comparadas ao uso de cobertura de fibrocimento já que esta tipologia é de uso amplo na construção civil no Distrito Federal, devido principalmente ao baixo custo. O fibrocimento pintado de branco confere alta refletância e alta emissividade ao material convencional e costuma permitir a redução de cargas térmicas de resfriamento, o que pode ser interessante para os períodos mais quentes do ano na capital e por isso esse cenário também foi simulado.

Por fim, na quinta etapa tem-se os resultados e as discussões com a apresentação dos dados obtidos.

A dissertação utiliza o contexto da cidade de Brasília por ser uma das temáticas dos estudos empreendidos no Laboratório de Sustentabilidade aplicada à Arquitetura e Urbanismo (LASUS - FAUUNB), com enfoque no conforto térmico do ambiente construído entre os quais se destacam as pesquisas desenvolvidas por Sorte (2016) e Andrade (2018) que analisaram os espaços edificados por meio da simulação térmica. O primeiro se destaca pela simulação das paredes verdes compostas por vegetação nativa do Cerrado e o segundo trabalho investiga o desempenho térmico dos materiais superficiais que compõe o Setor de Indústrias e Abastecimento - SIA – DF. Além destes, outros trabalhos correlatos podem ser citados como a dissertação de Werneck (2018) e a tese de Vianna (2018) que abordam a questão das ilhas urbanas de calor na capital federal, além da dissertação de Andrade (2022) que trata da contribuição da vegetação para a melhoria do clima urbano com recorte para as superquadras 308 e 309 da Asa Sul.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Telhados Verdes: Origens

Os telhados verdes (*green roofs*) consistem em um revestimento vegetal sobre uma superfície edificada plana ou inclinada, acima do solo, cujo cultivo é intencional ou preparado para auto propagação, podendo ser acessível ou não ao usuário do edifício. Termos como coberturas vivas (*living roofs*), coberturas vegetais (*vegetated roofs*) e coberturas ecológicas (*eco roofs*) também são encontrados na literatura.

O uso dos tetos verdes foi notório em diferentes civilizações. Nos climas frios, o uso de coberturas ajardinadas era comum em vários países europeus onde a terra coberta com turfa vegetação nativa de regiões frias (Figura 2), funcionava como um excelente isolante térmico.

De acordo com Mendes (2013), é difícil afirmar se o crescimento da vegetação sobre as coberturas nos exemplares telhados de turfa da Islândia era intencional ou se inevitável já que a escolha dos materiais construtivos era oriunda da pobreza e a escassez de melhores recursos como a madeira. As casas apresentavam um bom desempenho térmico devido à cobertura, mas ao mesmo tempo, pecavam em ventilação natural o que as tornava altamente insalubres devido à queima interna de madeira para cozinhar. Sendo assim, o mesmo autor afirma que a visão romântica em relação às técnicas antigas deve ser discutida, visto que a necessidade motivou o surgimento da solução arquitetônica muito mais do que uma consciência vernácula. Foram séculos de tentativas e erros para um posterior reconhecimento da técnica como eficiente.

Os míticos Jardins Suspensos da Babilônia (Figura 3) e o Zigurate na região da Mesopotâmia são exemplares do uso da vegetação na cobertura e representam o ideal estético que temos desses tetos, carregando em si extravagância sem necessariamente se relacionar ao clima quente da região por suas espécies vegetais frondosas.

Figura 2 - Telhado escocês coberto com turfa.



Fonte: Página do Scottish Green Infrastructure Forum.
Disponível em: <http://www.sgif.org.uk/> Acesso em 10/03/2021.

Figura 3 - Jardins suspensos da Babilônia.



Fonte: Página da Wikipédia. Disponível em https://pt.wikipedia.org/wiki/Jardins_Suspensos_da_Babil%C3%B3nia. Acesso em 10/03/2021.

Giannopoulou et al. (2019) destaca que a utilização das coberturas verdes cresceu no período do Renascimento, devido principalmente pela prática arquitetônica que prezava pelo resgate da cultura clássica à época e pela tendência de exportação de plantas que se tornou comum naquele momento. Como exemplo deste período temos a Torre Guinigi, localizada em Lucca, Itália, com uma vegetação de grande porte mantida por um sistema próprio de irrigação. (Figura 4). Já no século XX, a incorporação do teto verde ao projeto era sinônimo de luxo e modernidade. Arquitetos como Antoni Gaudí, Le Corbusier seguido de Friedensreich Hundertwasser apoiados pelos avanços tecnológicos também aplicaram vegetação nas coberturas dos seus edifícios. O Convento La Tourette de Le Corbusier (1960) ilustra bem os tetos verdes criados sobre lajes planas com possibilidade de uso e consequente conservação da laje pela vegetação (Figura 5).

Figura 4 - Torre Guinigi em Lucca, Itália.



Fonte: Página da Wikipédia. Fonte: Página da Wikipédia. Disponível em https://pt.wikipedia.org/wiki/Jardins_Suspensos_da_Babil%C3%B3nia. Acesso em 10/03/2021

Figura 5 - Convento La Tourette, Le Corbusier, L'arbresle, França.



Fonte: Página do Archdaily. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/01-156994/classicos-da-arquitetura-convento-de-la-tourette-slash-le-corbusier>. Acesso em 10/03/2021

O uso das coberturas verdes como temos atualmente tem origem na Alemanha, em virtude de pesquisas realizadas por Reinhard Bornkamm, que observou o crescimento

espontâneo de vegetação sobre as lajes de cortiços que recebiam betume e papel para impermeabilização e posteriormente eram cobertas com areia para prevenir incêndios. Cinquenta coberturas foram catalogadas com essa técnica o que despertou o interesse em desenvolver tecnologias para incentivar o uso intencional de plantas sobre as lajes devido ao potencial de conservação das impermeabilizações (EARTH PLEDGE, 2005).

As motivações por trás do emprego dos telhados verdes nas construções novas e já existentes são diversas. Aspectos estéticos, culturais, econômicos ou ambientais podem ser considerados, porém, é o fator ambiental que faz com que os tetos vegetados sejam amplamente utilizados como medida mitigadora das ilhas urbanas de calor nas grandes cidades do mundo. Ambrosini et al. (2014) e Santamouris (2014), entre outras tantas pesquisas, demonstram esse potencial, além dos já conhecidos benefícios térmicos na escala do edifício. Giacomello (2020) salienta que nos últimos anos, os arranha-céus (Figura 6 e 7) também estão incorporando sistemas vegetativos em suas envoltórias, seja para promover conforto aos usuários, diminuir o consumo energético da edificação ou para criar um marketing verde no mercado da construção civil.

Figura 6 - Edifício Solaire Building, Manhattan, New York.



Fonte: Página do Hpb Magazine.
Disponível em:
<https://www.hpbmagazine.org/content/uploads/2020/04/08Su-The-Solaire-New-York-NY.pdf>. Acesso em 10/03/2021

Figura 7 - Centro Empresarial DOS, Lima, Peru.



Fonte: Página do GreenRoofs. Disponível em:
<https://www.greenroofs.com/2021/03/17/featured-project-real-dos/>. Acesso em 10/03/2021

2.2 Contextualização mundial, nacional e local

Incentivos financeiros diretos e indiretos, medidas para compensação ecológica e integração de normas para a implementação das coberturas verdes têm crescido mundialmente.

Sobre legislações voltadas para o incentivo do uso das coberturas verdes têm-se o exemplo de países como o Canadá, precursor na definição de exigências legais e incentivos

fiscais para o uso de coberturas verdes em edifícios residenciais, comerciais, institucionais e industriais. Os incentivos fiscais oferecidos na cidade de Toronto iniciaram com valores atraentes, entre \$75 m² e \$100,000 (R\$3,80 para câmbio em 2021) (City of Toronto, 2016). Entretanto, apesar desse pioneirismo, o Instituto *Green Roof for Health Cities* (*greenroofs.org*), organização canadense que pesquisa, difunde e incentiva o uso de coberturas verdes na América do Norte, afirma que os benefícios do uso de telhados verdes ainda são mal compreendidos e o mercado ainda necessita de maturidade se comparado à realidade europeia.

Na Europa, um exemplo pioneiro é a cidade alemã de Munique que exige que todas as coberturas dos edifícios com mais de 100 m² sejam vegetadas. A política foi implementada há mais de 20 anos e faz com que o telhado verde seja considerado um padrão construtivo (IGRA, 2011). O instituto *Green Roof for Health Cities* destaca que as políticas públicas e as pesquisas em tecnologia para uso dos telhados verdes se consolidaram muito mais no cenário europeu se comparado à América do Norte e cita Alemanha, França, Áustria e Suíça como exemplos de países que possuem normas bem definidas para utilização dos tetos vegetados tanto em novas construções como em edifícios existentes, tal como um mercado muito rico em produtos e serviços do ramo. Ainda sobre os grandes avanços europeus, merece ser citada a modificação da legislação ambiental francesa de 2015 para incorporar a exigência de tetos verdes e painéis solares nas coberturas dos novos edifícios que forem construídos em zonas comerciais em todo o país.

Na Ásia, o cenário das coberturas verdes também é bastante desenvolvido em cidades como Tóquio, Singapura, Xangai, Pequim e Austrália. Sobre políticas públicas, em Singapura o *National Parks Board* é um programa que fomenta a instalação de coberturas verdes financiando até 50% dos custos de instalação do sistema (NATIONAL PARKS, 2011) e o *BCA Green Mark Scheme Certification* que promove a sustentabilidade na indústria da construção civil com mais de 480 edifícios verdes e inteligentes (SINGAPORE GOVERNMENT, 2019). Em Tóquio as novas construções são obrigadas a cobrir no mínimo 25% do telhado com vegetação (GROWING GREEN GUIDE, 2014).

No Brasil, o movimento para consolidar leis e incentivos fiscais para a implementação de tetos verdes ainda carece de mais dedicação e por aqui o desafio se torna maior devido à continentalidade do país que gera demandas de pesquisa, por exemplo, para compreensão dos diferentes contextos climáticos, além dos fatores culturais, domínio das técnicas construtivas, diversidade de biomas etc.

Tramita no Senado desde o ano de 2015 o projeto de lei nº. 304 que dispõe que os edifícios com mais de três pavimentos, em cidades com mais de quinhentos mil habitantes, adotem sistemas de cobertura verde com o intuito de captar as águas pluviais e diminuir as ilhas urbanas de calor. O projeto segue parado de acordo com a pesquisa feita no portal do Senado em agosto de 2022.

Sobre incentivos fiscais para o emprego dos telhados verdes, o projeto de lei nº.1703 de 2011, aprovado pela Comissão de Desenvolvimento Urbano da Câmara dos Deputados sugeria benefício fiscal para as edificações que instalassem telhado verde em pelo menos 65% de suas coberturas. A proposta inicial trazia a obrigatoriedade de os prédios comerciais e residenciais com mais de três andares instalarem o telhado verde em suas coberturas, no entanto, houve uma alteração para incluir o benefício fiscal e tornar o telhado verde facultativo, podendo o benefício ser fixado em lei estadual ou municipal.

Na cidade do Rio de Janeiro, a Lei nº. 6.349 de 30 de novembro de 2012 trata da previsão da instalação de telhado verde nos prédios públicos, autarquias e fundações do Estado, além de recomendações de tipologia de teto verde e espécies vegetais nativas e seguras quanto à proliferação de mosquitos causadores de doenças.

Na região sul do país, Curitiba prevê em seu Plano Diretor (Lei nº.14.771 de 17 de dezembro de 2015) incentivos referentes ao IPTU para as pessoas que adotarem práticas de preservação e conservação do meio ambiente e cita os tetos verdes como possibilidade de conquista desse benefício. Já Blumenau, em Santa Catarina, trata em seu Código de Edificações revisado em 2018, do emprego de tetos verdes com vegetação nativa como sugestão de solução para as coberturas (Lei 1030/2015, acrescida pela Lei Complementar nº 1174/2018).

No Nordeste, a cidade de Recife, em Pernambuco, apresenta a Lei nº. 18.112/2015 que exige a implantação de telhados verdes nos edifícios habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos e não habitacionais acima de 400 m² de área de cobertura para a sua aprovação junto ao município. E no Piauí, o Estado por meio da Lei nº 6888/2016, dispõe da obrigatoriedade de as obras públicas adotarem critérios de sustentabilidade na construção civil, colocando o telhado verde como diretriz projetual.

No Distrito Federal, a Lei 5965 de 18/08/2017, vetada pelo governador Rodrigo Rollemberg, mas mantida pela Câmara Legislativa cria o IPTU verde que prevê a redução do imposto para imóveis residenciais e não residenciais que adotem medidas que reduzam o consumo de recursos naturais e diminuam os impactos ambientais, dentre elas o telhado verde,

telhado vivo ou eco telhado, sendo que o benefício pode chegar até 30% de desconto para pagamento do imposto à vista.

Da mesma forma, a elaboração de guias nacionais de coberturas verdes que orientem de maneira prática projetistas, fabricantes e usuários sobre concepção, instalação e manutenção desta solução construtiva é incipiente. Em Campo Grande, Mato Grosso do Sul, motivada pela Lei 5.591 de 28/07/2015 que prevê a implantação de cobertura verde nos edifícios da administração pública direta e indireta, Nakamura (2018) elaborou um guia de cobertura verde para a capital em sua dissertação de mestrado profissional. Não obstante, tal abordagem ainda é pouco explorada em outras cidades brasileiras.

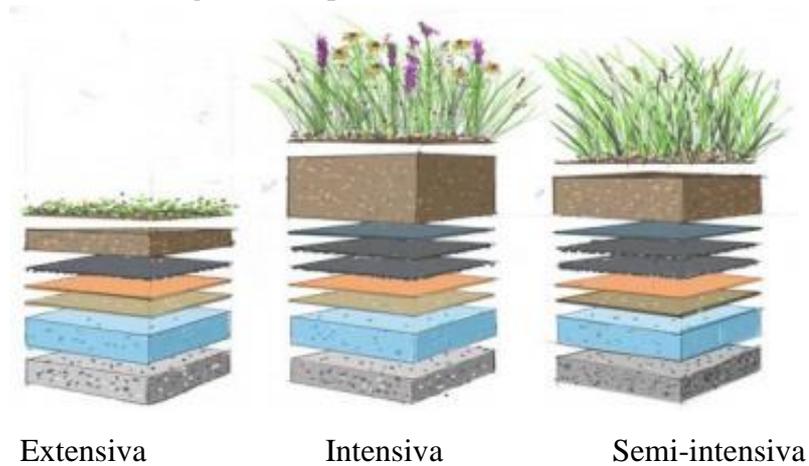
A mesma autora aponta que no cenário mundial, apenas alguns países como Alemanha, Canadá, Austrália e Hong Kong possuem regulamentos e diretrizes que orientam sobre assuntos pertinentes à implementação das coberturas vegetadas como condições climáticas, benefícios do sistema, implicações na estrutura do edifício, impermeabilização, inclinação da cobertura, seleção de plantas, irrigação, segurança e saúde dos usuários, além de uma base de dados com testes para os substratos e tipo de vegetação, entre outros.

2.3 Tipologias dos telhados verdes

De acordo com FLL - *Landscape Development and Landscaping Research Society* (Instituto de Investigação, Desenvolvimento e Construção da Paisagem, 2018), as coberturas verdes podem ser classificadas em três diferentes tipos em função do uso, elementos construtivos que as compõem e no grau de manutenção necessário. São elas: intensiva, intensiva simples e extensiva. Tal classificação não limita as adaptações necessárias para a execução dos telhados verdes tendo em vista toda a complexidade e funcionalidade que cada projeto pode demandar. Dunnet e Kingsbury (2008) consideram ainda as tipologias híbridas que contemplam as coberturas semi-extensivas, cobertura verde para biodiversidade e cobertura castanha (Brown Roofs).

Sobre a composição das três tipologias são necessárias entre cinco e sete camadas sucessivas (Figura 8): laje de sustentação; membrana impermeabilizante; camada de drenagem; substrato; e vegetação (SAADATIAN, 2013). A seguir um quadro comparativo (Quadro 1) entre as camadas de solo natural e suas equivalências em um teto verde considerando as exigências biológicas da vegetação para sua manutenção.

Figura 8 - Tipos de coberturas verdes



Fonte: Iowastormwater (2018, p.3)

Quadro 1 - Camadas de solo natural X camadas de um teto verde genérico

Solo Natural	Teto Verde	Função
Zona de raízes	Meio de cultura	Extração de água pela espécie
Camada de drenagem	Filtro geotêxtil	Absorção da água
Camada de capilaridade	Armazenamento de água	Armazenamento de água
Camada saturada	Laje impermeabilizada	Fluxo de base onde a água não é drenada

Fonte: Adaptado de IGRA (2014, p. 26).

2.3.1 Cobertura verde intensiva

Conforme afirmam Dunnet e Kingsbury (2008), as coberturas verdes ditas intensivas possuem a espessura do substrato entre 20 centímetros até 2 metros, suportando assim, espécies perenes e mais altas e, portanto, exigindo mais irrigação e manutenção (Figura 9). Representam a alternativa de cobertura vegetal mais cara para construção e manutenção para garantir seu pleno funcionamento. Normalmente, são áreas acessíveis aos usuários da edificação.

Figura 9 - Exemplos de coberturas intensivas em Singapura.



Fonte: Página do Bringing Greenery Skywards. Disponível em: <https://www.nparks.gov.sg/cuge/resources/publications/citygreen/green-in-cities-goes-skywards>. Acesso em 10/02/2022.

2.3.2 Cobertura intensiva simples

Nesta tipologia, a camada de substrato varia entre 10 e 20 centímetros com o plantio de forrações, gramíneas, arbustos e plantas perenes, permitindo também espécies intrusivas (FLL, 2018). A camada de plantio mais fina diminui a sobrecarga sobre a estrutura do edifício, mas limita as soluções de design do jardim e ocupação pelos usuários se comparado à tipologia intensiva (DUNNET; KINGSBURY, 2008). Requer gastos com manutenção regular como podas, irrigação e fertilização.

2.3.3 Cobertura verde extensiva

As coberturas extensivas representam a forma mais aproximada de um jardim cultivado no solo composto por vegetação nativa e, por consequência, totalmente adaptado ao clima do lugar e sem maiores exigências de manutenção (FLL, 2018). Geralmente, apresentam espessura do substrato entre 2 e 20 centímetros, comportando uma vegetação mais baixa, mais resiliente às condições climáticas extremas, de crescimento espontâneo e com potencial elevado de regeneração (Figura 10). Dentre as três tipologias é a mais leve, reduzindo a sobrecarga sobre a estrutura de suporte da cobertura, porém, nem sempre podem ser acessadas e exploradas pelos usuários (DUNNET; KINGSBURY, 2008). Devido a essa leveza estrutural é a tipologia mais adequada para retrofits de edificações, podendo na maioria dos casos ser implantada sem reforços estruturais (CASTLETON et al. 2010; JAFALL et al., 2012). No caso de telhados muito inclinados um sistema para prevenção de erosões deve ser pensado e em climas mais secos é necessário um projeto de irrigação dependendo das espécies plantadas, trazendo assim, variações nos custos de manutenção (FLL, 2018).

Figura 10 - Exemplos de coberturas extensivas em Singapura.



Fonte: Página Bringing Greenery Skywards.

<https://www.nparks.gov.sg/cuge/resources/publications/citygreen/green-in-cities-goes-skywards>. Acesso em 10/02/2022.

2.3.4 Coberturas Híbridas

Para Dunnet e Kingsbury (2008) a concepção de coberturas verdes pode contemplar a mistura das características das tipologias intensiva e extensiva a depender das exigências de cada projeto, podendo ser incrementadas funções extras. A função ecológica do jardim na

cobertura pode ser ampliada para reciclagem e armazenamento de água, aproveitamento da superfície vegetada para dispor equipamentos de geração de energia solar e eólica e ainda, promover a biodiversidade tanto para os animais como para as pessoas, criando sempre que possível coberturas acessíveis.

O conceito de cobertura verde semiextensiva dos autores tem o mesmo princípio da tipologia extensiva: mínima manutenção, pouco ou nenhuma irrigação e fertilização, com a variação na espessura do substrato entre 10 e 20 centímetros para permitir o plantio de uma maior variedade de espécies.

As coberturas verdes para biodiversidade (*biodiversity roof*) tem interesse na criação de habitats seminaturais já que na concepção dessa proposta se replica o substrato original do local ou é feita a sua melhoria para atrair flora e fauna (DUNNET; KINGSBURY, 2008).

Já as coberturas castanhas (*brown roofs*) são similares às coberturas extensivas descritas acima, contudo, são instaladas sem a vegetação, que é introduzida espontaneamente pela dinâmica do meio ambiente local e pelos pássaros (BLACKDOWN ROOFS, 2021). O conceito desta cobertura verde é o crescimento espontâneo da biodiversidade com o objetivo de maximizar o número de espécies vegetais e proporcionar habitat para espécies específicas de fauna e flora. A espessura varia entre 9 e 17 centímetros e não é recomendado o acesso de pessoas à cobertura.

Figura 11 - Cobertura híbrida com função extra.



Figura 12 – Coberturas verdes para biodiversidade (*biodiversity roof*)



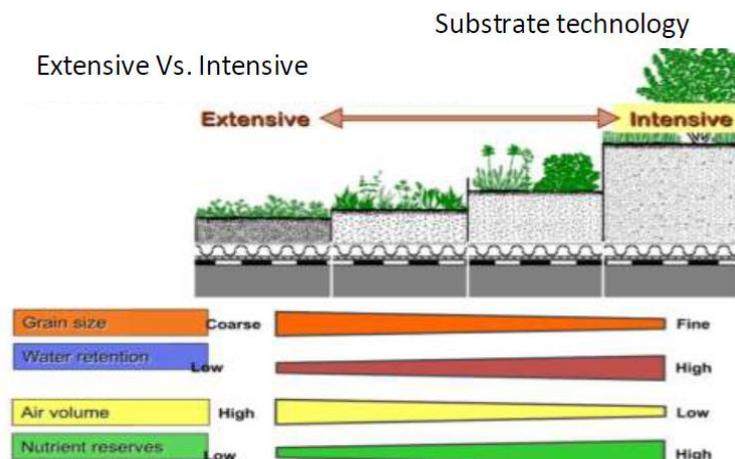
Figura 13 - Coberturas castanhas (*brown roofs*)



Fonte: FLL (2018, p. 34).

A figura a seguir e o Quadro 2 é um resumo comparativo das tipologias intensiva e extensiva de coberturas verdes, de acordo com a característica do substrato, capacidade de retenção hídrica, volume de ar e a reserva de nutrientes na camada de plantio das espécies.

Figura 14 - Cobertura verde extensiva x intensiva.



Fonte: BANIYA, TECHATO, GHIMIRE, SHRESTHA, 2018, p.146.

Quadro 2 - Síntese da caracterização das tipologias de cobertura verde

ATRIBUTOS	INTENSIVA	INTENSIVA SIMPLES	EXTENSIVA	HÍBRIDA
Manutenção	Elevada	Média/ baixa	Baixa	Baixa
Irrigação	Regular	Periódica	Não exigida/ baixa	Não exigida/ baixa
Variedade de plantas	Relva, plantas perenes, arbustos e árvores	Herbáceas, gramíneas, plantas perenes e arbustos	Musgos, seduns, herbáceas e gramíneas	Variedades endêmicas de musgos, seduns, herbáceas e gramíneas
Espessura	20 – 40 cm	10 – 20 cm	2 – 20 cm (quanto mais fino menos variedade de plantas)	6 – 20 cm
Peso (saturação + vegetação)	180 – 500 kg/ m ² (em média, a depender da espessura do substrato)	120 a 200 kg/m ²	60 a 150 kg/m ²	60 a 200 kg/m ²
Custo	Elevado	Médio	Médio/ baixo	Médio/ baixo
Utilização	Atividades de lazer, convívio, biodiversidade	biodiversidade	Proteção e função ecológica	Proteção e função ecológica/ biodiversidade

Fonte: Adaptado de DUNNETT e KINGSBURY, 2008, p. 148.

2.3.5 Classificação pelo método construtivo de coberturas verdes

As coberturas verdes também podem ser classificadas pelo método construtivo e modo de implantação (Quadro 3). São eles: sistemas pré-cultivados, modulares e inteiros. No sistema pré-cultivado, a vegetação e as camadas são vendidas em forma de rolos em que a vegetação já está desenvolvida (gramíneas) ou se desenvolverá por implantação (bancos de sementes). Os sistemas modulares são pré-fabricados e transportados para o local do projeto prontos para a implantação diretamente sobre a cobertura exposta. Já os sistemas inteiros ou completos são os mais comuns e apresentam uma só estrutura para a região vegetada, com implantação e manutenção mais complexas que os outros. A vantagem está na maior adaptabilidade espacial e às demandas de cada projeto.

Quadro 3 - Classificação das coberturas verdes de acordo com o método construtivo.

ASPECTO	PRÉ CULTIVADO	MODULAR	COMPLETO
Sistema	Plantio prévio	Plantio prévio	Em camadas
Peso	Baixo	Médio	Alto
Instalação	Simple e rápida	Simple e rápida	Complexa
Manutenção	Simple	Simple	Complexa
Custo	Baixo	Médio	Alto

Figura 15 – Método Pré-cultivado



Figura 16 - Método Modular



Figura 17 - Método Completo



Fonte: BERARDI e GHAFARIANHOSEINI, 2014, p. 598.

2.3.6 Galeria de telhados verdes

As figuras 18 a 23 mostram diferentes tipologias de edificações que utilizam as coberturas vegetadas para agregar beleza e sustentabilidade ao projeto com referências nacionais e internacionais.

Figura 18 - OS House by Nolaster Architects, Santander, Espanha.



Fonte: Página Archdaily. Disponível em: <https://www.archdaily.com/374/os-house-nolaster>. Acesso em 10/02/2022.

A casa localizada em Santander, Espanha se adapta muito bem à topografia do local, se protegendo dos ventos da costa do mar e dá continuidade à vegetação existente nos arredores com uma cobertura verde que contempla toda a edificação (Figura 18).

Figura 19 – Nanyang School of Art, Singapura.



Fonte: Página do Greenroofs.com. Disponível em: <https://www.greenroofs.com/projects/nanyang-technological-university-ntu-school-of-art-design-and-media-adm/>. Acesso em 10/02/2022.

Este talvez seja o telhado verde mais famoso de Singapura devido ao seu apelo formal (Figura 19). A cobertura verde acessível aos estudantes é o elemento de maior destaque no edifício que abriga a Escola de Artes e Design da *Nanyang Technological University of Singapore*. Além da beleza, a cobertura é capaz de coletar a água da chuva para promover irrigação, ademais de diminuir os gastos com aquecimento e refrigeração do edifício.

Figura 20 – Mountain Dwellings, Big Architects.



Fonte: Página do Archdaily. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/601342/mountain-dwellings-slash-big-and-jds>. Acesso em 10/02/2022.

O edifício Mountain Dwellings, localizado em Copenhagen, abriga 80 famílias e cada unidade possui seu jardim particular (Figura 20). O escritório Big Architects criou um telhado verde em grande escala, possibilitando o uso privativo de cada jardim. A disposição escalonada dos apartamentos não permite que o usuário veja o jardim vizinho, gerando mais privacidade.

Figura 21 - Casa Paraty, Marcio Kogan Arquitetos, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.



Fonte: Página do Archdaily. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/01-28918/casa-paraty-studio-mk27-marcio-kogan>. Acesso em 10/02/2022.

O telhado verde proposto pelo escritório de Marcio Kogan para a Casa Paraty, localizada em Paraty, Rio de Janeiro, consegue integrar a vegetação nativa dos arredores com as ervas e vegetais plantados na cobertura para serem utilizados nas refeições diárias dos moradores (Figura 21). Como o edifício fica localizado em uma ilha, dependendo de barcos para acesso à cidade, a solução se tornou muito útil para a rotina de compras.

Figura 22 – Academia de Ciências da Califórnia, San Francisco, Estados Unidos (EUA).
Renzo Piano Architects.



Fonte: Página do Archdaily. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/01-50160/academia-de-ciencias-da-california-renzo-piano>. Acesso em 18/10/2022.

A Academia de Ciências da Califórnia, localizada em San Francisco, Estados Unidos, foi projetada por Renzo Piano e possui um enorme apelo visual, especialmente pelas cúpulas que compõem a cobertura, onde foram plantadas espécies nativas para atrair a fauna local, colaborando assim para a multiplicação da vida animal local (Figura 22).

Figura 23 – Mill Valley Residence by McGlashan Architecture, Califórnia, EUA.



Fonte: Página do Archdaily. Disponível em: <https://www.archdaily.com/72845/mill-valley-hillside-mcglashan-architecture>. Acesso em 18/10/2022.

O edifício residencial multifamiliar localizado em Mill Valley, Califórnia, Estados Unidos, foi projetado pelo escritório McGlashan Architecture e expressa um excelente exemplo de arquitetura que aproveita as potencialidades do terreno, situado em um vale e cria um ambiente harmônico com o meio ambiente ao redor (Figura 23). Não se trata de um telhado verde repleto de espécies diferentes, mas que valoriza e se integra com a flora e a fauna local, além de contribuir com a diminuição dos gastos com aquecimento e refrigeração das residências.

2.4 Normas e Especificações

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ainda não criou uma norma técnica que trata do planejamento, execução e manutenção de telhados verdes, fazendo com que o direcionamento das práticas profissionais e a defesa do consumidor fiquem limitados. Aspectos técnicos como segurança ao acesso à cobertura vegetada, condições mínimas da estrutura da edificação para evitar cargas excessivas advindas do telhado, correta irrigação e drenagem, entre outros, ficam a cargo dos profissionais que projetam e das empresas que executam os tetos verdes.

A realidade do país ainda conta somente com as revisões e atualizações dessas normas que incentivam tetos e fachadas verdes.

Como exposto no capítulo 2 - item 2.2, atualmente vários municípios no país e o Distrito Federal, atuam com leis de obrigatoriedade para implantação de tetos verdes e incentivos tributários aos proprietários de imóveis que possuem tetos e/ou fachadas vegetadas.

O mercado da construção civil fomentou nas últimas duas décadas as certificações ambientais que se constitui em um sistema de avaliação no qual é quantificado o grau de sustentabilidade de um projeto em função de determinados critérios de desempenho. Os telhados verdes em certificações como o LEED podem garantir entre 6 e 16 pontos conforme o *checklist* do selo. Tais certificações desempenham uma influência grande no cenário das edificações sustentáveis e dão visibilidade para envoltórias verdes mais até que os profissionais projetistas.

Nakamura (2018) aponta que, em âmbito internacional, vê-se poucos países que possuem regulamentos e diretrizes voltados especificamente para as coberturas verdes. O mais antigo é o documento da *Landscape Development and Landscaping Research Society* (FLL), instituição alemã fundada em 1975 que estuda o tema desde 1982 e que apresenta um referencial chamado Diretrizes para o Planejamento, Instalação e Manutenção de Coberturas Verdes com

valiosas informações sobre tipologias de tetos verdes, tipos de vegetação, requisitos construtivos, procedimentos de instalação, conservação e manutenção. A primeira versão em inglês foi publicada em 2004 e a mais recente é de 2018. Canadá, Austrália e China também possuem guias próprios elaborados entre 2010 e 2011.

A autora ainda desenvolveu um manual de planejamento, execução e manutenção de sistemas de coberturas verdes para o contexto da cidade de Campo Grande, no Mato Grosso do Sul, e região. Outras ações com o mesmo propósito seriam excelentes para difundir a solução construtiva pelo país. A continentalidade do Brasil gera demandas de pesquisa para a compreensão dos diferentes contextos climáticos, além dos fatores culturais, domínio das técnicas construtivas, diversidade de biomas etc., e ainda são poucos os esforços nessa direção.

2.5 Vantagens ambientais e limitações

2.5.1 Economia de Energia e coberturas verdes

O desempenho energético do ambiente construído pode ser dividido em três categorias de acordo com Gonçalves e Duarte (2006), tais como: edifícios 100% passivos; edifícios convencionais que necessitam de condicionamento; edifícios que apresentam estratégias passivas para redução da demanda por condicionamento artificial, usando de maneira complementar.

Na primeira categoria, o edifício não necessita de energia para climatização, dado que o projeto arquitetônico e o padrão de ocupação em interação com as condições ambientais externas não geram essa demanda, criando um ambiente interno dentro dos padrões de conforto. Na segunda categoria, a edificação depende de sistemas artificiais para o controle das condições ambientais internas na maior parte do tempo de funcionamento, seja para aquecer ou resfriar os espaços, isso devido à característica climática local ou pela tipologia arquitetônica. Na terceira categoria, a demanda por condicionamento artificial só ocorre em alguns períodos do ano, cuja condição climática influencia no conforto ambiental dos espaços.

Os fenômenos que compõem o balanço energético de uma cobertura verde são as trocas térmicas por radiação e convecção, evapotranspiração do solo e das plantas e a evaporação/condensação do vapor de água, bem como a condução térmica e armazenamento de calor na camada de solo” (GAGLIANO et al., 2015). A radiação que a envoltória recebe em um dia de sol pleno no alto da abóboda celeste, considerando as superfícies horizontais é em torno de 1000 W/m² (BONAN, 2002). Desse modo, o ideal é que essa energia não cause um aumento extremo na temperatura interna da edificação. Assim sendo, o bloqueio da radiação luminosa,

evita que a energia absorvida se transforme em aumento de temperatura e contém a energia para que ela não ultrapasse a laje do ambiente. Essas são estratégias relevantes quando se trata de radiação solar.

Uma das vantagens do teto verde é a economia de energia que poderia ser gasta em condicionamento artificial se comparado às coberturas convencionais. Para Moody e Sailor (2013), os efeitos energéticos de tetos verdes vão além do isolamento adicional gerado pela camada vegetada e propõe o critério *Dynamic Benefit of Green Roof* (DBGR), que considera a razão entre o consumo de um edifício tradicional e outro com teto verde, sendo 1 o valor referência para casos em que há economia de energia.

O quadro 4 relaciona os estudos mais recentes publicados sobre coberturas verdes e economia de energia.

Quadro 4 - Coberturas verdes e economia de energia.

Coberturas verdes e economia de energia	
Resultados positivos	Até 15,2% de economia anual (YANG et al., 2015); 15,1% de economia anual (FOUSTALIERAKI et al., 2017); 24% a 35% de economia anual (MAHMOUD et al., 2017). Coberturas verdes e <i>cool roofs</i> promovem maior economia de energia e benefícios ambientais que coberturas com grande isolamento térmico (GAGLIANO et al., 2015).
Resultados negativos	O balanço energético das coberturas verdes é complexo e nem sempre resulta em economia de energia (MOODY; SAYLOR, 2013).
Fonte: MONTANARI, 2018, p.187.	

Os estudos apresentados no quadro 4 não podem ser utilizados como parâmetros para grande parte das construções brasileiras, visto que deveria ser objeto de investigação as telhas cerâmicas (e seus diferentes formatos e cores) e as telhas de fibrocimento sobre lajes comparando com as coberturas verdes (MONTANARI, 2018).

2.5.2 Clima Urbano e coberturas verdes

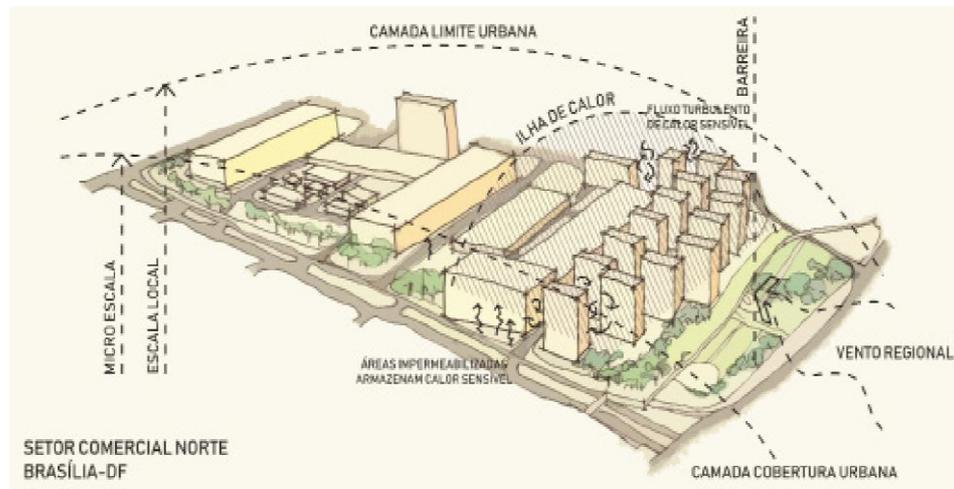
O estudo do clima trata genuinamente do estudo das temperaturas, umidade, pressão atmosférica, bioma local, entre outros fatores ambientais (ROMERO, 2015). As ilhas de calor urbana são um dos principais fenômenos associados ao clima urbano, significando que determinada área urbana apresenta condições microclimáticas diferentes em relação às áreas rurais ou que conservam sua paisagem natural (Oke, 1987).

As primeiras pesquisas realizadas sobre clima urbano iniciaram no século XIX, “onde o cientista Luke Howard registrou um excesso de calor na cidade de Londres em comparação com o campo, atribuindo essa condição à maior absorção de radiação solar pelas superfícies” (ROMERO et al., 2019, p.13). Estudos posteriores aos de Howard também tiveram importância: Landsberg, em 1956, com o livro *The Climate of Towns* e Chandler, em 1965, com *The Climate of London*. No Brasil, Lombardo, em 1985, apresentou estudos pioneiros da cidade de São Paulo indicando a dinâmica espacial e temporal das ICU.

Romero (2015) pontua que o clima urbano agrega as atividades humanas, tais como a impermeabilização do solo, a retirada de cobertura vegetal, os adensamentos das áreas centrais de forma indevida e outras ações as quais influenciam o campo térmico urbano. Estudar as ICU é muito importante para o entendimento dos efeitos decorrentes desse fenômeno, sobretudo, com o intuito de mitigá-los. Ademais de tornar as cidades espaços insalubres do ponto de vista do conforto ambiental, pelo aumento das temperaturas e baixa qualidade do ar, “o meio urbano mais quente eleva o consumo de energia das edificações seja devido a um maior número de aparelhos de ar-condicionado ou pelo aumento da potência dos equipamentos” (ROMERO et al., 2019, p.14).

Voogt e Oke (2003) classificam as ilhas de calor urbanas em dois tipos em função da forma, intensidade e localização: ilha de calor de superfície e ilha de calor atmosférica. Considerando o aquecimento relativo das superfícies urbanas, têm-se as ilhas de calor de superfície. Já as ilhas de calor atmosférica se formam em duas camadas distintas: Camada de cobertura urbana (CCU) e camada limite urbana (CLU). As CCUs se formam próximo às superfícies da cidade e se estendem do solo até os edifícios mais altos, sempre em sentido vertical. As CLUs localizam-se acima do dossel (abaixo do nível das coberturas) e formam um domo de ar quente sobre a cidade e seu formato pode ser modificado pela ação dos ventos.

Figura 24 - Ilha de calor urbana atmosférica



Fonte: ROMERO, et al, 2019, p.15.

Sobre as diferenças entre ilhas de calor de superfície e atmosférica, Romero et al. (2019, p.16) esclarecem que “são baseadas no desenvolvimento temporal, intensidade, método de identificação e representação” (Quadro 5):

Quadro 5 - Ilha de Calor Urbana de Superfície e Atmosférica.

Características	ICU Superfície	ICU Atmosférica
Desenvolvimento temporal.	Presente em todas as horas do dia e da noite; Mas intensa durante o dia e no verão.	Pode ser pequena ou inexistente; Mais intensa durante a noite e no inverno.
Intensidade (condição mais intensa).	Maior variação espacial e temporal: Dia: 10 a 15 °C Noite: 5 a 10°C	Menor variação: Dia: -1 a 3 °C Noite: 7 a 12 °C
Método de identificação.	Medição indireta: Sensoriamento remoto.	Medição direta; Estação meteorológica fixa; Transectos em rede de estações móveis.
Representação típica.	Imagem termal.	Mapa isotérmico Gráfico de temperatura.

Fonte: ROMERO et al., 2019, p.16.

As políticas urbanas podem promover alterações na morfologia urbana e consequente alteração nas temperaturas. Quanto mais uma cidade cresce reduzindo suas áreas vegetadas se intensifica o processo de aumento de temperatura, da mesma forma com que superfícies de baixa refletividade absorvem mais a radiação recebida. Nesse sentido, “o aumento das áreas verdes no nível das coberturas pode ser positivo para reduzir as temperaturas através da evapotranspiração do conjunto solo-planta e da umidificação do ar” (IGRA, 2014, p. 88).

A evapotranspiração é a forma pela qual a água da superfície terrestre passa para a atmosfera no estado de vapor. Tal processo envolve a evaporação da água de superfícies de água livre (rios, lagos, oceano, etc.), dos solos e da vegetação úmida (que foi interceptada durante a chuva) e a transpiração dos vegetais. Como é complexo distinguir o vapor d'água proveniente da evaporação no solo e da transpiração das plantas, os autores definem a evapotranspiração como sendo o processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera por evaporação da água do solo e da vegetação úmida e por transpiração das plantas.

Para Shinzato e Duarte (2017), o processo de evapotranspiração se relaciona diretamente à resistência estomática, que é a quantidade de estômatos presentes nas folhas com uma condição no solo adequada (disponibilidade de água) e na atmosfera (disponibilidade de luz).

Rivero (1986) aponta que a absorção das folhas é alta, com uma pequena quantidade de radiação sendo transmitida por transparência através da folha e o restante, entre 15 % e 30 % sendo refletida. Da energia absorvida, parte é transformada em energia química potencial para fotossíntese e outra em calor latente. Com a evaporação a água é eliminada pela folha através da transpiração. Mascaró (2010), orienta que a absorção depende principalmente da pigmentação das folhas, que absorvem em média 50% de radiação de onda curta e 95 % da radiação de onda longa.

No Brasil, Romero (2015) analisou a relação entre radiação solar e geometria urbana na temperatura do ar. Para a autora, os elementos climáticos que sofrem influência direta da urbanização são: vento, áreas verdes, som, água, pavimentos nos espaços públicos e mobiliário urbano. Ainda reforçou que as edificações constituem as principais rugosidades da cidade e que todos os elementos climáticos, os ventos e sua condição no espaço construído são os mais modificados pela urbanização.

Romero define que “os elementos climáticos dizem respeito aos valores relativos a cada clima e os fatores climáticos são divididos de acordo com a sua atuação na escala do clima: os fatores climáticos dão origem ao macroclima e os locais ao microclima e ambos interagem conjuntamente” (ROMERO, 2013, p.40).

Os elementos climáticos são temperatura, umidade do ar, precipitações e movimentos do ar. Os fatores climáticos globais são: radiação solar, latitude, altitude, ventos, massas de água e terra. Os fatores climáticos locais são: topografia, vegetação e superfície do solo (natural ou construído).

Werneck afirma que:

A partir do conhecimento das interações desses diversos fatores para a formação de microclimas, pode-se compreender melhor a alteração do balanço energético no meio urbano, influenciando também o conforto térmico dos habitantes e o consumo de energia das edificações (WERNECK, 2018, p.16).

Para Romero (2013), o conceito de microclima diz respeito ao clima de um recorte urbano que apresenta variações dos padrões de vento, umidade, radiação solar e temperatura, causada por elementos naturais como topografia e vegetação ou elementos construídos. Os aspectos que influenciam criticamente o microclima são as formas e a densidade urbana, a geometria das ruas tipo “cânions”, o albedo das superfícies e as propriedades térmicas dos materiais, a presença de água e sua disposição e as massas de vegetação (CORBELLA; YANNAS, 2009, p. 32).

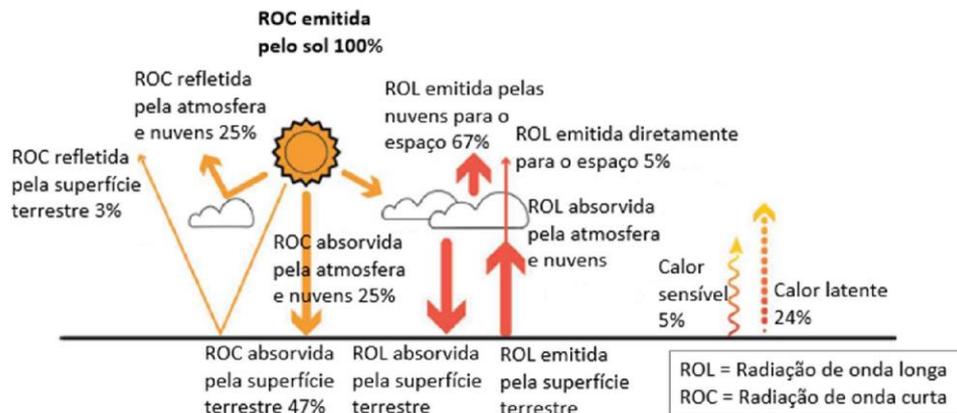
Werneck enfatiza que:

Mesmo que os efeitos do microclima fossem conhecidos e explorados na arquitetura vernacular (OLGYAY, 1998), foi no século XX que se ampliou a investigação sobre o assunto a partir dos estudos de clima urbano nas áreas da climatologia com os pesquisadores Helmut Landsberg, Thimoty Oke, entre outros. Na área da arquitetura e urbanismo destacam-se as pesquisas pioneiras de Baruch Givoni (GIVONI, 1976) e Victor Olgyay (OLGYAY, 1998). As ilhas de calor urbanas (ICU), caracterizadas pela elevação de temperatura resultante do processo de urbanização em relação ao entorno é um exemplo de condição microclimática que pode ser encontrada nas cidades. (WERNECK, 2018, p.17).

O microclima pode ser concebido e alterado pelos arquitetos e urbanistas e segundo Lamberts et al. (2016), o estudo das variáveis dessa escala é fundamental para o lançamento do projeto, pois uma série de particularidades climáticas do local podem induzir a soluções arquitetônicas mais adequadas ao bem-estar das pessoas e à eficiência energética.

A radiação solar é a principal fonte de energia na Terra. Sua propagação se dá como radiação eletromagnética em forma de ondas e a emissão direta do sol se caracteriza como onda curta. Ao atravessar a atmosfera, partículas e nuvens absorvem parte dessa radiação e o restante é absorvido pela infinidade de superfícies terrestres. Nesse nível, a superfície reflete parte da radiação direta (3%) e absorve o restante. Essa absorção se transforma em emissão de radiação de onda longa. A radiação de onda curta absorvida pelas nuvens e atmosfera também gera emissão de radiação de onda longa, para a terra e para o espaço (Figura 25).

Figura 25 - Radiação solar e suas interações com a atmosfera e as superfícies.



Fonte: ESCH, 2015, p. 12.

Na escala microclimática, a vegetação e a topografia contribuem para a absorção da radiação seja ela direta ou difusa. As árvores podem reduzir a radiação solar direta entre 60% e 90%, diminuindo assim, a temperatura da superfície do solo.

A radiação de onda curta refletida pelo solo e pelo entorno varia em função do albedo das superfícies refletoras. Quanto maior o albedo, maior a capacidade da superfície em refletir a radiação.¹

O albedo urbano não é necessariamente mais baixo que o florestal. A vegetação tem albedo global que varia de médio (campos, plantações) a baixo (floresta, pinheiros). “Já as superfícies urbanas variam de muito claras (tinta branca) a muito escuras (asfalto)” (MENDES, 2014, p.171). As superfícies cinzas e impermeáveis, típicas das grandes cidades, refletem muito pouco a radiação solar e absorvem mais energia (FENG; HEWAGE, 2018) e apresentam albedo entre 0,1 e 0,2, muito inferior ao de uma cobertura verde que pode variar entre 0,7 e 0,85 (BERARDI; GHAFARIANHOSEINI; GHAFARIANHOSEINI, 2014).

Chen et al. (2016) mediram a temperatura radiante média (TRM) em Xangai, e os resultados mostram diferenças expressivas sob influência da densidade e a altura das edificações, além da orientação das vias e a presença de vegetação. Observou-se que as áreas abertas e pavimentadas e áreas próximas às paredes apresentaram maior TRM.

A capacidade das superfícies das coberturas de dissipar calor através de radiação infravermelha longa é definida pela sua emissividade; valores mais altos correspondem a

¹ De acordo com Lamberts et al. (2016), na escala do edifício, a transferência de calor por radiação pode ser dividida em cinco partes principais: radiação solar direta (onda curta) (1); radiação solar difusa (onda curta) (2); radiação solar refletida pelo solo e pelo entorno (onda curta) (3); radiação térmica emitida pelo solo aquecido e pelo céu (onda longa) (4); e radiação térmica emitida pelo edifício (onda longa) (5). As duas primeiras são variáveis macroclimáticas

temperaturas de superfícies mais baixas e maior potencial de redução das ilhas de calor urbanas (SANTAMOURIS, 2014).

2.5.3 Poluição Atmosférica e coberturas verdes

Para mitigar a poluição do ar há três estratégias possíveis: redução da emissão, deposição/ eliminação e a dispersão, sendo esta última sem validade se o poluente for dióxido de carbono. O melhor método em termos de custo-benefício é a redução das emissões.

Nos casos de deposição e eliminação de poluentes, a vegetação contribui para a melhoria na qualidade do ar e as coberturas verdes colaboram para a redução de partículas poluentes, não somente pelas plantas, mas também pelo substrato, desde que as áreas vegetadas sejam grandes² (LIVING ROOFS, 2021).

Como a tipologia da cobertura em estudo é própria para espécies rasteiras, ela não contribui para mitigar a poluição do ar.

Os poluentes da atmosfera podem ser encontrados nas formas gasosas ou sólidas/líquidas, sendo estas últimas chamadas de material particulado (MP)³.

Os poluentes gasosos não se depositam e devem ser quebrados ou dispersados se for uma fonte pontual local. Os compostos orgânicos voláteis são os poluentes gasosos mais populares e normalmente são de origem vegetal.

Os padrões nacionais de qualidade do ar foram estabelecidos pelo IBAMA, Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e aprovados pelo CONAMA, Conselho Nacional de Meio Ambiente, por meio da Resolução CONAMA nº 03/90. Os seis principais poluentes atmosféricos considerados pelo documento são:

Quadro 6 - Poluentes críticos da atmosfera.

Poluente	Principais fontes do poluente
Ozônio Troposférico (O3)	Reações químicas entre óxidos de nitrogênio (NOx) e compostos orgânicos voláteis (COVs).
Material Particulado (PM10 e PM 2,5)	Reações químicas entre elementos como SO2 e NOx.
Monóxido de carbono (CO)	Queima de combustíveis fósseis por veículos e demais maquinários).

² Pelo processo de fotossíntese as plantas reduzem o dióxido de carbono da atmosfera e produzem oxigênio, desde que haja um número expressivo de coberturas vegetadas.

³ O MP são partículas suspensas no ar e podem ter origem natural ou antropogênica. O tamanho varia desde partículas a sedimentos a partículas ultrafinas e, no caso de a origem ser antropogênica, os danos à saúde humana são bem graves, compatíveis com o tabagismo. Quanto menor uma partícula, mais danosa ela se torna devido à capacidade de penetração no corpo humano.

Chumbo (Pb)	Queima de combustíveis de aeronaves e usinas de energia.
Dióxido de enxofre (SO ₂)	Queima de combustíveis fósseis por usinas de energia e outras instalações industriais.
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	Queima de combustíveis fósseis por usinas de energia.
Fonte: Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA nº 03/90	

A lista é composta por poluentes danosos à saúde humana e ao meio ambiente por provocar impactos como a chuva ácida (NO₂ e NO_x), neblina formada por poluentes (PM, NO₂ e NO_x) e redução do crescimento de plantas (SO₂ e chumbo) (CETESB, Companhia Estadual de Saneamento de São Paulo, 2022)

Além dos poluentes relacionados no quadro 6, há os gases de efeito estufa que impactam o clima como o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e gases fluorados. A origem deles se dá principalmente pela queima de combustíveis fósseis (CO₂, N₂O), apodrecimento de resíduos e produção ou transporte de gás, carvão ou óleo (CH₄) e de diversos processos industriais (gases fluorados).

Mendes (2014) condensa as informações sobre sequestro de carbono por coberturas verdes e expõe as seguintes informações: uma cobertura verde somente sequestra carbono se a biomassa for grande o suficiente para compensar a pegada de sua instalação e se a economia de energia fóssil compensar a manutenção.

Para Mendes (2014, p. 187), “como a matriz energética do Brasil é relativamente limpa devido ao amplo sistema hidrelétrico, as coberturas verdes dificilmente trarão benefícios em se tratando de sequestro de carbono, já que seu mérito maior é deixar de emitir e não remover”.

A EPA (Environmental Protection Agency) (2008) também apresenta dados similares sobre coberturas verdes e sequestro de carbono afirmando que devido ao pequeno tamanho das plantas e a camada do substrato ser relativamente fina, os tetos verdes tendem a não possuir uma capacidade de armazenamento de carbono tão grande como árvores ou florestas urbanas.

Jayasooriya et al. (2017) demonstraram que árvores são mais eficientes na remoção dos seis poluentes críticos, enquanto tetos e paredes verdes proporcionam economia de energia, o que se torna interessante nos locais onde a energia é gerada por usinas de carvão e nucleares, devido às altas emissões dessas fontes.

Como a tipologia da cobertura em estudo não suporta espécies de médio ou grande porte ela não contribui para a remoção de poluentes.

2.5.4 Manejo de Águas Pluviais e coberturas verdes

As coberturas verdes têm sido amplamente utilizadas como meio de mitigar os problemas hidrológicos urbanos. O LID (*low impact development*) compreende tecnologias de infraestrutura verde com o intuito de gerenciar as águas pluviais no contexto urbano, melhorando os processos hidrológicos. Schmitter et al. (2018) destaca que as técnicas LID aplicadas em áreas adensadas e com baixa permeabilidade do solo são excelentes para aumentar a resiliência dessas áreas em casos de chuvas vigorosas que geram pontos de inundação. As SUDS (*sustainable urban drainage systems*) também fazem parte das técnicas de infraestrutura verde e correspondem a processos naturais para aumento da retenção e infiltração da água.

Em conformidade com Speak et al. (2014), as coberturas verdes são estratégias que englobam as LID e SUDS, pois contribuem tanto na retenção de água, quanto na retenção de poluição urbana difusa que provém de veículos e atividades industriais.

A retenção de água pela cobertura verde depende de vários fatores, tais como: climáticos - como precipitação pluviométrica do local (volume e frequência), umidade e capacidade de retenção de água pelo substrato (HAKIMDAVAR, 2016). Cada um desses aspectos se relaciona com o tipo de vegetação implantada, além do potencial de transpiração, evapotranspiração, espessura e composição do substrato.

Montanari (2018) afirma que a espessura do substrato é uma variável de impacto questionável. Há estudos que demonstram que a espessura do substrato é proporcional à sua maior capacidade de retenção de água (LEE et al., 2015), outros que apontam uma maior rentabilidade financeira de ampliar a espessura do substrato do que ampliar a área da cobertura verde (CHUI, et al., 2016). Versini et al. (2015) apresenta desempenho idêntico para substratos de 3 e 15 cm de espessura em cenários de elevada precipitação, com o mesmo volume de escoamento e pico de descarga. Nesse estudo, quando a precipitação foi menor o substrato mais espesso produziu menor escoamento.

A irrigação da cobertura verde não é positiva para a retenção de água pluvial por aumentar a umidade do substrato (LEE et al., 2015). Esses autores destacam que quanto menor a umidade do substrato antes da precipitação, maior a capacidade de retenção de água e, por consequência, atraso no escoamento. Para tanto, o aumento da densidade vegetal é o mais indicado, posto que diminui a radiação solar direta sobre o solo, evitando o aquecimento e criando uma camada de ar acima do solo, reduzindo a evaporação (VOLDER; DVORAK, 2014).

A capacidade de drenagem da cobertura verde afeta a evapotranspiração das plantas e do solo, porque reduz a umidade do substrato. Segundo Poe et al. (2015) a evapotranspiração é maior quando a umidade do substrato é alta e se relaciona diretamente com a composição do substrato e o tratamento da vegetação. As pesquisas de Zaremba et al. (2016) também apontam que a evapotranspiração é significativamente maior sem drenagem em análises feitas na Pensilvânia, EUA.

Sobre a inclinação da cobertura, inclinações pequenas ajudam o telhado a reter mais água, influenciando diretamente na evapotranspiração (MORUZZI, et al., 2014). Beecham e Razzaghmanesh (2015) compararam duas coberturas verdes extensivas sendo uma com vegetação e outra somente com o substrato e a retenção de água na cobertura vegetada foi bem maior, com uma média de 73%.

Numa comparação entre cobertura verde extensiva e telha de fibrocimento, o volume escoado no telhado vegetado conseguiu reduzir em 62%. Nesse experimento realizado por Tassi (2014) ao longo de 17 meses, as variáveis que influenciaram o resultado foram as condições climáticas da cidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul, e a umidade do substrato que antecedeu as precipitações. No semiárido brasileiro, na cidade de Caruaru, em Pernambuco, Silva (2017) comparou a capacidade de retenção da vazão de água pluvial de uma cobertura cerâmica e dois telhados verdes extensivos com vegetação típica do local: babosa e coroa-de-frade (*aloe vera e melocactus zehntneri*) onde as coberturas verdes chegaram em valores entre 75% e 86%, respectivamente.

Schmitter et al., 2016, Versini et al., 2016 dentre outros autores recomendam a combinação de diferentes estratégias de infraestrutura verde tanto LID como SUDS para obter melhores desempenho na quantidade e qualidade do escoamento.

2.5.5 Biodiversidade nas coberturas verdes

Outro benefício relacionado às coberturas verdes é a promoção da biodiversidade urbana. De acordo com GGG, *Growing Green Guide* (2014), essas estruturas são como oportunidades dentro das cidades para que plantas e animais se desenvolvam, promovendo migrações de invertebrados e pássaros, ademais de poder funcionar como um corredor ao longo do ambiente urbano. O mesmo documento destaca que se a intenção do projeto é transformar a cobertura verde em um ambiente de promoção da biodiversidade algumas demandas precisam ser ponderadas desde os estudos preliminares como o tipo de vegetação a ser inserida

respeitando o clima local, plantas que sejam fonte de alimento para a fauna local, possibilidade de acesso à cobertura, altura da edificação etc.

Apesar das coberturas serem um meio hostil devido à exposição à radiação solar direta nas superfícies vegetadas e a heterogeneidade dos substratos, é inegável que tais estruturas podem promover a vida de espécies vegetais e animais no âmbito das cidades se comparadas às coberturas convencionais.

Os telhados verdes podem ser projetados para aumentar a biodiversidade local, porém, as espécies vegetais nativas devem ter preferência. O GGG (2014) salienta que também deve-se incorporar diferentes camadas de vegetação e características paisagísticas, como galhos, rochas e diferentes tipos de substratos, com a finalidade de aumentar as oportunidades para o abrigo e estabelecimento da vida selvagem.

Montanari (2018, p.86) aponta que para a sobrevivência das espécies vegetais a temperatura do solo, a disponibilidade de água, a espessura do substrato e a capacidade que ele tem em reter umidade por mais ou menos tempo pode influenciar no crescimento e desenvolvimento das plantas.

Sobre a utilização de plantas nativas, Catalano et al. (2018) recomenda que as coberturas verdes se utilizem dessas espécies, já que além da resiliência climática há também as funções da vegetação no ecossistema local. Para Mandel et al. (2017) o uso de plantas nativas influencia nos resultados que avaliam a interferência das envoltórias verdes na biodiversidade. A colonização de espécies não previstas no projeto também é um estímulo à biodiversidade e deveria ser levada em consideração na concepção projetual dos tetos verdes (CATALANO et al., 2018).

Acerca da tipologia em estudo, ou seja, os telhados verdes extensivos, Chong et al. (2014) afirmam que eles também são locais propícios para a biodiversidade, no entanto, com menos possibilidades que os telhados verdes intensivos, já que nestas espécies vegetais de maior porte são permitidas, atraindo assim uma fauna de porte maior.

Sobre a biodiversidade de invertebrados Nagase e Nomura (2014) demonstram que essas espécies sobrevivem melhor com sombra e umidade. No caso de abelhas e vespas, a colonização dessas espécies se torna mais favorável quando as coberturas verdes são mais baixas e próximas às áreas verdes do entorno imediato (MACIVOR, 2016). O autor concluiu por meio de seus estudos que se o intuito da cobertura verde for contribuir com a biodiversidade dessas espécies, a edificação não pode ter mais que cinco pavimentos, visto que o vento se torna um aspecto limitador da locomoção de abelhas e vespas.

Wong e Jim (2016) pesquisaram sobre a possibilidade de coberturas verdes se tornarem foco de proliferação de mosquitos, com atenção especial aos transmissores de doenças, e concluíram que as lajes impermeabilizadas apresentam um potencial maior para esse problema que as coberturas verdes, pois essas não acumulam água em sua superfície.

2.5.6 Funções adicionais das coberturas verdes

Telhados verdes e sistemas fotovoltaicos podem ser utilizados juntos na mesma cobertura (KÖHLER; WIARTALLA; FEIGE, 2007). O chamado “telhado verde integrado “PV” (WITMER; BROWNSON, 2010) pode trazer efeitos positivos para a conservação de energia nas construções e melhoria do ambiente urbano circundante.

As duas tecnologias que podem contribuir para a sustentabilidade do edifício e diminuição das emissões de gases do efeito estufa. (HUI; CHAN, 2011). Os autores simularam o retrofit de um edifício comercial em Hong Kong utilizando o *Energy Plus* (versão 6.0) com o modelo de telhado verde desenvolvido por Sailor (2008) com a instalação de cobertura verde e painéis fotovoltaicos como substitutos da cobertura original, sendo considerado os doze meses no ano. Os resultados apontaram uma melhor performance dos painéis, dado que a temperatura da superfície verde e do solo foram reduzidas a partir do sombreamento promovido pelas placas, gerando um fator de resfriamento benéfico para as células geradoras de energia. A simulação apontou um consumo de eletricidade para resfriamento 8,3% menor para o sistema combinado de telhado verde e placas fotovoltaicas. Lui e Chan (2011) ponderam que os benefícios podem ser ainda maiores a depender da volumetria da edificação, a orientação solar, entre outros fatores.

2.5.7 Desvantagens e limitações das coberturas verdes

Dentre as limitações e desvantagens da implantação de coberturas verdes em projetos são citados nas pesquisas referente ao tema: o alto custo inicial; o aumento das cargas sobre a cobertura da edificação; o pouco conhecimento das técnicas somada à ausência de guias e normativas que norteiem o mercado da construção civil para a elaboração de projeto, execução e manutenção de tetos verdes. E, por fim, a demanda maior por manutenção e reparos que um telhado convencional.

Sobre o alto custo inicial, o valor total de uma cobertura verde é obviamente maior se comparado a um telhado comum do tipo fibrocimento ou laje impermeabilizada. Segundo

Munby (2005), um teto verde extensivo custa o dobro de uma cobertura convencional devido à impermeabilização, drenagem e outros custos técnicos associados à tecnologia.

O custo total de um sistema vegetado para a cobertura pode ser dividido em projeto, construção e manutenção. O projeto é normalmente realizado por empresas especializadas que contam com arquitetos, paisagistas, engenheiros ou agrônomos. A construção implica na impermeabilização da área a receber o teto verde, além dos investimentos em mão de obra especializada e os materiais especificados (plantas, meios de cultura etc.). A manutenção implica na limpeza de calhas, poda, replantio e avaliação periódica da impermeabilização.

O valor aproximado da instalação de uma cobertura verde varia de acordo com sua tipologia e equipamentos destinados à sua sobrevivência e manutenção. Um telhado verde extensivo na Europa pode custar entre £50 e £100, em torno de R\$750,00 (câmbio em 2021) por metro quadrado, já que o substrato necessário para o plantio da vegetação e os componentes de manutenção são mais baratos. Já uma cobertura intensiva pode custar entre £60 e £150, por volta de R\$1.125,00 (câmbio em 2021) (SEDUM SUPPLY, 2021). Geralmente, os preços são mais elevados quando há sistema de rega, espécies vegetais menos populares ou algum tipo de mobiliário incorporado ao telhado verde.

Nos Estados Unidos, o mercado estima um custo que varia entre US\$ 10 por metro quadrado para tipologias simples de telhados extensivos e US\$ 25 para tipologia intensiva, somando as despesas anuais com manutenção que podem variar entre US\$ 0,75 e US\$ 1,50 para as tipologias citadas, respectivamente (ECOGARDENS, 2021), com o dólar a R\$ 5,30.

Nos casos de retrofits, os custos variam entre US\$ 15 e US\$ 35 por metro quadrado para coberturas extensivas e de US\$ 20 e US\$ 35 para coberturas intensivas a depender do tamanho da edificação, e ainda as despesas adicionais com a avaliação estrutural que podem custar de US\$ 1000 a US\$ 1500 para pequenas coberturas e mais de US\$ 5000 para grandes coberturas, o equivalente à R\$ 5.000, R\$ 6.000 e 25.000, respectivamente (câmbio 2021) (GREEN ROOFS NEW YORK CITY, 2021).

No Brasil, Dutra e Silva (2019) realizaram uma pesquisa de mercado que aponta preços entre R\$ 181,67 e R\$ 212,5 o metro quadrado para telhado verde extensivo e intensivo, respectivamente.

Silva (2013) pondera que para se ter uma percepção do custo adicional real de uma cobertura verde deve ser feito um estudo econômico que leve em conta a economia de energia, a vida útil da cobertura e de todos os sistemas adicionais de uma cobertura convencional. Mendes (2014) também destaca que a durabilidade e custos adicionais da cobertura devem ser

considerados. Tetos verdes duram de 2 a 3 vezes mais que uma laje convencional, ademais de reduzirem a demanda por ar-condicionado e, conseqüentemente, diminuir o consumo energético da edificação. O mesmo autor afirma que o custo de instalação e manutenção de uma cobertura verde deve ser comparado ao seu benefício financeiro privado, em curto ou longo prazo, e deve ser julgado relativo ao de outras coberturas.

O aumento das cargas sobre a cobertura é outra limitação para seu uso em projetos, especialmente em edifícios já existentes que se interessam por retrofits do telhado. Se a edificação está em fase de projeto, prever uma cobertura própria para suportar uma cobertura verde seja ela extensiva, semi-intensiva ou intensiva é algo simples e economicamente acessível.

Para edifícios existentes, Munby (2005) indica a análise do sistema de lajes, vigas e pilares para verificar a capacidade de suporte de carga extra e avaliação dos pontos onde há maior capacidade de carga extra como vigas, pilares e caixas de elevador. O mesmo autor afirma que um telhado verde extensivo é relativamente leve e facilmente adaptável em muitas edificações, inclusive em estruturas suspensas. As coberturas intensivas são mais restritas aos projetos de retrofit, pois sua tipologia demanda muito do sistema estrutural existente devido à espessura do substrato necessário à sobrevivência de espécies de grande porte.

Mendes (2014, p. 74) afirma que se for possível trabalhar com a substituição de coberturas é viável pensar numa cobertura verde com o peso equivalente ao da estrutura removida. Isso também é válido para transformar uma cobertura verde acessível em uma inacessível.

O pouco conhecimento das técnicas, a ausência de embasamento técnico e científico é ainda uma grande barreira para a implementação de coberturas verdes no Brasil. Há uma carência por materiais que compilem informações de referência para o planejamento, execução e manutenção de sistemas de coberturas verdes para as cidades brasileiras (NAKAMURA, 2018). A falta de informação para projetistas, fabricantes e usuários diminui a abrangência da técnica construtiva no mercado da construção civil. Países como Alemanha, Suíça, Japão e Canadá possuem seus guias com orientações técnicas, políticas e estratégias de incentivo que acabam por motivar o uso da solução construtiva, principalmente, como medida mitigadora dos diferentes danos ambientais existentes nos grandes centros urbanos. De acordo com Mendes (2014), a adoção plena dos tetos verdes exige um corpo de pesquisa técnico, ambiental, social e econômico que explore potencialidades em nosso clima. Segundo o autor, o Brasil possui um corpo legal ambiental em fase de desenvolvimento, sendo que os tetos verdes poderiam se

encaixar em diversas legislações, em especial da compensação ambiental e das normas de desempenho térmico.

Sobre a maior demanda por manutenção, comparando telhados verdes com os convencionais, esse também é um fator limitante para a adoção da solução construtiva em projetos novos ou reformas. Os guias acima citados apresentam as principais ações relacionadas à manutenção de tetos verdes e essa dissertação dá destaque para o guia alemão, o FLL na versão de 2018.

Para coberturas extensivas ou intensiva simples, a manutenção se assemelha às técnicas de jardinagem tradicional e será mais ou menos trabalhosa conforme as espécies plantadas e se o jardim tem um apelo mais estético, ecológico ou utilitário, no caso de hortas (FLL, 2018). De acordo com o guia, o ideal é que seja estabelecido um contrato de manutenção com tarefas e responsabilidades bem definidas, de preferência por um profissional habilitado para coordenar o trabalho.

Considerando as coberturas extensivas a necessidade de manutenção costuma surgir com o jardim 90% consolidado, em torno de dois anos após o plantio, e assim, entre duas e quatro visitas deverão ser realizadas ao ano (FLL, 2018). O guia aponta os seguintes serviços como os mais comuns para esta tipologia: adubação, irrigação, remoção de espécies daninhas, podas, replantios, reposição de substrato em caso de erosões, aplicação de pesticidas, podas ao redor dos equipamentos técnicos e faixas de circulação.

As coberturas intensivas demandam os mesmos cuidados, acrescidas as seguintes ações: remoção de folhas caídas e cobertura vegetal morta, revisão dos sistemas de ancoragem e suporte das grandes espécies, medidas de proteção contra a neve em climas onde há um inverno rigoroso, inspeção e testes no sistema de irrigação, inspeção no sistema de drenagem incluindo calhas e saídas de água e por fim, inspeção preventiva da impermeabilização. De quatro a oito visitas deverão ser realizadas ao ano (FLL, 2018).

2.6 Desempenho e balanço térmico das coberturas verdes

Os fenômenos que compõem o balanço energético de uma cobertura verde são as trocas térmicas por radiação e convecção, evapotranspiração do solo e das plantas e a evaporação/condensação do vapor de água, bem como a condução térmica e armazenamento de calor na camada de solo (GAGLIANO et al., 2015).

Em conformidade com Parizzoto e Lamberts (2011), as coberturas verdes não possuem alta refletância em suas superfícies e, portanto, não reduzem o fluxo térmico através da reflexão

da radiação, mas sim, tem no balanço térmico a adição de uma parcela referente aos processos físicos de evapotranspiração, em decorrência do transporte de umidade que ocorre no substrato e vegetação utilizados.

A equação 1 representa de forma geral o balanço térmico de uma cobertura verde:

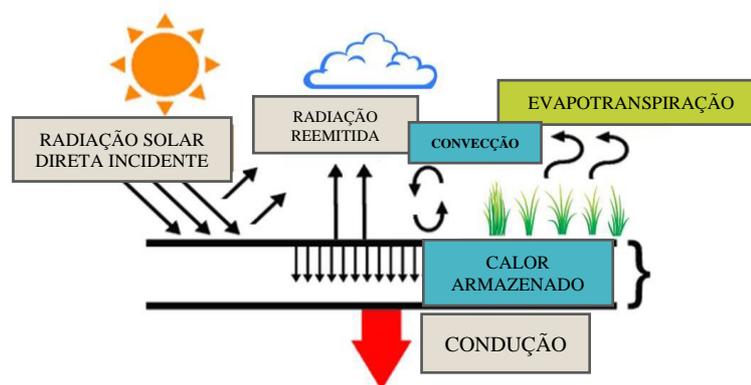
$$Q_{rad} = Q_{cv} + Q_{cd} + Q_{ar} + Q_{et}$$

São quatro fluxos principais mais o calor armazenado na estrutura (Figura 26):

- Q_{rad} é a resultante das trocas sensíveis por radiação;
- Q_{cv} é a resultante das trocas sensíveis por convecção;
- Q_{et} é a resultante das trocas sensíveis por evapotranspiração
- Q_{cd} é a resultante do calor transportado através das camadas da cobertura por condução.

Fonte: NIACHOU, et al, 200, p.722.

Figura 26 - Esquema simplificado do balanço térmico de uma cobertura verde



Fonte: Ethur (2016, p. 42).

De modo geral, é na evapotranspiração que está o diferencial de comportamento térmico de uma cobertura verde. A evapotranspiração exerce o papel de controle da intensidade dos demais fluxos, através da modulação dos fluxos de entrada e saída do sistema a depender do metabolismo das plantas e as condições externas do meio (TABARES-VELASCO; SREBIC,

2011). Andrade (2022, p. 13) enfatiza que a evapotranspiração, representa as perdas associadas de água, que ocorrem pela evaporação da superfície do solo e pela transpiração dos estômatos e cuticular da planta. Sendo assim, a transpiração das plantas também ajuda no controle da temperatura e umidade do ar.

Peng e Jim (2015) afirmam que os parâmetros do clima são a principal causa de variações sazonais e diurnas no desempenho térmico das coberturas verdes. Os referidos autores apontam que 83.6% a 86% das variações de efeito térmico das coberturas verdes estão relacionadas com a temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar e umidade do solo, ou seja, quatro características climáticas.

Montanari e Labaki (2017) apontam em revisão sistemática da literatura recente o quanto as coberturas verdes extensivas conseguem reduzir a temperatura interna dos ambientes. Nos artigos revisados e citados nos quadros 7 e 8 vê-se casos em que as coberturas extensivas com até 20 cm são comparadas (TAM; WANG; LE, 2016) e uma exceção de Yang et al. (2015) que estuda variações de espessuras de substrato, mostrando que não há melhoria relevante para isolamento térmico com a alteração desta característica. Há casos em que a comparação da cobertura verde é feita com coberturas de lajes de concreto impermeabilizadas e tratadas com material isolante. A exceção é o experimento de Kumar e Mahalle (2016) cuja laje não possui material adicional isolante apresentando uma maior redução de temperatura em relação às outras pesquisas.

Quadro 7 - Redução de temperatura do ar em ambientes com envoltória verde.

Envoltória	Redução de Temperatura	Referência
Coberturas verdes extensivas	$\leq 2,1^{\circ}\text{C}$	(TAM; WANG; LE, 2016)
	$\leq 4,4^{\circ}\text{C}$	(KUMAR; MAHALLE, 2016)
	0,5 a 0,95 $^{\circ}\text{C}$	(YANG et al., 2015)
	$\leq 3,5^{\circ}\text{C}$	(GAGLIANO et al.,2015)

Fonte: Adaptado de MONTANARI e LABAKI, 2017, p. 184.

Na mesma revisão de literatura Montanari e Labaki (2017) identificaram os pontos positivos e negativos sobre economia de energia em coberturas verdes (quadro 8) quando

comparadas ao uso de cobertura em laje impermeabilizada, indicando que as máximas reduções diurnas ocorrem durante a tarde e o efeito da inércia térmica gerado pela solução construtiva.

Quadro 8 - Relação das coberturas verdes com a economia de energia.

Autor	Economia de energia	Principais observações para coberturas verdes
(YANG et al., 2015);	Observações positivas	Até 15,2% de economia anual de energia com cobertura verde
(FOUSTALIERAKI et al., 2017);	Observações positivas	15,1% de economia anual de energia com cobertura verde
(GAGLIANO et al., 2015).	Observações positivas	Coberturas verdes e <i>cool roofs</i> promovem maior economia e benefícios ambientais do que coberturas com grande isolamento térmico
(MOODY; SAILOR, 2013).	Observações negativas	O balanço energético das coberturas verdes é complexo e nem sempre resulta em economia de energia

Fonte: MONTANARI e LABAKI, 2017, p. 187.

Estudos que comparam coberturas verdes e telhas de fibrocimento e economia de energia são lacunas identificadas pela revisão das autoras.

Na revisão sistemática citada os estudos de Comarazamy, González e Luvall (2015) sugerem que a distribuição de coberturas verdes em áreas urbanizadas são estratégias eficientes para a redução dos efeitos de ilha de calor urbanas, seguidas por plantio de árvores nas ruas e a criação de parques. Tais pesquisadores apontam o balanço energético das superfícies e a temperatura do ar como principais aspectos positivos para a redução dos efeitos de ilha de calor.

3 BRASÍLIA E O CLIMA QUENTE

3.1 Caracterização climática de Brasília

Brasília está localizada na região Centro-Oeste do Brasil, entre os paralelos 15°30' e 16°03' e os meridianos 47°18' e 48°17' (oeste de Greenwich) e possui altitude de aproximadamente 1.070 metros. De acordo com Corrêa, no Distrito Federal ocorrem os climas Tropical de Savana (Aw), Subtropical Úmido (Cwa) e Subtropical de Altitude (Cwb), que respectivamente se estendem por 45%, 46% e 9% do território distrital (Köppen-Geiger) (Peel et al., 2007). O clima Aw ocorre em áreas com altitude inferior a 1.000 m, o clima Cwa ocorre na área do Pediplano de Brasília, entre 1.000 e 1.200 m de altitude, e o clima Cwb é típico dos platôs, em altitudes superiores a 1.200 m (Martins et al., 2004). Os três tipos de clima que ocorrem no Distrito Federal são resultados das diferentes altitudes e não de diferenças em precipitação pluviométrica. A temperatura média anual varia de 21°C a 24°C e a precipitação anual varia de 1.200 a 1.600 mm, com 95% do volume precipitando entre setembro e março (INMET, 2012).

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), disponibiliza gráficos das normais climatológicas que retratam os dois períodos. As normais climatológicas representam o cálculo das médias de parâmetros meteorológicos, seguindo os critérios da Organização Meteorológica Mundial (OMM) que referenciam períodos padronizados de trinta anos: 1901-1930, 1931-1960 e 1961-1990 (INMET, 2021). Brasília iniciou os registros dos dados climáticos a partir de 1961. Atualmente, duas estações fazem os registros climáticos da cidade, sendo uma localizada na Região Administrativa do Sudoeste e outra no Aeroporto Internacional de Brasília.

A temperatura média máxima ocorre em setembro, com 28.30 °C (Figuras 28 e 29) e a temperatura média mínima ocorre em julho, com 12.90 °C. Os registros mais baixos de umidade relativa do ar se dão no inverno, com 50% (Figuras 30). Sobre as precipitações, o nível mais alto se registra em janeiro com 241.40mm e o mais baixo ocorre em junho, 7mm (Figuras 31).

Figura 27 - Chave de Classificação de Climática de Köppen simplificada por Setzer_(2014)

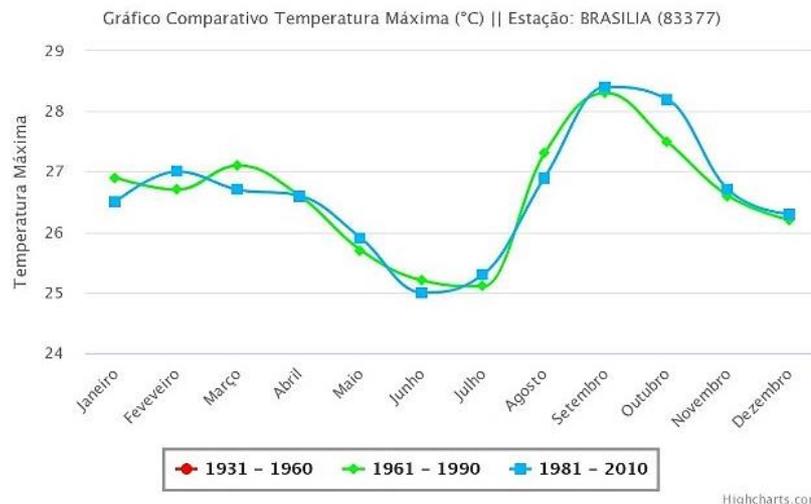
Temperatura média Normal		Total de chuva do mês mais seco (Pms)	Total de chuva anual (P)	Descrição do Tipo de Clima segundo Köppen (Climas Úmidos)		Símbolo	
do mês mais frio	do mês mais quente						
≥ 18°C	≥ 22°C	≥ 60mm		TROPICAL	sem estação seca	Af	
		< 60mm	< 2500 - 27,27. Pms		Inverno Seco	Aw	
			≥ 2500 - 27,27. Pms	TROPICAL com chuvas excessivas		Am	
< 18°C	< 22°C	< 30mm		SUBTROPICAL	Inverno Seco	Quente	Cwa
						Temperado	Cwb
	≥ 22°C	≥ 30mm			Quente	sem estação seca	Cfa
					Temperado	Cfb	

Fonte: Cardoso (2014, pag.40)

Embora Brasília apresente temperaturas médias muito próximas do que se considera confortável para o corpo humano, as investigações sobre como os elementos climáticos interferem nas relações entre ambiente construído e os usuários, que devem ser considerados para validar ou questionar as decisões de projeto no presente estudo.

Considerando o horário de funcionamento das atividades acadêmico-administrativas, das 07h:00 às 19h:00, o estudo se interessa, sobretudo pelo período das 10h:00 às 16h:00, do qual há os registros de maior temperatura do ar e ocupação plena da sala de aula escolhida para trabalhar com as variáveis de projeto, o que será explicado mais adiante.

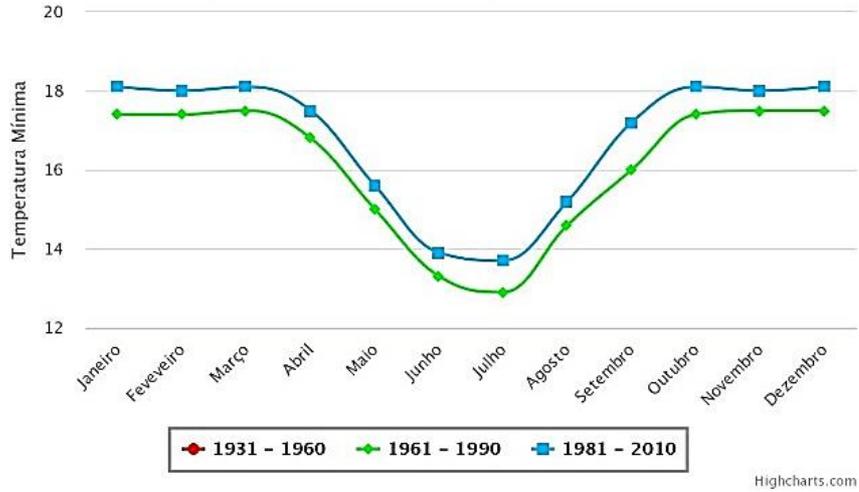
Figura 29 - Temperatura máxima do ar.



Fonte: INMET (2021).

Figura 30 – Temperatura mínima do ar.

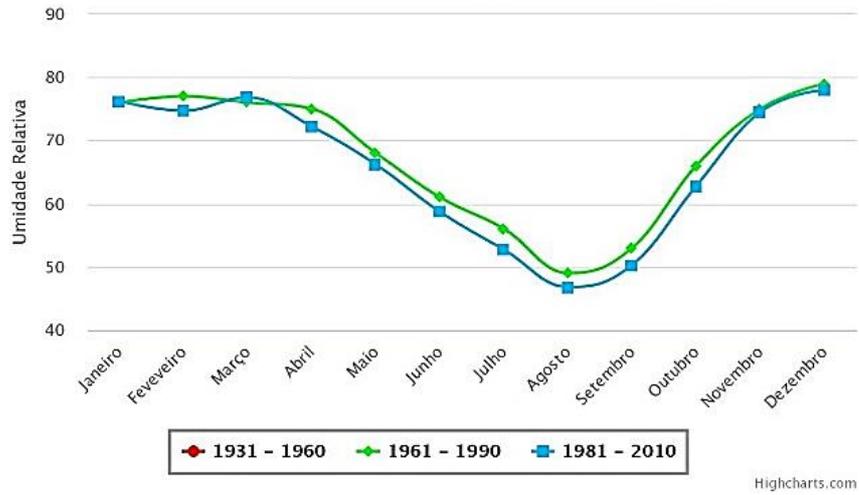
Gráfico Comparativo Temperatura Mínima (°C) || Estação: BRASILIA (83377)



Fonte: INMET (2021).

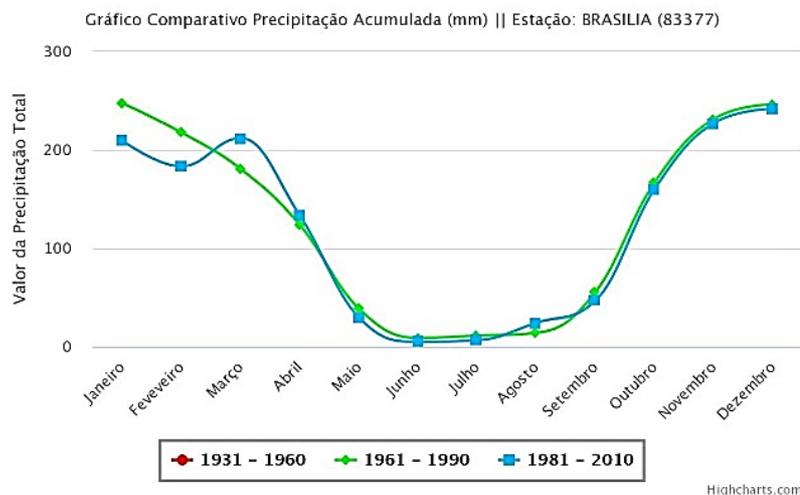
Figura 31 - Umidade relativa do ar.

Gráfico Comparativo Umidade Relativa (%) || Estação: BRASILIA (83377)



Fonte: INMET (2021).

Figura 32 - Precipitação acumulada.



Fonte: INMET (2021).

A amplitude térmica, diferença entre a temperatura máxima e a mínima ao longo de um dia, varia conforme a umidade e pode ser alta em períodos secos de acordo com Zanoni (2015). Para o autor, aproximadamente 50% dos dias do ano apresentam amplitude térmica diária maior que 10°C. O desconforto por frio apontado pela plataforma Projeteer (n.d) representa 46% dos dias do ano e ocorre especificamente nas madrugadas.

Os ventos são sazonais, com predominância na direção Leste no período seco e Noroeste no período chuvoso. Consoante a Ferreira (1965) e Goulart et al. (1997), a velocidade média dos ventos é baixa, entre 2 e 3 m/s predominante.

A insolação anual é de cerca de 2.370 horas segundo dados do INMET (1992). A radiação solar, em concordância com as normais climatológicas de 1961-1990 apontam insolação de 266 horas para o mês de julho e o mínimo de 138 horas em dezembro. A radiação global, expressa em décimos, possui uma média para o período de 1961-1990 igual a oito em dezembro e igual a três entre julho e agosto.

Brasília se localiza dentro da região do bioma Cerrado. A vegetação se destaca por seu pequeno porte com plantas esparsas e rasteiras de troncos retorcidos, raízes profundas, cascas grossas e folhas espessas. Dentro desse bioma há algumas diferenciações e variações conhecidas como cerradões, campos limpos, campos sujos e matas secas, entre outras.

3.2 Recomendações de estratégias bioclimáticas

De acordo com Romero:

A localização da cidade de Brasília se consolida a partir da escolha de um entre cinco sítios pré-definidos dentro de uma área de 5.000 km² no Estado de Goiás. A escolha

final do sítio foi feita a partir de uma avaliação climática e geológica do lugar, pela Comissão de Localização da Nova Capital Federal (ROMERO, 2015, p. 128).

Segundo a autora, o sítio escolhido era o que apresentava a combinação mais favorável das variáveis climáticas analisadas: temperatura, umidade, chuvas, ventos, nebulosidade, altitude e conformação geomorfológica nos níveis macro, meso e microclimáticos (ROMERO, 2015). Assim, vê-se que os princípios da bioclimatologia direcionaram a definição pelo local da nova capital federal e Goulart (1997) confirma o quão favorável foi tal escolha em seus estudos que apontam Brasília como a cidade com maior percentual de horas de conforto em relação a outras 13 cidades com diferentes climas.

A Norma Brasileira NBR 15220-3 estabelece o zoneamento bioclimático do país, subdividindo o território em oito Zonas Bioclimáticas. A sazonalidade do clima de Brasília, variando entre o tropical seco e o úmido, com uma época quente e outra mais fria a classifica, conforme o zoneamento bioclimático brasileiro, como Zona 4.

Para a Zona 4 as recomendações construtivas são o uso de aberturas médias, sombreamento das aberturas ao longo do ano, paredes pesadas e cobertura leve com isolamento térmico.

Na escala do edifício, as soluções bioclimáticas para o contexto climático de Brasília são apontadas por diversos autores e se apresentam condensadas na plataforma Projeteer, além da NBR 15220-3, respeitando a carta psicométrica que indica a porcentagem do total de horas do ano, estação ou período em que determinada estratégia de condicionamento é mais recomendada. A aplicabilidade de cada estratégia está relacionada no quadro abaixo:

Quadro 9 – Estratégias Bioclimáticas para a cidade de Brasília.

Estratégia	Aplicabilidade			
	Média Geral	Manhã	Tarde	Noite
Inércia térmica	52%	50%	7%	54
Ventilação Natural	22%	18%	37%	38%
Sombreamento	10%	16%	34%	0%
Aquecimento Solar Passivo	8%	11%	0%	1%
Resfriamento Evaporativo	5%	5%	9%	8%

Fonte: PROJETEER, 2021.

Quadro 10 - Ações e Recomendações Projetuais

Ações	Práticas recomendadas
Minimizar a absorção e estocagem da energia solar.	Uso de envoltórias dos edifícios com proteção da incidência de radiação solar e admitância adequada.
Evitar que massas de ar aquecidas venham a ser transportadas sobre as áreas de vivência.	Localização de vias de tráfego automotor e dos estacionamentos a sotavento das áreas de vivência.
Reduzir a tensão térmica cuidando da orientação dos edifícios e do mobiliário urbano.	Orientação das fachadas e dos espaços públicos abertos para receber a menor carga térmica.
Controlar a densidade edificação	Uma alta densidade significa que se reduz a área total da envoltória dos edifícios.
Reduzir a carga térmica do ambiente urbano.	Menos comprimento e largura das vias pavimentadas.
Evitar vias e estacionamentos sem arborização.	Uso de materiais na pavimentação que evitem a absorção da radiação solar.
Favorecer retorno do vento ao fluxo original.	Criar vazios na área urbana.
Evitar sombras de vento.	Manter distâncias maiores que 2H entre as edificações.
Preservar a boa aeração.	Favorecimento da dispersão de poluentes. Segregação de atividades que produzem gases.

Fonte: Romero (2011, p. 72).

Romero (2011, p. 72) aponta ações e recomendações projetuais ponderando a existência de uma legislação urbana bioclimática e as variáveis mais significativas do meio urbano que promovem qualidade ambiental das edificações a partir da gestão do espaço, como pode ser visto no Quadro 10.

Como apresentado na revisão bibliográfica, as estratégias passivas com mais efetividade na mitigação do desconforto térmico ao longo do ano são: emprego de inércia térmica⁴, ventilação natural e sombreamento. Devido a amplitude térmica característica do período seco e as manhãs e noites com temperaturas mais baixas, a inércia térmica representa uma boa alternativa para as edificações por promover o atraso térmico e com isso, diminuir o desconforto por frio. O sombreamento promovido pela cobertura vegetada funciona como barreira impeditiva do calor em forma de radiação, típica do período vespertino. A ventilação natural, o aquecimento solar passivo e o resfriamento evaporativo não se relacionam com os tetos verdes, objetos de estudo desta pesquisa. Quanto maior a massa térmica, maior o calor retido. Lamberts

⁴ Lamberts et al. (2016, p. 39) definem inércia como a capacidade que o material tem de reter no seu interior parte do calor que é conduzido através dele, consequência de sua massa térmica.

et al. (2016, p.44) mostraram que em locais onde há oscilação de temperatura com valores elevados durante o dia e baixos à noite, a massa térmica dos fechamentos da edificação pode ser utilizada para acumular durante o dia, retê-lo e liberá-lo para o interior durante a noite.

Segundo Santamouris e Asimakopoulous (1996) apud Papst (1999, p. 13), o uso da inércia térmica tem efeito positivo tanto no verão quanto no inverno. No verão, o ganho solar durante o dia é armazenado na massa térmica, reduzindo os picos das cargas de resfriamento. Este calor é liberado para o interior da edificação por atraso térmico, ocasionando alteração no horário de pico da carga de resfriamento e diminuindo o seu valor. Papst comparou edifícios com pouco e muita inércia térmica para os períodos de outono e primavera e observou que os edifícios leves podem precisar de aquecimento para uma parte do dia e resfriamento para outra. Já as construções com mais inércia térmica não apresentam variabilidade e, dependendo das condições externas, podem apresentar condições internas favoráveis.

3.3 Estudo de Caso

O edifício do Liceu Francês François Mitterrand foi projetado pelos arquitetos Jean Dubus e José Luiz Tabith no ano de 2016. Possui área construída de 12.199 m² e está localizado no Lago Sul, Brasília (Figura 34) – DF, em uma área que faz parte da unidade de conservação do Jardim Botânico. O colégio oferece educação poliglota e multicultural desde o maternal até o ensino médio e tem capacidade para atender até 800 alunos. O projeto é o resultado de um concurso internacional que envolveu o Brasil e a França, cuja arquitetura bioclimática foi colocada como ponto forte. Em 2019, o edifício recebeu o Prêmio Saint Gobain de Arquitetura Habitat Sustentável, ficando em segundo lugar na categoria Edifício Institucional. O terreno de 15.000 m² acomoda a edificação composta por três pavimentos e cinco volumes, de modo a mesclar cheios e vazios, criando os ambientes típicos de uma escola como salas de aula, quadras de esporte e piscina com cobertura, setor administrativo e pátios repletos de verde que acabam se tornando espaços de aprendizagem integrados à natureza.

A cobertura verde extensiva existente no local é a maior do Distrito Federal, com área de 3.300 metros quadrados, por isso o interesse em pesquisá-la, já que se trata de um projeto com muitas estratégias bioclimáticas surge o questionamento do papel desta solução de cobertura no desempenho térmico do conjunto edificado. Como o edifício está localizado às margens do Jardim Botânico de Brasília, com área de 526 hectares destinados às coleções botânicas e paisagísticas (OLIVEIRA, 2018), é importante destacar que se trata de uma região com baixa densidade de construções. A relativa proximidade ao Lago Paranoá não traz tantos benefícios com a melhoria do microclima pela presença da água. A escola está inserida em um contexto com poucas implicações do entorno imediato, se comparado aos estudos acadêmicos do impacto dos tetos verdes em cidades altamente adensadas.

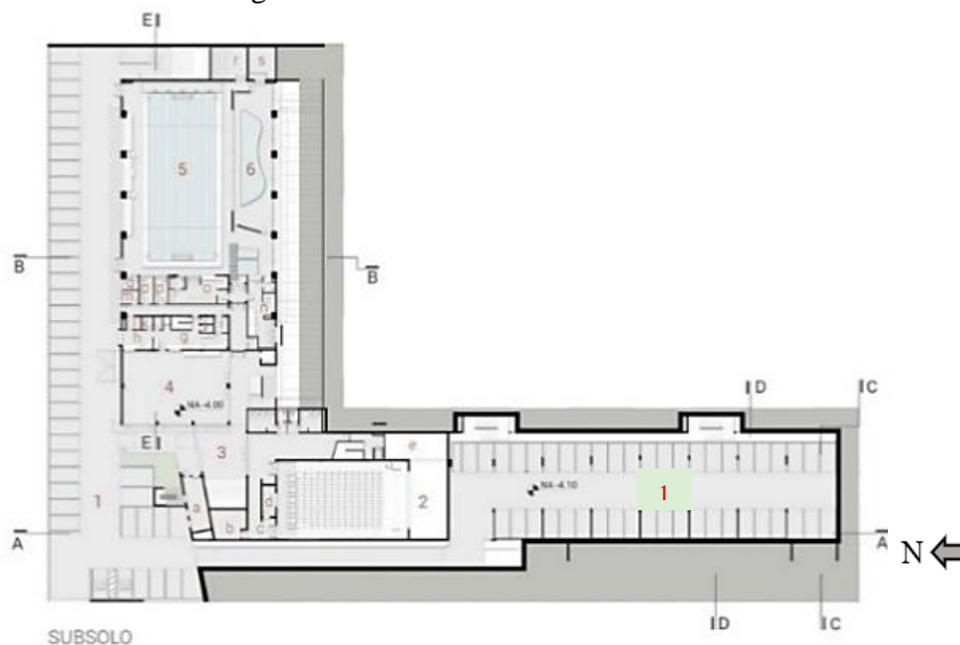
Os pavimentos térreo e superior concentram as salas de aula e se conectam por meio de elementos bem posicionados de circulação horizontal e vertical, diminuindo as distâncias a serem percorridas pelos usuários (Figura 34, 35 e 36). O perfil natural do terreno foi bem aproveitado como pode ser observado no corte da edificação (Figura 37 e 38) dando espaço ao subsolo que abriga o estacionamento, o auditório e a piscina coberta.

Figura 33: Localização do Liceu de Brasília e volumetria da edificação



Fonte: Página do Archdaily. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/919735/liceu-frances-francois-mitterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus/5d120c17284dd12f3b0000c8-liceu-frances-francois-mitterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus-planta-pavimento-superior>. Acesso: 20/10/2022.

Figura 34 – Subsolo do Liceu Francês



Fonte: Página do Archdaily. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/919735/liceu-frances-francois-mitterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus/5d120c17284dd12f3b0000c8-liceu-frances-francois-mitterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus-planta-pavimento-superior>. Acesso: 20/10/2022.

Legenda Subsolo:

1: estacionamento; 2: auditório; 3: acesso auditório/ refeitório; 4: refeitório; 5: piscina semiolímpica; 6: piscina infantil

Figura 35 - Pavimento térreo do Liceu Francês



Fonte: Página do Archdaily. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/919735/liceu-frances-francois-miterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus/5d120c17284dd12f3b0000c8-liceu-frances-francois-miterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus-planta-pavimento-superior>. Acesso: 20/10/2022.

Legenda Térreo:

1: área de apoio; 2: pátio de acesso; 3: biblioteca; 4: administração e diretoria; 5: sala de psicomotricidade; 6: salas de aula; 8: refeitório escola primária; 9: ginásio; 10: espaço esportivo; 11: quadra poliesportiva; 12: guarita; 13: cobertura sombreante; 14: praça de convívio coberta; 15: acesso automóveis; 16: estacionamento de visitantes; 17: acesso pedestres; 18: acesso ao estacionamento de funcionários.

Figura 36 – Setorização do Liceu Francês

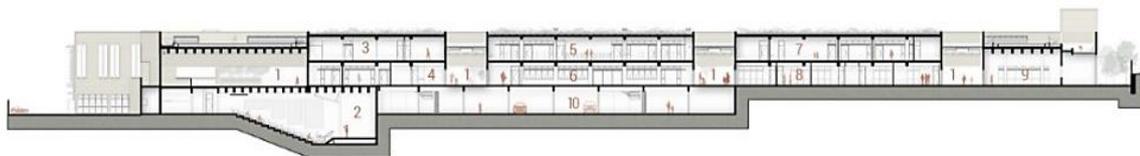


Fonte: Página do Archdaily. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/919735/liceu-frances-francois-miterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus/5d120c17284dd12f3b0000c8-liceu-frances-francois-miterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus-planta-pavimento-superior>. Acesso: 20/10/2022.

Legenda Pavimento Superior:

1: praça superior; 2: laboratório de tecnologia; 3: laboratório de biologia; 4: sala de artes plásticas; 5: área técnica; 6: jardim educativo/ horta; 7: sala de aula; 8: sala poliesportiva; 10: cobertura sombreante.

Figura 37 - Cortes AA ilustrando o bom aproveitamento do perfil natural do terreno.



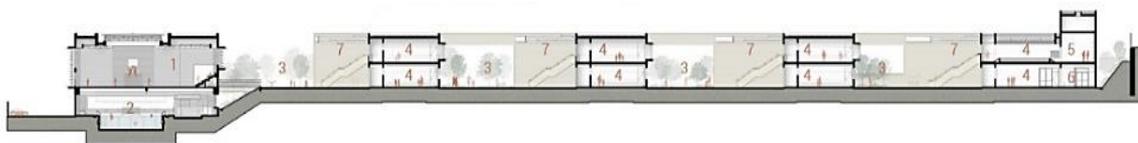
CORTE AA

Fonte: Página do Archdaily. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/919735/liceu-frances-francois-mitterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus/5d120c17284dd12f3b0000c8-liceu-frances-francois-mitterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus-planta-pavimento-superior>. Acesso: 20/10/2022.

Legenda Corte AA:

1: pátio de acesso; 2: auditório; 3: laboratório de informática; 4: enfermaria; 5: laboratório de biologia; 6: biblioteca; 7: sala de artes plásticas; 8: administração; 9: sala de psicomotricidade; 10: estacionamento

Figura 38 - Corte BB ilustrando o bom aproveitamento do perfil natural do terreno.



CORTE BB

Fonte: Página do Archdaily. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/919735/liceu-frances-francois-mitterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus/5d120c17284dd12f3b0000c8-liceu-frances-francois-mitterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus-planta-pavimento-superior>. Acesso: 20/10/2022.

Legenda Corte BB:

1: ginásio; 2: piscina semiolímpica; 3: pátio; 4: sala de aula; 5: área técnica; 6: sanitário; 7: cobertura sombreante.

Como soluções bioclimáticas de projeto destacam-se o estudo da orientação solar para a implantação da edificação e por isso, o uso do vidro é coerente, sendo explorada a face sul para colocação das janelas das salas de aula, sombreamento das circulações voltadas para a face norte por meio de beirais largos, uso de brises de madeira no volume principal da edificação posicionados na fachada oeste e sombreamento das praças através de uma estrutura metálica coberta por um ripado também de madeira (Figura 39). A ventilação cruzada foi pensada para os ambientes internos e potencializada com umidificadores que funcionam por automação, não demandando o uso de ar-condicionado. A localização dos vaporizadores foi pensada de modo

a captar a entrada natural do ar (parte superior das janelas), evitando a formação de gotas ou vapor de água nos ambientes.

Figura 39 - Soluções bioclimáticas aplicadas às fachadas da edificação. Fachadas oeste, norte e leste, respectivamente.



Fonte: Página do Archdaily. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/919735/liceu-francois-francois-mitterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus/5d120c17284dd12f3b0000c8-liceu-francois-francois-mitterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus-planta-pavimento-superior>. Acesso: 20/10/2022.

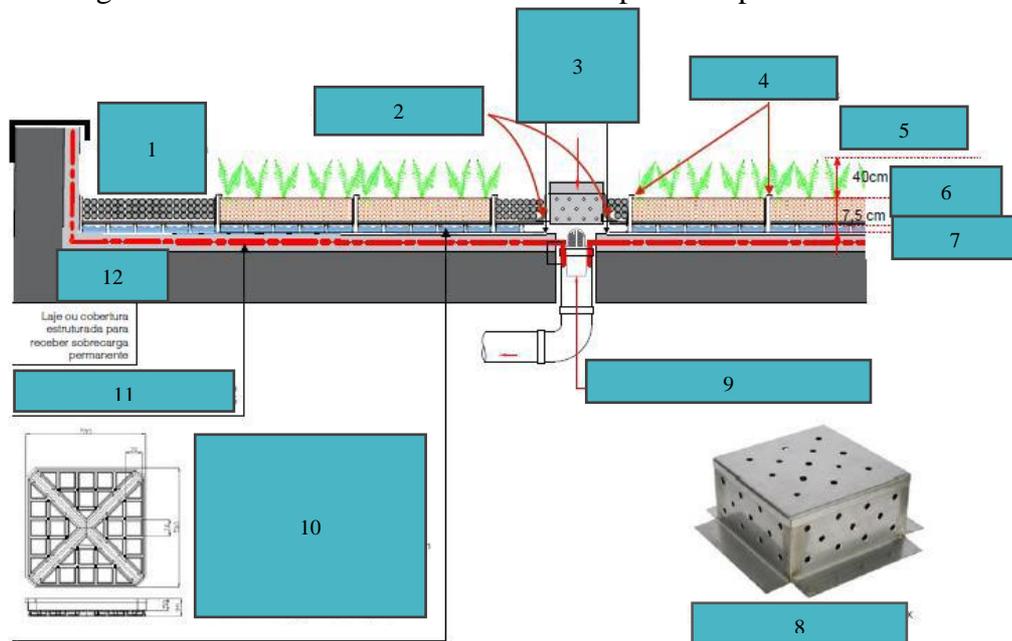
O telhado verde da escola é outra solução bioclimática relevante (Figura 40) por promover proteção da radiação solar direta sobre a cobertura além de gerar isolamento acústico. De acordo com a empresa executora, o Instituto Cidade Jardim, especializada em tetos verdes, o telhado representa uma área de 3.300 m² de vegetação composta em grande parte por espécies suculentas que foram colocadas conforme o sistema de cultivo modular sobre a laje da edificação (Figura 41), sendo uma cobertura do tipo extensiva pela fina camada de substrato orgânico. Tais espécies são de rápido crescimento e compatíveis com o clima de Brasília. Um sistema de irrigação foi implantado para auxiliar a manutenção do jardim no período de seca.

Figura 40 - Teto verde plantado com a espécie *callisia repens*, ou dinheiro de penca.



Fonte: Instituto Cidade Jardim (2019, p. 32).

Figura 41 - Detalhamento do teto verde implantado pelo sistema modular.



Fonte: Instituto Cidade Jardim (2019, p. 32).

LEGENDA: 1: módulo preenchido com brita, seixo, argila expandida ou piso drenante; 2: aba da caixa de inspeção apoiada sobre a base da estrutura plástica do módulo recortado; 3: corte no fundo do módulo deixando um vazio sobre a abertura do dreno; 4: sobreposição encaixe entre módulos; 5: 4cm-vegetação; 6: 5cm-substrato; 7: 2,5cm-drenagem; 8: detalhe caixa de inspeção em inox; 9: grelha hemisférica; 10: módulo de cultivo cidade jardim – base perfurada com 24 orifícios de 5mm para microdrenagem e aeração; 11: impermeabilização; 12: laje ou cobertura própria para receber sobrecarga.

O recorte do objeto de estudo é uma sala de aula coberta com teto verde extensivo. Das mais de 30 salas de aula existentes no edifício, a escolhida está ilustrada adiante (Figura 41), por apresentar características pertinentes à análise pretendida.

Além de investigar se o telhado verde extensivo é uma solução de projeto relevante para diminuir as cargas térmicas advindas da cobertura no contexto climático de Brasília-DF, há o

interesse em conhecer a variabilidade sazonal da eficiência dos tetos vegetados, especialmente para a estação do verão. O edifício escolhido apresenta um atributo importante, citado anteriormente, que é a ventilação natural e por isso a combinação com a cobertura verde, em tese, influenciaria positivamente no controle do conforto ambiental das salas de aula. As simulações servirão para validar ou invalidar esta hipótese.

4 MÉTODO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM COBERTURAS VERDES

4.1 EnergyPlus e a Modelagem de coberturas verdes

O *EnergyPlus* é um software de simulação energética de edifícios e muito funcional para modelar o consumo de energia dos sistemas de aquecimento, resfriamento, ventilação e iluminação⁵. O programa consegue resolver incontáveis equações, fluxos e balanços energéticos em intervalos de tempo pré-definidos, considerando as interações com diversos elementos climatológicos e do entorno. A modelagem no software só é possível com a definição correta de todos os parâmetros exigidos pela interface, preenchidos no formato IDF (*Input Data File*)⁶. Como não há uma interface gráfica dentro do *EnergyPlus* para as definições geométricas da edificação ou ambiente isolado a ser estudado é possível utilizar o software *Sketchup* para definir a geometria em estudo de forma rápida e intuitiva. Por ser gratuito e amplamente utilizado para análise térmica de edifícios foi escolhido para compor as simulações da pesquisa.

A modelagem de coberturas verdes viabiliza simular o balanço energético de tetos com vegetação e possui o objetivo de traduzir os efeitos de evapotranspiração, das trocas de radiação do solo com a vegetação e do sombreamento. Sailor criou em 2008 um modelo baseado em fenômenos físicos do balanço de energia de uma cobertura verde para funcionar de maneira integrada com o *EnergyPlus*. Na interface do software é possível explorar o módulo “*ecorooft*” - considerada a última camada de uma cobertura. As principais características contabilizadas no modelo do autor estão descritas a seguir:

Quadro 11 – Principais características contabilizadas no modelo

SOLO	VEGETAÇÃO
Densidade	Altura
	índice de cobertura foliar
condutividade	cobertura fracional
capacidade térmica	albedo
	resistência estomatal.

Fonte: Sailor (2008, pag.47)

⁵ É um programa gratuito e livre de licença de utilização, criado em 2005 pelo *US Department of Energy - USDOE* (Departamento de Energia dos Estados Unidos da América), que combina as funcionalidades de dois códigos de simulação, o *BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics)* e o *DOE -2 (Department of Energy)*.

⁶ O *EnergyPlus* é constantemente atualizado por seus desenvolvedores visando integrar ao programa os avanços obtidos no campo de pesquisa de simulações computacionais (ETHUR, 2016).

Além dos itens citados no quadro 11, é possível definir a espessura e as propriedades térmicas e hídricas do substrato. A entrada de água pode ser configurada por frequência e intensidade da irrigação e os dados de precipitação acompanham o arquivo climático. As camadas de drenagem e das membranas de proteção não são componentes do modelo e devem ser modeladas separadamente, bem como as lajes e demais componentes da cobertura (SAILOR, 2008).

O modelo não considera os efeitos das camadas de impermeabilização e membranas de proteção, por exemplo, os quais precisam ser modelados separadamente. Além disso, o *EnergyPlus* não suporta o estudo de várias coberturas verdes na mesma simulação, sendo necessário criar as modelagens em arquivos do tipo .idf separados.

4.2 Balanço térmico do modelo

Nos anos 90 as coberturas verdes começaram a ser calculadas por meio de modelos matemáticos para o entendimento dos processos de transferência de calor e massa (Blank et al, 2013). Desde então vários softwares têm surgido para auxiliar essas investigações.

Sailor (2008) em seu modelo baseado em fenômenos físicos do balanço de energia de uma cobertura verde, utilizou como referência outro modelo, chamado “Biosfera Simples” desenvolvido por Sellers et al. (1986) sobre o qual o modelo criado apresenta sete variáveis de estado físico: duas temperaturas superficiais (sendo uma para a folha da vegetação e uma para o solo); duas interceptações de umidade (sendo uma para a vegetação e outra para o substrato); e três diferentes estoques de umidade no substrato (dois níveis que podem ser atingidos pela vegetação e uma camada mais profunda em que a umidade penetra por difusão hidráulica e a gravidade é descarregada para o sistema de drenagem).

Com essa referência, Sailor divide o balanço térmico em duas partes, porém com duas partições para o transporte de umidade no substrato – uma próxima à superfície e outra no nível das raízes. Assim, para cada *timestep*, duas equações de balanço são resolvidas simultaneamente - Q_v (superfície da vegetação) e Q_s (superfície do solo), descritas nas equações 2 e 3. O algoritmo de transferência de calor necessário para o cálculo é o *Conduction Transfer Function* (CTF), que é invertido para disponibilizar os fluxos e informações para o novo cálculo do balanço térmico, sucessivamente. Essa divisão aumenta a precisão das simulações.

Equação 2 e 3 - transporte de umidade no substrato de uma cobertura verde.

$$Q_v = \sigma_v [I_s (1 - \alpha_v) + \epsilon_v I_{iv} - \epsilon_v \sigma T_v^4] + \frac{\sigma_v \epsilon_s \epsilon_v \sigma}{\epsilon_1} (T_s^4 - T_v^4) + H_v + L_v$$

$$Q_s = (1 - \sigma_v) [I_s (1 - \alpha_s) + \epsilon_s I_{iv} - \epsilon_s \sigma T_s^4] + \frac{\sigma_v \epsilon_s \epsilon_v \sigma}{\epsilon_1} (T_s^4 - T_v^4) + H_s + L_s + K \times \frac{\partial T_s}{\partial z}$$

Fonte: SAILOR, 2008; FRANKSTEIN; KOENIG, 2004; DICKENSON et al., 1986; SELLERS et al., 1986)

A radiação solar incidente predomina no balanço térmico de uma cobertura verde, como acontece em uma cobertura convencional. No modelo unidimensional de Sailor (2008) a vegetação é considerada única e homogênea camada sobre o substrato, esse que também é modelado como uma camada homogênea e com o fluxo de calor definido como resultante das trocas sensíveis e latentes sendo transmitido por condução. De acordo com Djedjig et al. (2012) a inércia térmica do substrato é desprezada.

Desse modo, os processos de transferência de calor abaixo listados são os que compõem os balanços e fluxos contabilizados nas camadas de vegetação e solo (Sailor, 2008, p.1480):

- Absorção de radiação de ondas curtas pela vegetação e substrato;
- Trocas por radiação de ondas longas entre a vegetação e o céu e entre o substrato e o céu;
- Trocas por radiação de ondas longas entre vegetação e o céu e entre as folhas e o substrato;
- Trocas por convecção entre a vegetação, o substrato e o ambiente externo, incluindo o ar retido entre a camada de vegetação e o substrato;
- Fluxos de calor latente contabilizados como a evaporação da umidade do solo e a transpiração realizada pela vegetação;
- Trocas por condução no substrato (que por sua vez, trocam calor com as demais camadas da cobertura modeladas fora do modelo de cobertura verde).

As trocas por radiação dentro do balanço térmico parcelado são mais simples e se relacionam apenas com as temperaturas superficiais, refletâncias e emissividades da vegetação e do substrato, a radiação solar de ondas curtas incidente e a radiação infravermelha do céu.

As trocas por convecção no nível da vegetação e no substrato recebem influência do diferencial de temperatura entre eles e a do ar próxima à cobertura, bem como a velocidade do vento próximo à superfície da vegetação⁷. A cobertura fracional representa a fração do substrato que recebe a sombra das folhas. Essa variável define as parcelas de trocas radiativas que acontecem entre as interfaces solo/ vegetação e o meio externo e seu cálculo é feito a partir do índice de área foliar.

A partir da diferença entre a umidade relativa do ar e o teor de umidade do substrato têm-se um coeficiente de vaporização que expressa a temperatura do ar circundante para o qual têm-se evaporação.

Para que a resistência estomatal⁸ mínima ocorra, a cada momento ela depende de quatro fatores definidos no modelo: radiação solar, umidade relativa do ar, teor de umidade do substrato e o índice de área foliar. O modelo consegue contabilizar a resistência aerodinâmica às trocas latentes, conforme a rugosidade da camada de vegetação. Andrade (2022, p.35) salienta que se deve obter o Índice de Área Foliar (IAF) de cada espécie, a base para o cálculo da Densidade de área foliar (DAF), informação importante para simulações computacionais. No recorte proposto o DAF não é considerado pois os telhados verdes extensivos não comportam espécies arbóreas.

O modelo unidimensional de Sailor considera o plano horizontal com temperaturas homogêneas e o plano vertical onde ocorre as transferências de calor. O autor explorou em 2008 oito diferentes substratos para entender melhor as variações e pôde perceber que a saturação no substrato aumenta a condutividade e a capacidade térmica em 40% se comparado aos mesmos substratos secos. Tabares-Velasco e Srebic (2012) identificaram relações similares na validação do modelo criado por eles.

A umidade é contabilizada no modelo como entrada sob a forma de irrigação e precipitação. A saída é expressa como evaporação do substrato, evapotranspiração das folhas e o sistema de drenagem da cobertura ou *runoff*. Sailor atribui na simulação, valores de entrada limitados para evitar erros de cálculos e instabilidade no modelo, considerando uma aproximação a partir de variações nominais de umidade ao longo do dia e por sazonalidade.

7 O índice de área foliar é o parâmetro que representa a abundância de vegetação no teto verde segundo a área projetada pelas folhas das espécies sobre a área do substrato. Shinzato e Duarte (2012), definem que o Índice de Área Foliar é uma variável adimensional e variável a depender da espécie, seu crescimento e estágio de desenvolvimento e que se relaciona com o processo de interceptação de chuva e fluxo de carbono. Este parâmetro descreve como as folhas são organizadas e os valores de IAF que variam de 1 a 10 (m²/m²).

8 A resistência estomatal é uma característica da vegetação e indica a capacidade que a espécie tem de transpirar e para acontecer depende de fatores como a intensidade luminosa (que determina a fotossíntese), o teor de umidade do solo e o diferencial de pressão de vapor entre os estômatos das folhas e o ar que circunda as espécies.

A validação do modelo para incorporá-lo ao *EnergyPlus* foi realizada pela *University of Central Florida*, onde os cenários reais em forma de experimento e as simulações computacionais foram compatíveis, mesmo sem computar o dado de temperatura superficial do substrato na cobertura. Alguns testes extras de análise de sensibilidade foram feitos para averiguar as variações de determinados parâmetros chaves e os resultados corresponderam às expectativas, fazendo com o que o modelo fosse reconhecido como uma excelente ferramenta para o entendimento energético dos tetos verdes. Como exemplos Sailor (2008) destaca: o incremento na espessura da camada do solo que representou um maior isolamento; uma maior quantidade de vegetação no teto verde gerou um maior efeito de resfriamento no verão e maior demanda por aquecimento no inverno; o aumento da irrigação em climas secos melhorou o desempenho térmico das coberturas verdes, o que mostra que para coberturas verdes no contexto climático de Brasília o ideal seriam estruturas com sistema próprio de irrigação para o período de estiagem.

4.3 Metodologia de Simulação para o Liceu Francês de Brasília

Este capítulo apresenta o método de simulação com os parâmetros de entrada e demais configurações utilizadas no software. Foram realizadas medições experimentais de temperatura interna da sala em estudo para a calibração do modelo computacional em março de 2022. A modelagem da edificação foi feita no *Sketchup* versão *Web*. As simulações computacionais foram realizadas no *EnergyPlus*, versão 22.1.0. O procedimento das simulações e a escolha das variáveis de saída (produto das simulações) também são apresentados neste capítulo.

Os parâmetros da sala de aula em questão serão descritos à diante, bem como as dimensões e características construtivas do ambiente, o entorno e os fatores externos, ademais do clima e as referências do arquivo climático.

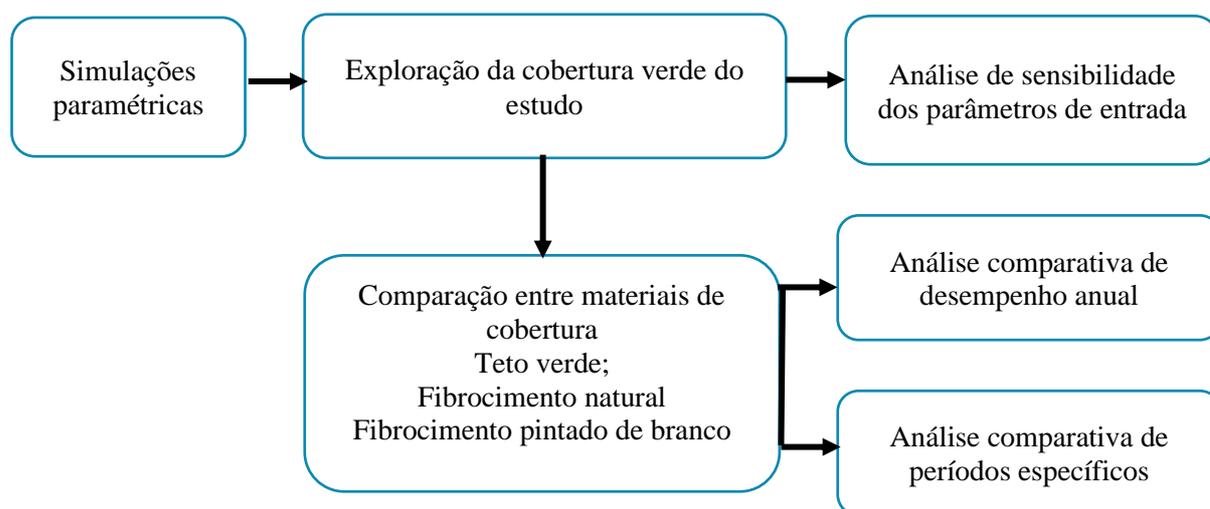
As variações pré-determinadas dos parâmetros de entrada possibilitam uma análise de sensibilidade do modelo em estudo, que consiste em alterar uma variável a cada simulação, deixando as outras inalteradas, com o intuito de analisar a influência dessa variável no desempenho apresentado (OLIVEIRA, 2006).

Na primeira etapa da simulação, somente o teto verde extensivo na condição atual foi analisado. Na segunda etapa, as simulações buscam comparar o desempenho térmico da cobertura verde extensiva com o telhado de fibrocimento com acabamento natural. Tal procedimento se justifica para analisar o impacto dos diferentes materiais aplicados à cobertura, bem como a variação do parâmetro espessura sobre o desempenho térmico das duas coberturas.

A condição cobertura em fibrocimento pintado de branco também foi simulada, pois o engenheiro responsável pela manutenção predial informou na visita técnica realizada no mês de março de 2022 que há interesse por parte dos gestores em retirar o telhado verde devido os custos com irrigação. Com o intuito de obter resultados que possam ser utilizados na tomada de decisão dos gestores da escola, tal cenário também faz parte da pesquisa.

Foram simulados todos os dias do ano e não apenas os dias típicos e os dados de temperaturas externas utilizados nas simulações foram retirados do arquivo climático INMET 2020 de Brasília, DF (LABEE, 2018). Para a análise, foram trabalhadas uma sequência de três dias com características semelhantes, cujo terceiro corresponde ao dia com temperaturas externas mais elevadas do ano, conforme a NBR 15575-1 (ABNT, 2013).

Figura 42 – Fluxograma do método da pesquisa



4.4 Propriedades físicas dos materiais da envoltória da edificação e os parâmetros da cobertura verde

Nos quadros 12, 13, 14 e 15 são apresentadas as propriedades físicas dos materiais da envoltória da edificação e os parâmetros da cobertura verde.

Para simular o cenário com cobertura em fibrocimento natural foi definida uma camada de ar sem ventilação entre a laje e a telha, com absorvância solar de 0,46 (Quadro 12). A emissividade do fibrocimento foi considerada 0,92. A resistência térmica da camada de ar corresponde ao fluxo descendente, única configuração possível do programa.

Quadro 12 - Dados físicos dos materiais da envoltória do modelo.

material	bloco cerâmico 14 cm	concreto	forro	telha fibrocimento natural	laje mista 12 cm
rugosidade	rugoso	rugoso	liso	médio	médio
espessura [m]	0,015	0,08	0,03	0,04	0,12
condutividade [w/mk]	0,9	1,75	55	0,05	1,05
densidade [kg/m ³]	3732	2400	7800	0,00	1087
calor específico [j/kg/k]	920	1000	460	0,00	920
absortância térmica	0,9	0,9	0,9	0,00	0
absortância solar	0,7	0,7	0,7	0,46	0
absortância visível	0,7	0,7	0,7	0,46	0
câmara de ar	r= 0,21 m ² . k/w				

Fonte: DORNELLES, 2021, p. 26; WEBER et al., 2017; NBR 15220-2, 2005, p.12).

Quadro 13 - Parâmetros físicos do vidro da janela

espessura [m]	0,04
transmitância solar	0,837
refletância solar frontal	0,075
refletância solar posterior	0,075
transmitância visível	0,898
refletância visível frontal	0,081
refletância visível posterior	0,081
transmitância infravermelha	0
emissividade hemisférica infravermelha frontal	0,84
emissividade hemisférica infravermelha posterior	0,84
condutividade	0,9

Fonte: NBR 15220-2, 2005, p. 16.

Quadro 14- Dados físicos das camadas utilizadas no telhado verde.

Material	Camada filtro	Camada drenante	Barreira impermeável
<i>Rugosidade</i>	Liso	Liso	Liso
<i>Espessura [m]</i>	0,05	0,06	0,07
<i>Condutividade [W/m.K]</i>	0,06	0,08	0,17
Densidade [kg/m ³]	160	800	1200
Calor específico [J./kg. K]	2500	920	920
Absortância térmica	0,9	0,9	0,9
Absortância solar	0,2	0,2	0,2
Absortância visível	0,2	0,2	0,2

Fonte: SILVA, 2014, p. 10.

Quadro 15 - Parâmetros gerais da vegetação e do substrato do telhado verde

Altura da vegetação [m]	0,1	Rugosidade do solo	Rugoso
Índice de massa foliar – IAF	1	Condutibilidade do solo seco [W/m.K]	1
Espessura do solo [m]	0,05	Densidade do solo seco [kg/m ³]	500
Refletividade da Folha	0,25	Calor específico do solo seco [J/kg. K]	1900
Emissividade da folha	0,95	Absortância térmica	0,9
Resistência estomática mínima [s/m]	180	Absortância solar	0,8
		Absortância visível	0,8
		Teor de umidade de saturação	0,3
		Teor de umidade residual	0,01
		Teor de umidade inicial	0,1
		Método de cálculo de difusão de umidade	Simplex

Fonte: BEYER, 2008, p. 7 e SILVA, 2014, p. 10.

O ambiente interno foi considerado naturalmente ventilado, condição original do projeto.

Em todas as etapas simuladas as características da sala foram mantidas constantes, com exceção da cobertura e dos arquivos climáticos.

Foi simulado o período de um ano.

Para a modelagem de coberturas verdes a partir do modelo de Sailor (2008) têm-se a definição de duas camadas: folhagem e solo e seus respectivos parâmetros: radiação de comprimento de onda curta e longa; transferência de calor para diferentes tipos de vegetação; a transpiração das plantas e a evaporação de água do solo; condução e armazenamento de calor no solo; a variação das propriedades térmicas do solo e o cálculo de difusão da umidade do solo foi incorporado ao modelo a opção *Advanced*, a partir de estudos posteriores aos de Sailor. (Dias, 2016). O método aprimora as trocas térmicas latentes e a inércia térmica do substrato, dividindo-o em nós e gerando um cálculo para a distribuição da umidade pelo método de diferenças finitas.

O ambiente interno não possui condicionamento artificial, característica de todas as salas de aula da escola. Assim, o sistema escolhido para as cargas térmicas foi o “ideais totais”, correspondente às cargas térmicas de resfriamento para manter o ambiente com a temperatura entre 22 e 24 °C. Os *setpoints* do termostato foram configurados em 22°C para aquecimento e 24°C para resfriamento, com o intuito de simular a temperatura ambiente de relativo conforto térmico. Tais valores representam uma margem de +- 1°C da temperatura de 23°C.

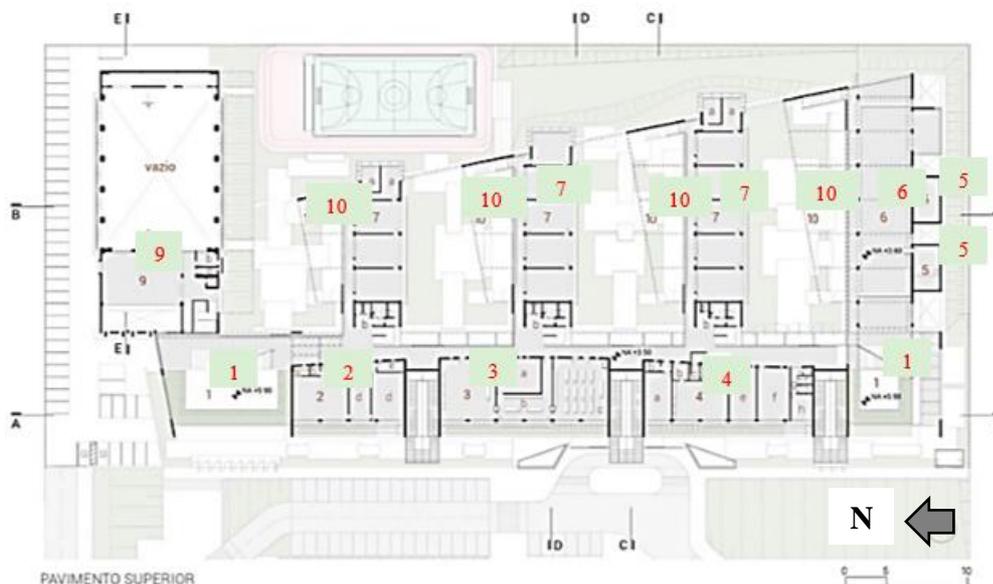
Todas as etapas das simulações consideram as características da sala de aula como constantes, com exceção da cobertura.

4.5 Descrição do modelo de simulação

Simulou-se somente uma sala de aula ao invés da edificação completa como forma de simplificar a análise de desempenho térmico da cobertura e ela representa uma única zona térmica.

A planta do pavimento superior (Figura 43) mostra que todas as salas de aula são envolvidas por pátios e nas extremidades de cada bloco há sanitários e, no caso do bloco que abriga a sala escolhida, há um ambiente de uso eventual. Isso faz com que a sala não receba radiação solar direta em sua extremidade voltada para o Nordeste e os fundos. O sombreamento nas laterais ao noroeste é promovido pelo pergolado e ao sudeste promovido pelos corredores (Figura 44). A fachada sul gera auto sombreamento ainda no período da manhã.

Figura 43 - Planta pavimento superior do Liceu Francês de Brasília. Em destaque, (contorno azul) o bloco da sala de aula escolhida. Sem escala.



Fonte: Página do Archdaily. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/919735/liceu-frances-francois-mitterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus/5d120c17284dd12f3b0000c8-liceu-frances-francois-mitterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus-planta-pavimento-superior>. Acesso: 20/10/2022.

Legenda:

1: Praça superior; 2: Laboratório de tecnologia; 3: Laboratório de biologia; 4: Sala de artes; 5: Área técnica; 6: Jardim educativo; 7: Sala de aula; 10: Cobertura sombreada (pergolado); a: sala de grupos; b: sanitários; c: depósito de material; d: sala de computadores/ filme.

Figura 44 - Ampliação do bloco em estudo



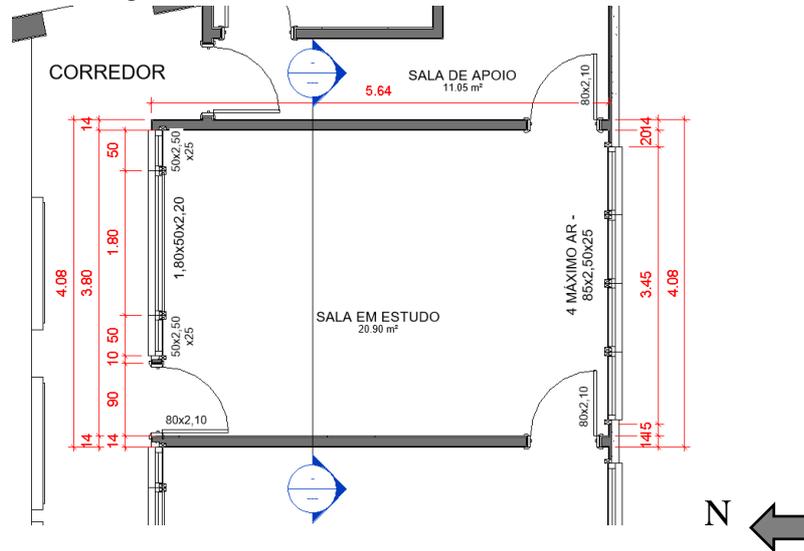
Fonte: Página do Archdaily. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/919735/liceu-frances-francois-miterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus/5d120c17284dd12f3b0000c8-liceu-frances-francois-miterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus-planta-pavimento-superior>. Acesso: 20/10/2022.

A sala de aula padrão definida para compor a simulação (Figura 45) está orientada ao norte (considerando a porta de acesso voltada para o corredor) e tem as dimensões de 7,00 x 6,00m, pé-direito de 2,80m e pé-esquerdo de 3,60m, resultando em uma camada de ar de 0,55m de espessura entre a laje de cobertura e o forro acústico (Figura 46). O ambiente que possui a envoltória mais exposta à radiação solar direta não tem ocupação de sala de aula, funcionando como apoio às atividades acadêmicas, por isso não foi escolhido. O piso é em concreto armado com revestimento vinílico, cobertura em laje plana com 12 centímetros de espessura, com impermeabilização mecânica e o teto verde extensivo implantado sobre ela. As paredes são de bloco de concreto de 14 cm de espessura. Há três portas de madeira, sendo uma que liga o corredor à sala e as outras duas que conectam às salas vizinhas com dimensões 0,80x2,50m. As janelas estão presentes nos dois lados do ambiente e ocupam quase que toda a extensão das paredes (Figura 48), sendo uma sequência de 3,50 metros de comprimento voltada para a orientação sul (altura de 2,25m e peitoril de 0,25m) e a outra sequência voltada para o norte (com duas janelas com 0,50m de largura, altura de 2,50m e peitoril de 0,25m e outra janela com 1,80m de comprimento, 0,50m de altura e 1,80 de peitoril), com folhas de vidro incolor de 4mm

de espessura com caixilhos metálicos de cor branca. Os revestimentos das superfícies não foram considerados para simplificar o estudo, exceto o telhado verde existente.

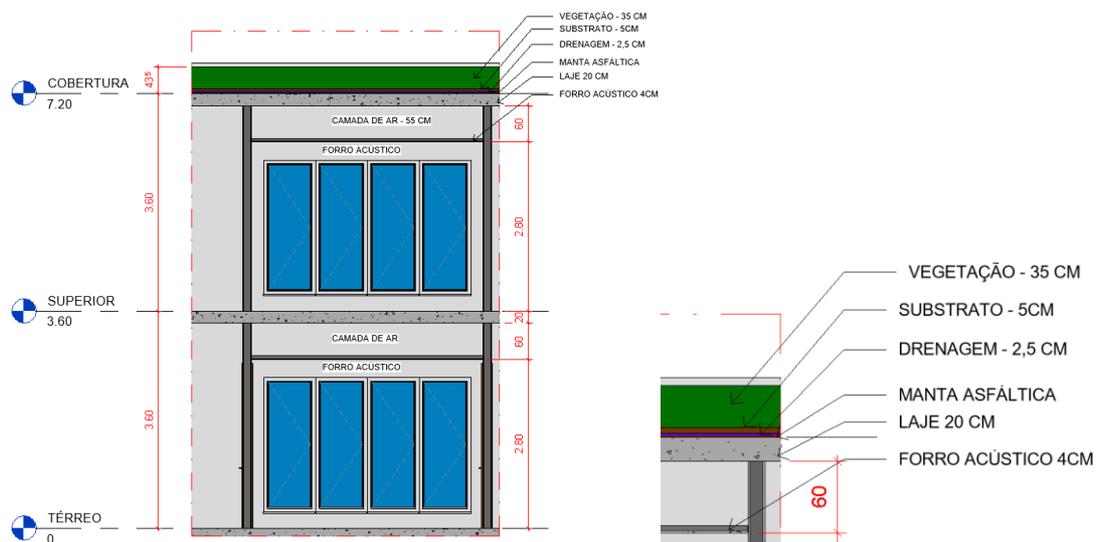
A fachada externa do bloco onde a sala de aula está inserida pode ser entendida na figura 47.

Figura 45 – Sala de aula em estudo



Fonte: Autora, 2022.

Figura 46 – Corte esquemático da sala e sua cobertura verde.



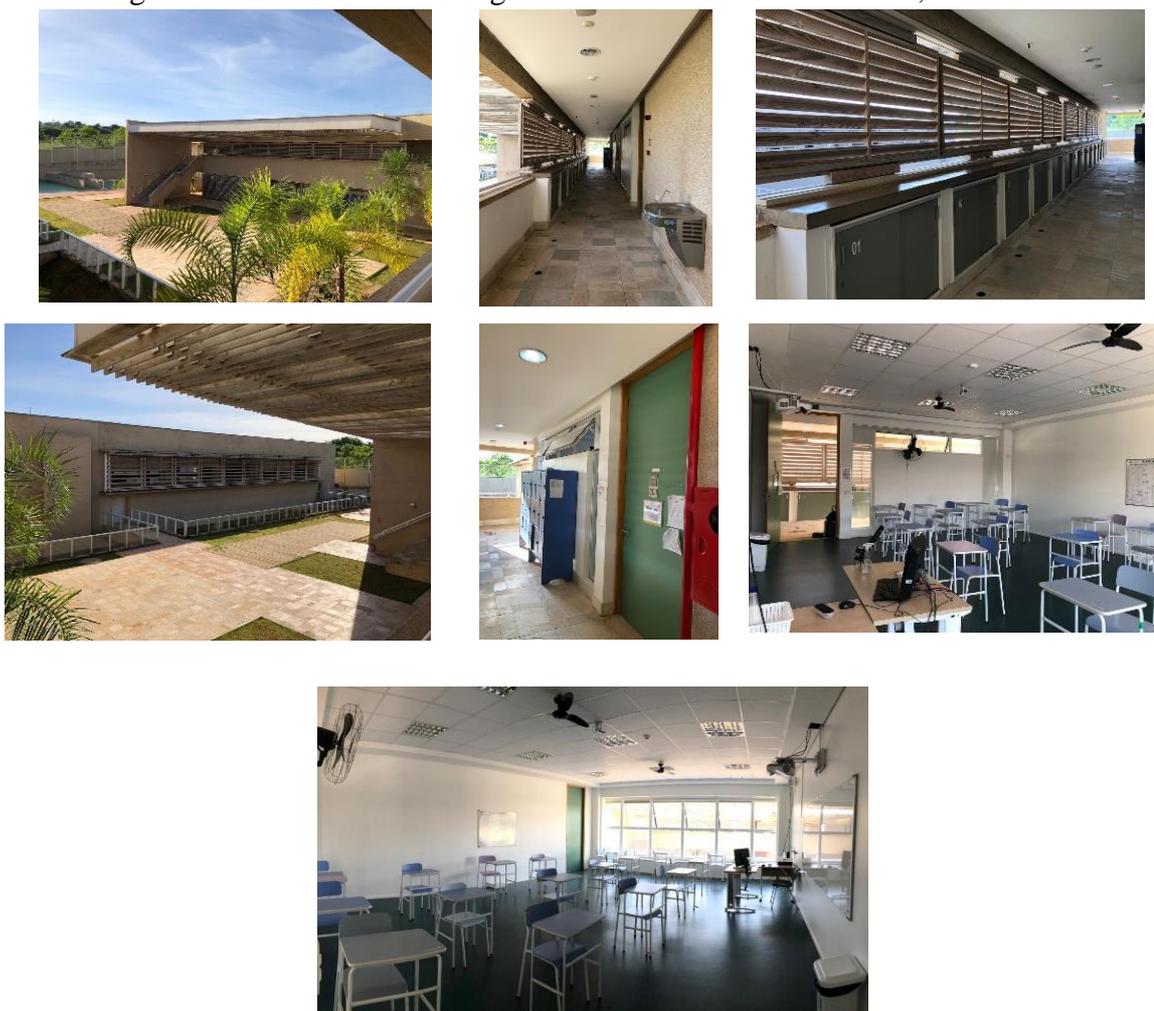
Fonte: Autora, 2022.

Figura 47 – Configuração arquitetônica externa do bloco da sala de aula em estudo composta por brises e beirais generosos. Fachada leste.



Fonte: Fonte: Página do Archdaily. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/919735/liceu-francois-francois-mitterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus/5d120c17284dd12f3b0000c8-liceu-francois-francois-mitterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus-planta-pavimento-superior>. Acesso: 20/10/2022.

Figura 48- Levantamento fotográfico da sala de aula em estudo, sala F203.

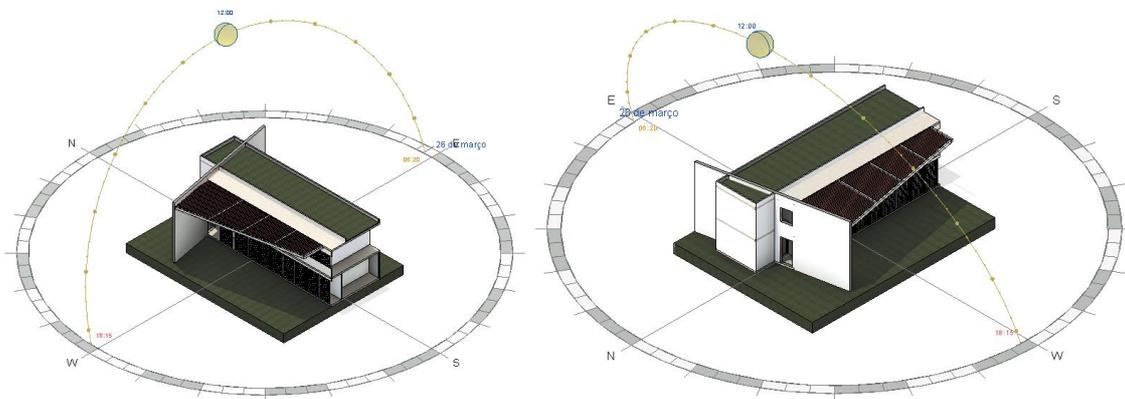




Fonte: Autora, 2022.

A exposição da cobertura à radiação solar para o bloco educacional em estudo foi representada na trajetória solar (Figura 49), para o dia em que as medições no local foram feitas.

Figura 49 – Trajetória solar no dia 26 de março de 2022.



Fonte: Autora, 2022.

O teto verde é do tipo extensivo térmico com base composta por laje e manta asfáltica. A vegetação predominante é a espécie *callisia repens* (Figura 50), plantada por meio do cultivo modular (a peça pode ser removida com a vegetação) feito com composto orgânico de 5 centímetros de espessura. A espécie considerada uma suculenta, também conhecida como dinheiro-em-penca, possui folhas brilhantes e enceradas em formato oval acuminadas na cor verde claro. Elas não são resistentes à pisoteio e são consideradas excelentes para cobertura vegetal devido ao seu porte rasteiro, boa ramificação e baixo consumo hídrico.

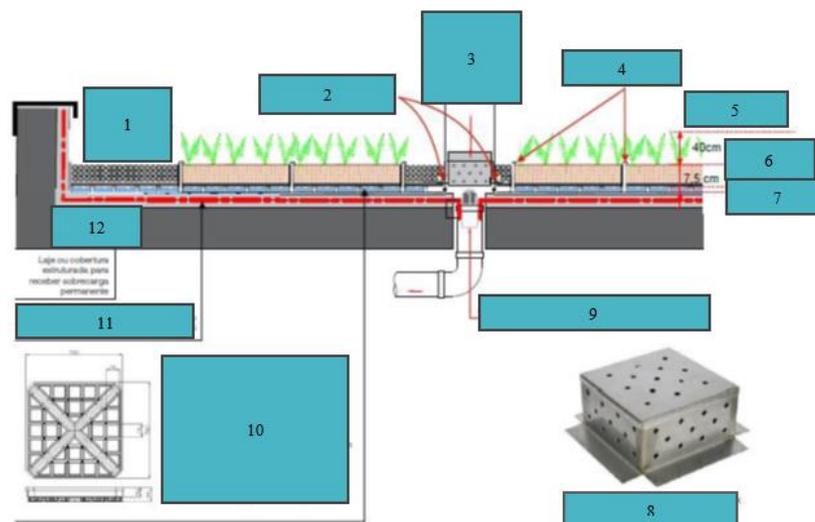
Figura 50 – Cobertura verde no dia das medições de temperatura do ar e umidade.



Fonte: Autora, 2022.

O peso da cobertura seca é de $40\text{kg}/\text{m}^2$ e saturada é de $80\text{kg}/\text{m}^2$. O sistema da irrigação é o gotejo superficial automatizado. O esquema de drenagem da cobertura vegetal pode ser mais bem entendido na Figura 51, onde todas as camadas estão ilustradas.

Figura 51 - Desenho esquemático do sistema de drenagem da cobertura verde em estudo



Fonte: Instituto Cidade Jardim (2019, p. 32)

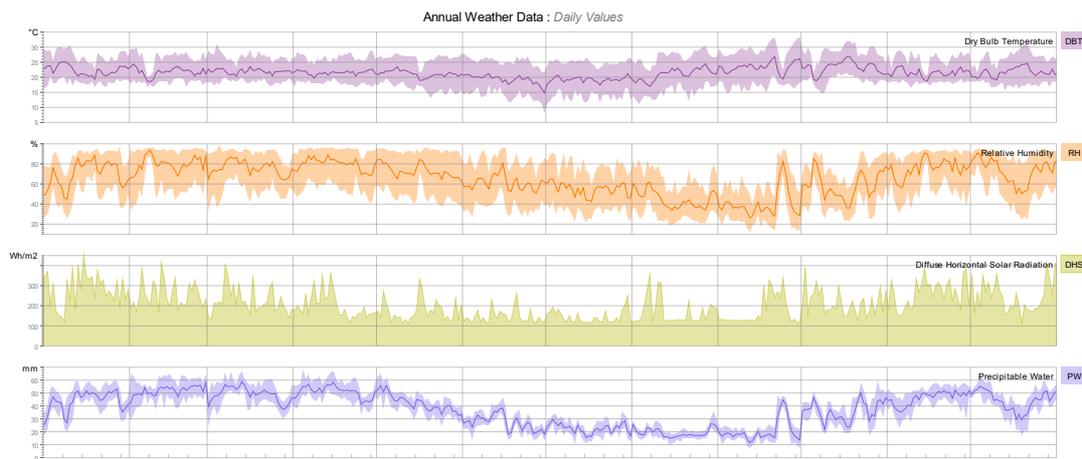
4.6 Utilização do arquivo climático de Brasília

Os arquivos climáticos necessários para as simulações no *EnergyPlus*, são dados meteorológicos e de radiação solar organizados e registrados por instituições competentes. No Brasil, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponibiliza e atualiza essas informações. Outra fonte segura de arquivos climáticos é o *Climate.OneBuilding.Org*. Os

arquivos climáticos brasileiros mais atualizados estão disponíveis no site do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações e serão utilizados nesta pesquisa⁹.

Uma simulação do arquivo climático de Brasília foi realizada para obter dados de saída com o indicativo das temperaturas do ar e radiação solar incidente média (média horária), além da umidade relativa do ar e precipitação (média diária)

Figura 52 – Valores para temperatura, umidade, radiação e precipitação para o arquivo climático de Brasília.



Fonte: - 2D Data View (drajmarsh.bitbucket.io)

Quadro 16 - Resumo dos valores encontrados no arquivo climático de Brasília

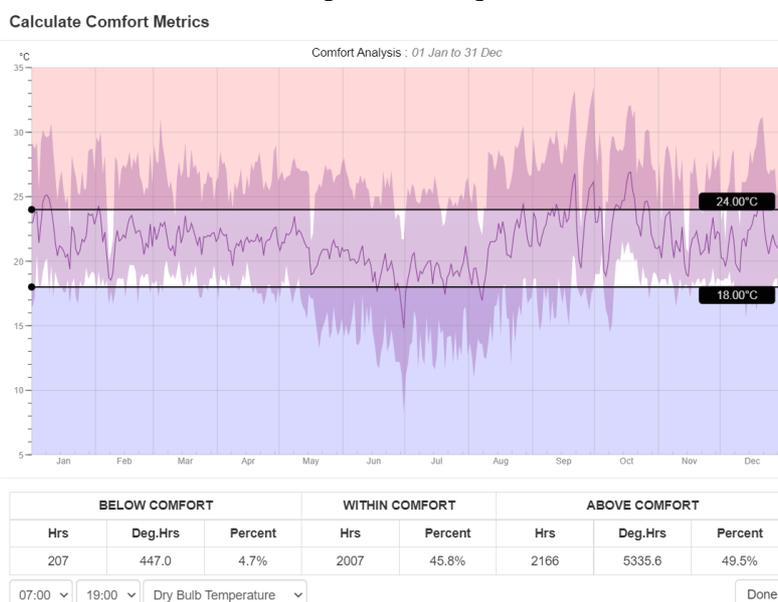
Dados do arquivo climático de Brasília	Valores
Temperatura máxima (°C)	32,5
Temperatura media (°C)	21,1
Temperatura minima (°C)	11,3
Umidade relativa máxima (%)	97
Umidade relativa media (%)	66
Umidade relativa minima (%)	17
Precipitação Pluviométrica (mm. ano)	1093
Radiação solar incidente (kW/m². ano)	1465
Velocidade média dos ventos (m/s)	1,3

Fonte: Fonte: BEYER, 2008, p. 7 e SILVA, 2014, p. 10.

⁹ No site, o arquivo climático INMET 2018 traz correções no cálculo de nebulosidade feito pela equipe do laboratório e com Dru Crawley e Linda Lawrie (*Climate.OneBuilding.Org*). Os arquivos apresentam em seu conteúdo um ano meteorológico com comportamento baseado em observações reais que correspondem aos meses-padrão e índices pluviométricos das cidades

O percentual de horas de conforto para o clima de Brasília é de 45,8% (Figura 52) para o período entre as 07:00 e as 19:00, horário de maior permanência de alunos na escola. Especialmente na estação seca, o desconforto por calor acontece geralmente entre agosto e outubro e representa 49,5% das horas para o mesmo intervalo de permanência. Na estação chuvosa também pode ocorrer desconforto por calor, entre os meses de janeiro e fevereiro. O desconforto por frio ocorre na estação seca, entre junho e julho, com temperaturas mínimas registradas na madrugada e início da manhã, e, portanto, não representa uma demanda por aquecimento nas edificações, com apenas 4,7% de horas de desconforto.

Figura 53 – Análise de conforto a partir do arquivo climático de Brasília



Fonte: - 2D Data View (drajmarsh.bitbucket.io)

4.7 Validação do Modelo

O quadro 17 apresenta os dados das medições no local realizadas no dia 26 de março de 2022 para temperatura e umidade relativa do ar da sala F 203 e seu respectivo telhado verde. O instrumento utilizado foi o termo-higro-sonômetro-luxímetro digital portátil modelo THDL-400. A calibração foi realizada pelo método de verificação de incertezas dos sensores de temperatura. Pretende-se avaliar o modelo utilizado para a simulação da sala de aula com o intuito de verificar o quão próximo da realidade o modelo se encontra, comparando os dados medidos com os dados simulados. Vale destacar que o horário das medições não seguiu o ideal para estudos em inversão térmica (09:00, 15:00 e 21:00) pois não seria possível acessar o

colégio no período noturno. Ademais, a medição foi feita somente em um dia para ter uma referência para a calibração do modelo, além do arquivo climático utilizado

Tabela 01 – Medição local

HORA	TEMPERATURAS °C					UMIDADE %			
	AI h= 1,70	AI Forro h= 2,80	AE no telhado	SF	SB	Sala	AE	SF	SB
07:45	24,5	25,4	28,2	33,3	23,0	76,5	59,0	59,0	48,2
12:30	28,7	28,0	31,8	43,3	31,8	54,1	29,3	28,5	29,3
17:45	28,1	28,0	27,8	27,4	27,7	52,8	53,9	53,9	53,0

Legenda:

AI: Ar interno AE: Ar externo
SF: superfície foliar SB: substrato

Fonte: Autora, 2022.

Para tanto, foram substituídos dados do arquivo climático de Brasília, relativos à temperatura ambiente exterior, medidas experimentalmente pela autora. Os demais dados foram mantidos. A temperatura do ambiente externo é substituída de modo simples, enquanto a radiação solar é mais complexa pois o *EnergyPlus* utiliza nas simulações a radiação difusa em plano horizontal e a radiação direta normal.)¹⁰:

A radiação difusa horizontal foi considerada a registrada no arquivo climático de Brasília e para a radiação direta normal foi utilizada a equação do mesmo documento (*Auxiliary EnergyPlus Program, 2022, p.36*)

Radiação dir. normal = rad. dir. horiz.

$$\sin(a)$$

onde: (a) é o ângulo de altitude solar (calculado pelo EP) e disponível para *output*.

A validação do modelo da sala de aula analisa e compara três parâmetros para as estações seca e chuvosa, com o intuito de se obter uma melhor compreensão da sensibilidade dos principais parâmetros do modelo:

- Temperatura interna do ar;

¹⁰ Radiação glob. horiz. = radiação dir. horiz. + radiação dif. horiz. Numa medição bem apurada (este dado não foi coletado no local) a radiação global é medida no plano horizontal e pode ser definida pela equação contida no *Auxiliary EnergyPlus Program (2022)*

- Temperatura superficial do forro;
- Temperatura externa do ar.

O balanço hídrico da cobertura verde considerou somente a precipitação contida no arquivo climático pois a rotina de irrigação adotada pela escola não ficou clara. A ausência de irrigação elimina a influência do fator climático sobre o desempenho da cobertura, como demonstrado pelos estudos de Zinzi e Agnoli (2012).

Para obter uma análise comparativa com outros tipos de cobertura foi simulado uma configuração de cobertura em fibrocimento com acabamento natural e outra com telha de fibrocimento pintada de branco.

Algumas janelas do software *EnergyPlus* estão descritas no Apêndice 1 para melhorar o entendimento de como os dados são inseridos, a partir da documentação do programa disponibilizada pelos desenvolvedores como o *Engeneering Reference* (2022) e o *EnergyPlus Input Output References* (2022). Somente os parâmetros mais relevantes foram preenchidos nas simulações aqui apresentadas por não serem considerados primordiais para o estudo proposto e outros que, por padrão, são preenchidos automaticamente sem prejuízo para os resultados. Assim, somente o conjunto de parâmetros que efetivamente foram editados e preenchidos são referidos no apêndice.

Os *outputs* gerados pela simulação representam nove itens que foram utilizados e analisados na pesquisa de acordo com o propósito da investigação, a saber: temperatura interna do ar (C°) – *zone mean air temperature*, temperatura externa do ar (C°) - *site outdoor air drybulb temperature*, temperatura superficial interior (C°) - *surface inside face temperature* (temperatura superficial interna), *green roof soil temperature* (temperatura da superfície do solo da cobertura verde)

5 SIMULAÇÕES DOS CENÁRIOS

A análise de resultados pretende compreender os efeitos que o clima exerce sobre o desempenho térmico da cobertura verde na sala de aula em estudo.

Os *outputs*, ou variáveis de saída, demonstram os processos de transferência de calor e massa e o desempenho térmico para o clima de Brasília. Os resultados da cobertura verde foram comparados ao desempenho das coberturas de fibrocimento com acabamento natural e pintado de branco. A temperatura superficial interna e externa, cargas térmicas ideais e os fluxos de calor com suas respectivas parcelas do balanço térmico foram analisadas. A análise de

resultados foi baseada em *outputs* de cargas térmicas para a demanda de resfriamento com a análise do balanço térmico da superfície da cobertura.

As variáveis que representam a cobertura verde, o fibrocimento natural e a versão pintada de branco estão ilustradas nos quadros 18 e 19.

Quadro 18 - Balanço térmico da cobertura verde

Balanço térmico da cobertura verde	Variável correspondente (<i>EnergyPlus output</i>)
Radiação Solar Incidente	<i>Surface Outside Face Incident Solar Radiation</i>
Radiação Emitida (Substrato)	* Não Disponível (Cálculo Analítico) – Apêndice II
Radiação Emitida (Vegetação)	* Não Disponível (Cálculo Analítico) – Apêndice II
Radiação Trocada (Substrato / Vegetação)	* Não Disponível (Cálculo Analítico) – Apêndice II
Convecção (Substrato)*	<i>Green Roof Soil Sensible Heat Transfer Rate</i>
Convecção (Vegetação)*	<i>Green Roof Vegetation Sensible Heat Transfer Rate</i>
Evaporação	<i>Green Roof Soil Latent Heat Transfer Rate</i>
Evapotranspiração	<i>Green Roof Vegetation Latent Heat Transfer Rate</i>
Condução	<i>Surface Inside Face Conduction Heat Transfer Rate</i>
Calor Armazenado na Estrutura	<i>Surface Heat Storage Rate</i>
Precipitação	<i>Green Roof Current Precipitation Depth</i>
Temperatura do Substrato	<i>Green Roof Soil Temperature</i>
Temperatura da Vegetação	<i>Green Roof Vegetation Temperature</i>
Temperatura da Face Interna da Laje	<i>Surface Inside Face Temperature</i>

Fonte: EnergyPlus 2022.

Quadro 19 - Balanço térmico da cobertura de fibrocimento e laje impermeabilizada

Balanço térmico da cobertura de fibrocimento e laje impermeabilizada	Variável correspondente (<i>EnergyPlus output</i>)
Radiação Solar Incidente	<i>Surface Outside Face Incident Solar Radiation Rate</i>
Radiação Solar Refletida	$(1 - \alpha) \times \text{Surface Outside Face Solar Radiation Heat Gain Rate}$
Radiação Emitida	<i>Surface Outside Face Net Thermal Radiation Heat Gain Rate</i>
Convecção na Superfície Externa	<i>Surface Outside Face Convection Heat Gain Rate</i>
Condução através da Laje	<i>Surface Inside Face Conduction Heat Transfer Rate</i>
Calor Armazenado na Estrutura	<i>Surface Heat Storage Rate</i>
Temperatura da Superfície Externa	<i>Surface Outside Face Temperature</i>
Temperatura do forro	<i>Surface Inside Face Temperature</i>

Fonte: EnergyPlus 2022

Quadro 20 - Cargas térmicas ideais a partir de cargas fixas

Cargas térmicas ideais a partir de cargas fixas	Variável correspondente
Carga térmica de resfriamento	<i>Zone ideal loads zone total cooling rate</i>
Carga térmica de aquecimento	<i>Zone ideal loads zone total heating rate</i>

Fonte: EnergyPlus 2022.

A variável de saída gerada pelo modelo chamada “troca de calor sensível” não contempla as trocas sensíveis por radiação e por isso foi feito o cálculo analítico delas com o uso de variáveis compatíveis a essas trocas geradas pelo *EnergyPlus*. O cálculo é apresentado no apêndice 2.

5.1.1 Resumo do método

Foram realizadas as simulações computacionais e as análises estatísticas com os cenários de cobertura verde extensiva, cobertura de fibrocimento com acabamento natural e fibrocimento pintado de branco. As análises se estruturaram em processamento, interpretação e apresentação de variáveis de saída disponibilizadas pelo software (e algumas calculadas separadamente). Os dados gerados, processados e analisados dentre os resultados formam a base para as discussões no capítulo 6.

5.1.2 Telhado verde extensivo modular

A primeira etapa simula o teto verde na sua condição original sem variação de nenhum parâmetro, utilizando o modelo para coberturas verdes presente no *EnergyPlus* com definições para as camadas de substrato e da vegetação. As demais camadas são representadas no campo materiais do programa com a criação de um material filtrante, um drenante e outro impermeabilizante (ver apêndice I).

5.1.3 Telha fibrocimento acabamento natural

Este cenário é composto por telha de fibrocimento e uma câmara de ar sem ventilação entre a laje de cobertura e a telha. A absorvância solar do fibrocimento natural é de 0,75, a emissividade é 0,9 e a câmara de ar corresponde ao valor de fluxo descendente pois no *Energy Plus* não é possível configurar valores diferentes para fluxo ascendente e descendente

5.1.4 Telha fibrocimento com pintura branca

Esta cobertura repete as configurações da telha de fibrocimento natural com a alteração do valor da absorvância solar de 0,75 para 0,2 como forma de representar a pintura branca na face externa da cobertura.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram analisados os três casos de simulação da cobertura para o entendimento do desempenho térmico e fluxos de calor para cada configuração de telhado, com a comparação da cobertura verde extensiva ao telhado de fibrocimento natural e ao fibrocimento pintado de branco, totalizando nove simulações que comparam as três tipologias no período seco e no período chuvoso.

Primeiramente foi feita uma análise comparativa da cobertura verde existente e a cobertura de fibrocimento natural e fibrocimento pintado de branco considerando uma laje de 12 cm de espessura e câmara de ar entre as placas do telhado verde extensivo. Foram representados valores para as cargas térmicas totais de resfriamento e aquecimento integrados para um ano de simulação, contendo os três cenários de cobertura, conforme tabela 2 e 3.

Tabela 2 - Comparação de desempenho térmico entre cobertura verde e fibrocimento

Desempenho térmico anual para Cobertura verde (CV) e Cobertura em Fibrocimento (CF)			
Carga térmica (kWh/ m ²)	Resfriamento	Aquecimento	Total
CV	4,6	0,1	4,7
CF	60,3	18,3	78,6
Economia	88%	100%	95%

Fonte: Autora, 2022.

Tabela 3 - Comparação de desempenho térmico entre cobertura verde e fibrocimento branco

Desempenho térmico anual para Cobertura verde (CV) e Cobertura em Fibrocimento Branco (CFB)			
Carga térmica (kWh/ m ²)	Resfriamento	Aquecimento	Total
CV	4,6	0,1	4,7
CFB	2,6	42,9	45,5
Economia	-44%	100%	86%

Fonte: Autora, 2022.

As três coberturas em estudo apresentaram desempenhos bastante distintos (Tabela 3). O melhor desempenho térmico foi o telhado com a cobertura verde extensiva, com 4,6 kWh/m² de demanda de resfriamento, quase nada para aquecimento (0,1 kWh/m²) com total de 4,7 kWh/m². O valor representa reduções significativas de 95% de 90%, se comparados os desempenhos das coberturas em fibrocimento natural (78,6 kWh/m²) e pintado de branco (45,5 kWh/m²) respectivamente.

Tabela 4 - Cargas térmicas ideais

Cargas térmicas ideais							
	Horas de resfriamento	% horas simuladas	Pico de resfriamento (W/m ²)	Horas de aquecimento	% de horas simuladas	Pico de aquecimento (W/m ²)	Total (% horas simuladas)
Cobertura verde	4121	47	4,2	241	3	1,8	50
Fibrocimento natural	4388	50	54,4	3363	38	19,6	88
Fibrocimento pintura branca	936	11	11,3	6227	71	21,9	82

Fonte: Autora, 2022.

O fato de Brasília ter duas estações bem definidas, uma estação quente seca e outra quente e úmida, com elevada amplitude térmica nas madrugadas do período seco, fez com que a cobertura verde apresentasse uma performance boa tanto para as demandas de resfriamento como para aquecimento se comparada à cobertura de fibrocimento. A cobertura pintada de branco indicou altas cargas térmicas para aquecimento (42,9 kWh/m²) fato que se relaciona diretamente ao resfriamento radiante noturno e à alta refletância solar do material. Contudo, pelo horário de funcionamento do estabelecimento essa demanda não precisa ser atendida.

Para aquecimento foram poucas horas com essa necessidade, 3%, e por comparação, menos horas de resfriamento que a cobertura em fibrocimento natural (48% para 55%). Os picos de demanda de cargas térmicas ideais foram baixos para a cobertura verde em comparação aos dois tipos de fibrocimento, 4,7 Wh/m² para resfriamento e 1,8 Wh/m² para aquecimento. O fibrocimento natural apontou valores bem mais altos: 54,4 Wh/m² para resfriamento e 19,6 Wh/m² para aquecimento. O pico de demanda de resfriamento para o fibrocimento pintado de branco foi de 11,3 Wh/m² e de aquecimento 21,9 Wh/m², sendo o mais alto entre as três coberturas. O resumo dos resultados pode ser visto na tabela 5.

Tabela 5 - Desempenho térmico anual para as três coberturas simuladas

Desempenho térmico anual para Cobertura verde (CV), Cobertura em Fibrocimento (CF) e Cobertura em Fibrocimento Branco (CFB)				
Carga térmica (kWh/ m ²)	Resfriamento	Aquecimento	Total	Economia comparada ao fibrocimento
CV	4,6	0,1	4,7	90%
CF	60,3	18,3	78,6	0%
CFB	2,6	42,9	45,5	38%

Fonte: Autora (2022)

Após a análise dos resultados de cargas térmicas ideais integradas dentro de um ano, foram analisadas as variáveis de saída diretamente relacionadas aos elementos do balanço térmico e os fluxos que acontecem na cobertura que determinam seu desempenho térmico, apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Resultado do Balanço térmico das três coberturas e seus componentes
Balanço de calor anual – interface externa e fluxo de calor através da cobertura

		Cobertura verde (CV)			Cobertura Fibrocimento (CF)		Cobertura Fibrocimento pintado de branco (CFB)	
Parcelas do balanço de calor	Interface	kWh/m ² . ano	Total	Total (%)	kWh/m ² . ano	Total (%)	kWh/m ² . ano	Total (%)
Radiação solar absorvida	externa	1100	-	100	1100	100	298	100
Trocas por radiação	Solo	-199	-441	-23	-682	-67	-372	-130
	Veg.	-321	-	-33	-	-	-	-
Reflexões múltiplas	(S; V)	79	-	12	-	-	-	-
Trocas sensíveis	(S)	-98	-175	-13	-387	-40	39	16
	(V)	-82	-	12	-	-	-	-
Trocas latentes	(S)	-256	-746	-68	-	-	-	-
	(V)	-495	-	-50	-	-	-	-
Condução	Zona	4	-	0	45	5	-40	-19
Fluxo resultante	-	-1348	-	-127	-1100	100	-298	100
Incorporado ao balanço*	Externa	249	-	27	-	-	-	-
*CT: carga térmica S: solo V vegetação								
CT resfriamento	Zona	4		0	64	6	3	1
CT Aquecimento	Zona	0		0	23	3	47	19

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

A cobertura verde do Liceu de Brasília faz com que a 40% da radiação solar incidente seja perdida por meio das trocas por radiação de ondas longas, representando 441 kWh/m². ano. No cenário com a cobertura de fibrocimento o valor é mais alto, 682 kWh/m². ano de perdas, representando 62% da radiação absorvida. O fibrocimento pintado de branco perdeu 372 kWh/m². ano por radiação, que representa 33%, o que significou a retirada de calor por condução (45 kWh/m²) por meio da laje. Este resultado aponta a necessidade de cargas térmicas

para aquecimento para a sala de aula, significando um resultado “ruim” se comparado ao desempenho da cobertura verde.

As trocas por convecção foram menores para a cobertura verde se comparada à cobertura de fibrocimento, 175 kWh/m². ano e 387 kWh/m². ano, respectivamente, representando 20% e 39% do total absorvido por radiação solar.

Na cobertura verde observou-se um total de 746 kWh/m².ano de radiação absorvida, correspondendo a 69%. Para um balanço térmico equilibrado, que possui 27% de radiação absorvida pelo sistema, tem-se 249kWh/m².ano incorporados ao balanço térmico por meio dos processos de evapotranspiração do solo e da vegetação. A baixa umidade relativa do ar faz com que aconteça em maior grau a transferência de umidade do estômato da planta para o ar externo, além de aumentar a evaporação da umidade do substrato.

A análise do balanço térmico para um dia específico (06/09) - onde houve uma maior carga térmica de resfriamento) foi feita com o intuito de entender o comportamento dos fluxos de calor e temperaturas superficiais. Os dias mais quentes do ano registrados em fevereiro e setembro (quadro 21) apresentaram temperaturas muito parecidas, porém com umidade relativa do ar, precipitação e radiação solar incidente bastante distintos, o que refletiu em cargas térmicas de aquecimento para as duas tipologias de fibrocimento.

Quadro 21– Dados meteorológicos dos períodos selecionados em fevereiro e setembro

Brasília		
Data	03 a 07/02	09 a 13/09
temperatura do ar máx. (°C)	30,6	32,5
temperatura do ar méd. (°C)	24,3	25,1
temperatura do ar min. (°C)	18,6	17,1
umidade relativa máx. (%)	88,5	76,0
umidade relativa média (%)	59,6	40,1
umidade relativa mín. (%)	25,0	17,5
velocidade do vento máx. (m/s)	2,6	2,7
velocidade do vento méd. (m/s)	1,2	0,9
velocidade do vento min. (m/s)	0,2	0
precipitação (mm)	0,004	0
radiação solar incidente (W/m ²)	29706	21316

Fonte: Autora, 2022

As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados de desempenho térmico das três coberturas com destaque para as cargas térmicas de resfriamento da cobertura verde e da demanda por aquecimento para as duas versões da cobertura de fibrocimento.

Tabela 7 - Carga térmica da cobertura verde e fibrocimento natural para os períodos de fevereiro e setembro

Carga térmica (Wh/m ²)					
Período	Cobertura verde (resfriamento)	Fibrocimento natural (resfriamento)	Fibrocimento natural (aquecimento)	Fibrocimento natural (total)	Economia verde X fibrocimento natural
03 a 07/02	180	1939	33	1792	91%
09 a 13/09	357	1343	62	1411	75%

Fonte: Autora, 2022.

Tabela 8 - Carga térmica da cobertura verde e fibrocimento pintado de branco para os períodos de fevereiro e setembro

Carga térmica (Wh/m ²)					
Período	Cobertura verde (resfriamento)	Fibrocimento pintado (resfriamento)	Fibrocimento pintado (aquecimento)	Fibrocimento pintado (total)	Economia verde X fibrocimento pintado
03 a 07/02	175	264	171	440	60%
09 a 13/09	362	138	215	358	1%

Fonte: Autora, 2022.

O mês de fevereiro mostra resultados menores e conseqüentemente, menor amplitude para temperaturas máxima e mínima e uma média menor que o período de setembro (24,3 °C para 25,1 °C). O mês de fevereiro apresentou radiação incidente, precipitação e umidade relativa do ar maiores, o que já era esperado por ser verão, com chuvas mais frequentes do que o ocorre em setembro.

Sobre as cargas térmicas totais dos dois períodos, vê-se que a cobertura em fibrocimento natural indica demanda alta de cargas térmicas. O melhor desempenho é percebido no período seco (1411 kWh/m²), representando 71 % das cargas térmicas totais se comparado ao período mais úmido (1977 kWh/m²). A cobertura verde mostra um resultado oposto a este, com um desempenho de 180 kWh/m² e percentual de 49% para as cargas térmicas totais no período mais seco, sendo 362 kWh/m².

Em fevereiro, período mais úmido, a comparação entre as coberturas verde e de fibrocimento natural mostraram uma redução de 91% das cargas térmicas totais (1792 kWh/m²) quando utilizada a cobertura de fibrocimento natural. Para o período seco a redução foi 25% menor utilizando a cobertura verde, resultado que pode ser entendido como a influência da umidade presente no substrato e a umidade do ar. Porém, os índices de radiação solar são menores para este período, resultando menores trocas térmicas na evapotranspiração.

A cobertura de fibrocimento pintada de branco teve desempenho térmico de 440 kWh/m², um desempenho 60% pior que a cobertura verde no verão. Na seca o resultado é um pouco parecido, 358 kWh/m². Nos períodos seco e chuvoso a cobertura pintada de branco indica demandas por aquecimento e resfriamento, 45kWh/m² em fevereiro e 67 kWh/m², respectivamente. A Tabela 9 mostra os resultados das variáveis que fizeram parte das análises nos dois períodos em estudo. A cobertura de fibrocimento pintada de branco apresentou valores maiores para resfriamento no verão e para aquecimento no inverno, porém com médias mais baixas se comparadas à cobertura verde.

Tabela 9 - Temperaturas superficiais (valores máximos, médios e mínimos), cargas térmicas e calor acumulado para os períodos de fevereiro e setembro

Legenda: CV – Cobertura verde FC – Fibrocimento natural FCB – fibrocimento pintado de branco		Período					
		03 a 07/02			09 a 13/09		
Variável	Cobertura	Máx.	Méd.	Mín.	Máx.	Méd.	Mín.
Temperatura do ar externo (°C)	----	30,65	24,28	18,55	32,45	25,07	17,15
Temperatura da vegetação (°C)	CV	41,04	27,21	19,08	58,05	31,48	17,32
Temperatura do substrato (°C)	CV	52,70	30,31	20,68	57,32	32,66	19,25
Temperatura superficial externa (°C)	FC	68,42	34,39	17,45	64,63	31,40	15,18
	FCB	38,80	25,72	17,04	37,47	24,58	14,75
Temperatura superficial interna (°C)	CV	26,91	26,55	26,17	27,17	26,98	26,81
	FC	36,76	28,97	22,93	34,82	27,89	22,07
	FCB	28,87	25,35	22,17	28,38	24,86	21,35
Carga térmica de resfriamento (Wh/m ²)	CV	3,72	2,48	0,32	4,69	3,99	3,35
	FC	54,88	17,18	0	43,36	12,21	0
	FCB	11,80	3,22	0	9,57	2,17	0
Carga térmica de aquecimento (Wh/m ²)	FC	4,0	0,29	0	9,07	0,54	0
	FCB	8,62	2,45	0	13,00	2,79	0
Calor armazenado (W/m ²)	CV	96,56	2,75	-74,31	114,33	-0,60	-50,79
	FC	143,82	0,31	-96,28	115,48	-0,31	-73,71
	FCB	53,70	0,39	-38,41	54,16	-0,22	-26,78

Fonte: Autora, 2022

A umidade relativa do ar exerce influência na temperatura para os dois períodos em estudo. No período úmido a cobertura de fibrocimento consegue atingir temperaturas menores que o substrato da cobertura verde, uma diferença de 3,1 °C. Se comparada à vegetação essa diferença é de 7,2 °C. O resfriamento evaporativo que ocorre devido à transpiração da vegetação sob alta radiação solar incidente e a umidade presente no substrato moldam esse resultado, gerando uma diferença entre as médias das temperaturas do solo e da vegetação de 4,1 °C.

No período seco tais diferenças não representam mais que 1,2 °C com a temperatura do solo e da vegetação sempre parecidas com a superfície da cobertura em fibrocimento. Neste cenário a cobertura verde tem um melhor desempenho devido à sua inércia composta pelo sombreamento promovido pela vegetação e o isolamento criado pelo substrato. O fibrocimento pintado de branco mostrou temperaturas superficiais quase sempre menores que a temperatura ambiente, com valores mais elevados somente no período úmido, em curtos períodos do dia. No período seco o comportamento térmico desta tipologia foi praticamente idêntico ao período úmido.

A temperatura da superfície interna das coberturas para os períodos em estudo aponta valores estáveis para a tipologia verde (26,5 e 26 °C). O fibrocimento apresenta variações ao longo do dia com temperatura de até 39,7°C no período úmido, valor mais elevado que a temperatura externa. A cobertura pintada de branco mostra uma oscilação discreta com temperaturas acima e abaixo dos *setpoints* de condicionamento da zona.

7 CONCLUSÕES

Algumas conclusões, limitações e recomendações para futuros trabalhos são apresentadas neste capítulo.

Os telhados verdes, muitas das vezes tidos como ícones da arquitetura sustentável e sempre associados a um melhor desempenho quando comparados às coberturas convencionais é colocado atualmente como tecnologia que promove a mitigação das ilhas urbanas de calor e esses atributos motivaram a realização da pesquisa.

A simulação do desempenho térmico da cobertura verde existente no Liceu de Brasília e a comparação com as coberturas de fibrocimento natural e fibrocimento pintado de branco tornou possível a compreensão da eficiência energética dessa tipologia para o clima da capital.

Os resultados mostraram que as coberturas verdes extensivas no contexto climático de Brasília, caracterizado como tropical de altitude, possui para o período seco (setembro) e

chuvoso (fevereiro) um balanço térmico bem diferente das coberturas utilizadas no estudo comparativo e a evapotranspiração se mostrou como fator potencializador do isolamento térmico e conseqüente bloqueio dos ganhos de calor pela cobertura.

Os períodos seco e chuvoso de Brasília indicam uma maior demanda por resfriamento e a cobertura verde extensiva é uma alternativa com potencial para diminuição dessas demandas pois apresentou desempenho térmico superior às coberturas de fibrocimento.

A cobertura de fibrocimento com acabamento natural não é um material com bom desempenho térmico para o clima de Brasília, porém as simulações mostraram que a redução da absorvância do fibrocimento natural por meio da aplicação de pintura branca gerou uma redução significativa nos ganhos de calor, além de promover a retirada de calor do edifício.

O trabalho permitiu um melhor entendimento do desempenho térmico das coberturas verdes extensivas, tipologia que pode ser incorporada a edifícios já existentes por sua leveza, praticidade e custo moderado. Da mesma forma, o estudo apontou que o desempenho térmico de uma cobertura de fibrocimento com pintura branca pode significar uma alternativa mais viável economicamente e mais prática de ser executada pensando na melhoria da performance térmica da edificação do que a cobertura verde avaliada.

As limitações do estudo se expressa por sua própria natureza pois a simulação naturalmente carrega imprecisões e demanda por correções para tentar representar fenômenos complexos que acontecem no ambiente construído.

O *EnergyPlus* ainda apresenta vantagens em sua utilização para simular coberturas verdes, principalmente por ser gratuito, porém há muitas limitações na configuração do software como a inércia térmica do substrato e a impossibilidade de definir um valor para a saturação de água nesse meio, seja ela por meio de irrigação ou chuva.

Emular um sistema vivo e dinâmico como as coberturas verdes acaba sendo uma tarefa limitada por si principalmente porque não há muitos dados sobre o metabolismo das plantas mais utilizadas no mercado dos telhados verdes e muito menos estudos considerando o contexto climático e a performance que cada espécie possui.

A sala de aula simulada tentou dentro das possibilidades de o software expressar a realidade da edificação e seu entorno imediato. Contudo, pormenores como as superfícies pavimentadas entre os blocos de sala de aula não puderam ser considerados devido às configurações do *EnergyPlus*. A visita in loco para a realização das medições permitiu uma experiência sensorial da sala de aula que mostrou que o revestimento em pedra aplicado no espaço entre os blocos armazena calor ao longo da manhã e por volta do meio-dia esse calor

começa a ser dissipado e levado pela ação dos ventos para dentro das salas de aula. Essa percepção foi confirmada nas medições de temperatura e por alguns usuários da edificação, indicando que o ganho de calor pela cobertura não é o problema do edifício e sim os ganhos de calor pela ventilação natural. Este aspecto poderia ser corrigido com a troca do revestimento em pedra por uma superfície vegetada, pelos mesmos motivos apontados pelo desempenho térmico da cobertura verde.

A avaliação da contribuição da presença da água no substrato por meio da irrigação não pôde ser realizada pelas limitações do software e por falta de dados da equipe de manutenção do Liceu de Brasília sobre essa variável.

A mudança de tipo de cobertura especulada pela administração do colégio com o argumento de que o telhado verde gera custos altos com manutenção e irrigação demandaria um estudo econômico que considera a economia de energia pela não utilização de condicionamento artificial dos ambientes, a vida útil da cobertura e de todos os sistemas adicionais de uma cobertura convencional, em curto ou longo prazo. O reúso de água para a rega da cobertura verde também poderia ser avaliado para diminuir as despesas. Outra questão a ser investigada seria o uso da grama batatais em vez da suculenta dinheiro-em-penca já que a gramínea sobrevive bem aos períodos de estiagem da capital.

Como recomendações para futuros trabalhos seguem algumas sugestões como o estudo de coberturas verdes extensivas com espécies vegetais naturalmente adaptadas ao clima de Brasília ou nativas do bioma Cerrado e sua comparação com outras tipologias de cobertura como o telhado cerâmico, telha sanduíche e coberturas claras. Como o custo com irrigação acaba sendo um fator limitante ao uso das coberturas verdes, estudos voltados para coberturas sem demanda de irrigação seriam interessantes para embasar tomadas de decisões por parte dos projetistas. Além disso, estudos que possam quantificar os efeitos de evapotranspiração das espécies nos períodos seco e chuvoso, visto que as elevadas temperaturas não ficam limitadas ao verão, seriam muito relevantes e assim poderiam ampliar as possibilidades de ponderação nas decisões de projeto para edificações passivas na capital. Outra recomendação é o estudo da análise do ciclo de vida para compreender a relação custo x benefício das coberturas na construção de novos edifícios ou retrofit de edificações existentes. Importante destacar que o enfoque do estudo apresentado foi a simulação, porém outros trabalhos poderiam complementar a pesquisa apresentada com a realização de medições locais nos períodos analisados para comparar os resultados obtidos na simulação, além da ampliação da abordagem proposta como a verificação dos índices de conforto térmico por meio do Voto Médio Predito (*Predicted Mean*

Vote – PMW) e o de Temperatura Fisiológica Equivalente (*Physiological Equivalent Temperature* - PET).

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- ANDRADE, Paulo César Rodrigues; ROMERO, Marta Adriana Bustos. Análise do desempenho térmico dos materiais superficiais do contexto urbano do SIA/ DF. Paranoá, Brasília, n. 22, p. 51-71, 2018. DOI: 10.18830/issn.1679-0944.n22.2018.04. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/paranoa/article/view/25601>. Acesso em 23 de dezembro d 2021.
- ANDRADE, R. G. C. A contribuição da vegetação para melhoria do microclima urbano: estudo de caso em superquadras de Brasília-DF. 2022. 107f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Programa de Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2022.
- AMBROSINI, D. et al. Evaluating mitigation effects of urban heat islands in a historical small center with the ENVI-Met® climate model. Sustainability, v. 6, n. 10, p. 7013–7029, 10 out. 2014. <http://dx.doi.org/10.3390/su6107013>.
- ARCHDAILY BRASIL. Liceu Francês François Mitterrand. Jean Dubus + José Luiz Tabith" 26 Jun 2019. ArchDaily Brasil. Acessado em 20 de março de 2021. <<https://www.archdaily.com.br/br/919735/liceu-frances-francois-mitterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus>> ISSN 0719-8906
- AZKORRA, Z. et al. Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings. Applied Acoustics, v. 89, p. 46–56, mar. 2015.
- BANIYA, B. [et al.]. A review of green roofs to mitigate urban heat Island and Kathmandu Valley in Nepal. Applied Ecology and Environmental Sciences, vol. 6, No. 4, 2018, pp 137-152. <http://pubs.sciepub.com/aees/6/4/5>. Disponível em: <http://pubs.sciepub.com/aees/6/4/5/index.html#Figure7>. Acesso em 12 de novembro de 2022.
- BEYER, P. O. Condutividade térmica equivalente do eco telhado. Ecotelhado Brasil. Acessado em 10 de outubro de 2020. Disponível em: <https://ecotelhado.com/wp-content/uploads/2015/03/Condutividade-T%C3%A9rmica-Equivalente-do-Ecotelhado.pdf>
- BERARDI, Umberto; GHAFARIANHOSEINI, Amirhosein; GHAFARIANHOSEINI, Ali (2014) - State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. Applied Energy, v. 115, pp. 411–428, 2014.
- BLACKDOWN GREEN ROOFS, 2021. Disponível em www.blackdown.co.uk/>, Acesso em: 01 mai. 2021.
- BLUMENAU. Lei complementar nº 1174, de 07 de fevereiro de 2018. Diário Oficial do Município. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/sc/b/blumenau/leicomplementar/2018/117/1174/lei-complementar-n-1174-2018-acrescenta-secao-xxi-com-artigos-63-a-63-b-63-c-63-de-63-e-ao-capitulo-vi-da-lei-complementar-n-1030-de-18-dedezembro-de-2015-para-regular-a-utilizacao-de-telhado-verdenas-edificacoes>. Acesso em 02 de março de 2021.

- BONAN, G. B. **Ecological Climatology: Concepts and Applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 678 p.
- BRASIL. Projeto de lei nº 304 de 2015. Dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação de “Terraço Verde” nos locais que especifica e dá outras providências. Disponível em: www.senado.leg.br/atividade/materia/getTexto.asp?t=166496. Acesso em 02 de março de 2021.
- _____. Projeto de Lei nº 1703 de 2011. Dispõe sobre a instalação do denominado “Telhado Verde” e dá outras providências. Disponível em: <http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=510512>. Acesso em 02 de março de 2021.
- CATALANO, Chiara [et al.]. Some European green roof norms and guidelines through the lens of biodiversity: Do ecoregions and plant traits also matter? *Ecological Engineering*, vol.115, pp. 15-26. ISSN 09258574.
- CARDOSO, M. R. D. et al. Classificação Climática de Koppen-Geiger para o Estado de Goiás e Distrito Federal. *ACTA Geográfica, Boa Vista*, v.8, n.16, jan./mar. de 2014. pp.40- 55
- CHEN, L. et al. Intra-urban differences of mean radiant temperature in different urban settings in Shanghai and implications for heat stress under heat waves: A GIS-based approach. *Energy and Buildings*, v. 130, p. 829–842, 15 out. 2016.
- CHEN, Y.-C. et al. Does urbanization increase diurnal land surface temperature variation? Evidence and implications. *Landscape and Urban Planning*, v. 157, p. 247–258, jan. 2017.
- CHONG, K. Y. et al. Not all green is as good: different effects of the natural and cultivated components of urban vegetation on bird and butterfly diversity. *Biological Conservation*, v. 171, p. 299–309, mar. 2014.
- CLARKE, J.A., HENSEN, J.L.M. Integrated building performance simulation: Progress, prospects and requirements. *Building and Environment*. 2015. Disponível no sítio eletrônico <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.002>.
- CAMERON, R. W. F.; TAYLOR, J. E.; EMMETT, M. R. What’s ‘cool’ in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. *Building and Environment*, v. 73, p. 198–207, mar. 2014.
- CASTLETON H.F.; STOVIN V.; BECK S.B.M.; DAVISON J.B. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, v. 42, pp. 1582-91, 2010.
- CITY OF TORONTO, 2016. Eco-roof incentive program review. Available at <http://www1.toronto.ca/City%20Of%20Toronto/Environment%20and%20Energy/Programs%20for%20Residents/PDFs/EcoRoof/EcoRoof%20Incentive%20Program%20Review%202016.pdf>. Acesso em 26 fevereiro de 2021.
- COMA, J. et al. Green roofs as passive system for energy savings in buildings during the cooling period: use of rubber crumbs as drainage layer. *Energy Efficiency*, v. 7, n. 5, p. 841–849, 8 abr. 2014.
- COMARAZAMY, D. E.; GONZÁLEZ, J. E.; LUVALL, J. C. Quantification and mitigation of long term impacts of urbanization and climate change in the tropical coastal city of San Juan, Puerto Rico. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, v. 10, n. 1, p. 87–97, 3 jan. 2015.

- CONNELLY, M.; HODGSON, M. Experimental investigation of the sound absorption characteristics of vegetated roofs. *Building and Environment*, v. 92, p. 335–346, out. 2015.
- CORBELLA, Oscar. Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos: conforto ambiental - 2ª ed. revisada e ampliada. - Rio de Janeiro: Revan, set. 2009. 3ª Reimpressão, mar. 2016.
- CORREA, C.B.; GONZALEZ, F.J.N. O uso de coberturas ecológicas na restauração de coberturas planas. In: Núcleo de pesquisa em tecnologia de arquitetura e urbanismo- Nutau, 2002. Anais, São Paulo: Pró-reitoria de Pesquisa, Universidade de São Paulo, 2002.
- DORNELLES, Kelen Almeida. Biblioteca de absorvância de telhas: base de dados para análise de desempenho termoenergético de edifícios. São Carlos: IAU/USP, 2021. *E-book*. Disponível em: <https://www.livrosabertos.sibi.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/view/571/508/1941>. Acesso em 12 de novembro de 2022.
- DUNNETT, N.; Kingsbury, N. **Planting Green Roofs and Living Walls**. Timber Press, London, UK. 2008. ISBN-13: 978-0-88192-911-9.
- DUTRA, B., SILVA, J. Perspectivas sobre o telhado verde no Brasil. *Sinergia*, v. 21, n. 1, p. 5–9, jan/jun. 2019. <http://dx.doi.org/10.33780/issn.2177-451x>
- ECOGARDENS, 2021. Disponível em: <https://ecogardens.com/>. Acesso em: 20 mai. 2021.
- EARTH PLEDGE. **Green Roofs. Ecological Design and Construction**. Atglen: Schiffer Publishing, 2005. 158p.
- EPA, U. S.; Environmental Protection Agency. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics. 2008. Disponível online em: <http://www.epa.gov/heatisland>. Acesso em: 21 de junho de 2021.
- ETHUR, Dias Adriano. O desempenho térmico de uma cobertura verde em simulações computacionais em três cidades brasileiras. 2016. 192f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.
- FLL. Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green-Roofing – Green Roofing Guideline. Research foundation for landscaping issues (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau). Bonn, Germany, 2018.
- FENG, Haibo; HEWAGE, Kasun N. Economic Benefits and Costs of Green Roofs. In: Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability. ISBN 9780128121504. pp. 307-318, 2018.
- GAGLIANO, A. et al. A multi-criteria methodology for comparing the energy and environmental behavior of cool, green and traditional roofs. *Building and Environment*, v. 90, p. 71–81, ago. 2015.
- GARTLAND, L. **Ilhas de calor**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2010.
- GIACOMELLO, Elena. Green Roofs, Facades and Vegetative Systems – Safe aspects in the standards. Butterworth-Heinemann, 2020. Recurso eletrônico disponível em: <https://play.google.com/books/readerid=7prgDwAAQBAJ&hl=pt&pg=GBS.PR4.w.6.0.13>. Acesso em 26 de fevereiro de 2021.

- GIANNOPOULOU, Maria; Roukouni, Anastasia; Lykostratis, Konstantinos. Exploring the benefits of urban green roofs: a GIS approach applied to a Greek city, CES Working Papers, I Alexandru Ioan Cuza University of Iasi, Centre for European Studies, Iasi, Vol. 11, Iss. 1, pp. 55-72. 2019.
- GIVONI, B. Man, **Climate and Architecture**. 2ª edição. London, Applied Science. 483p. 1976.
- GONÇALVES, J. C. S.; DUARTE, D. H. S. Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino. In: Ambiente Construído, Porto Alegre, v.6, n.4, p.51-81, 2006.
- GUIMARÃES, R. P. Comportamento térmico do ambiente construído: influência do pé-direito e de materiais das paredes envoltórias. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- GREEN ROOFS FOR HEALTHY CITIES, 2021. Disponível em: <https://greenroofs.org/> . Acesso em 29 maio de 2021.
- GREEN ROOFS NEW YORK CITY, 2021. Disponível em: <https://www.nature.org/en-us/> . Acesso em 18 de junho de 2021.
- GROWING GREEN GARDEN. A guide to green roofs, walls and facades in Melbourne and Victoria, Austrália. 2014. Disponível em: <https://www.melbourne.vic.gov.au/SiteCollectionDocuments/growing-green-guide.pdf>
- HARPER, G. E. et al. Nine-month evaluation of runoff quality and quantity from an experiential green roof in Missouri, USA. Ecological Engineering, The 13th Annual Conference of the American Ecological Engineering Society: Ecological Engineering and the Dawn of the 21st Century. v. 78, p. 127–133, maio 2015.
- HAKIMDAVAR, R. et al. The soil water apportioning method (SWAM): an approach for long term, low cost monitoring of green roof hidrologic performance. Ecological Engineering, v. 93, p 207-220, ago 2016.
- HEYWOOD, Huw. **101 regras básicas para uma arquitetura de baixo consumo energético**. São Paulo, Gustavo Gili, 2015.
- HUI, Sam C M & CHAN, S. Integration of green roof and solar photovoltaic systems. 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/281901499_Integration_of_green_roof_and_solar_photovoltaic_systems
- INTERNATIONAL GREEN ROOF ASSOCIATION (IGRA). Green Roof News. 2011. Disponível em: http://www.igraworld.com/links_and_downloads/images_dynamic/IGRA_Green_Roof_News_1_11.pdf. Acesso em 26 de fev de 2021.
- IOWA STORM WATER EDUCATIONAL PARTNERSHIP, 2021. Disponível em: <https://iowastormwater.org/green-infrastructure/green-roofs/>. Acesso em: 26 fev. 2021.
- JAFFAL, I.; OULDBOUKHITINE, S.; BELARBI, R. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. Renewable Energy, v. 43, p.157-164, 2012. DOI: 10.1016/j.renene.2011.12.004.
- JAYASOORIYA, V.M. et al. Green Infrastructure practices for improvement of urban air quality. Urban Forest & Urban Greening, v. 21, p. 34-47, jan, 2017.
- KÖHLER, M., Wiartalla, W. and Feige, R., 2007. Interaction between PV-systems and extensive green roofs, In: Proceedings of the Fifth Annual Greening Rooftops for

Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show, Minneapolis, April 29-May 1, 2007, 16 pages.

- LAMBERTS, R. [et al]. **Desempenho Térmico de Edificações**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, CTC - Departamento de Engenharia Civil, 7ª edição, 2016.
- LA ROCHE, P.; BERARDI, U. Comfort and energy savings with active green roofs. *Energy and Buildings*, v. 82, p. 492–504, out. 2014.
- LEE, J. Y.; LEE, M. J.; HAN, M. A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs. *Journal of Environmental Management*, v. 152, p. 171–176, 1 abr. 2015.
- LIN, B. B.; PHILPOTT, S. M.; JHA, S. The future of urban agriculture and biodiversity ecosystem services: challenges and next steps. *Basic and Applied Ecology*, v. 16, n. 3, p.189–201, May 2015.
- LIN, B.-S. et al. Impact of climatic conditions on the thermal effectiveness of an extensive green roof. *Building and Environment*, v. 67, p. 26–33, September 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.026>
- LUO, H. et al. Carbon sequestration potential of green roofs using mixed-sewage-sludge substrate in Chengdu World Modern Garden City. *Ecological Indicators*, v. 49, p. 247–259, fev. 2015a.
- LUNDHOLM, J. T.; WEDDLE, B. M.; MACIVOR, J. S. Snow depth and vegetation type affect green roof thermal performance in winter. *Energy and Buildings*, v. 84, p. 299–307, Dezembro 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.093>.
- MANDEL, L.; MCCOY, E.; LISS, T. Reference community: adapting native plants to north american green roofs. *Journal of Green Building*, 4 jan. 2017.
- MARCHI, M. et al. Carbon dioxide sequestration model of a vertical greenery system. *Ecological Modelling*, Special Issue: Ecological Modelling for Ecosystem Sustainability. Selected papers presented at the 19th ISEM Conference, 28-31 October 2013, Toulouse, France. v. 306, p. 46–56, 24 jun. 2015.
- MENDES, B. H. E. **Tetos verdes e políticas públicas: uma abordagem multifacetada**. 2013. 348f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 2013.
- MONTANARI, Ketlin Bruna; LABAKI, Lucila Chebel. Comportamento térmico de ambientes internos sob a influência de envoltórias verdes. *PARC - Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Campinas, SP, v. 8, n. 3, p. 181-193, set. 2017. ISSN 1980-6809. Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8650241>>. Acesso em: 20 jun. 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v8i3.8650241>
- MONTANARI, Ketlin. B. Envoltórias verdes em edificações: proposta de uma estrutura de análise da sustentabilidade. 2018. 205f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2018.
- MOODY, S. S.; SAILOR, D. J. Development and application of building energy performance metric for green roof systems. In: *Energy and Buildings*, v. 60, maio 2013.
- MORUZZI, R. B.; MOURA, C. C. DE; BARBASSA, A. P. Avaliação do efeito da inclinação e umidade antecedente na qualidade e quantidade das parcelas escoadas, percoladas e armazenadas em telhado verde extensivo. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 3, p. 59–73, set. 2014.

- MUNBY, B. Feasibility Study for the Retrofitting of Green Roofs. CIV405. Final Report. The University of Sheffield: 2005. 75 p.
- NAGASE, A.; NOMURA, M. An evaluation of one example of biotope roof in Japan: plant development and invertebrate colonisation after 8 years. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 13, n. 4, p. 714–724, 2014.
- NAKAMURA, Priscila. Guia para implementação de coberturas verdes: Versão para o contexto do município de Campo Grande e região. 2018. 45f. Dissertação (Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade). Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande. 2018.
- NIACHOU, A. et al. Analysis of the Green Roof Thermal Properties and Investigation of its Energy Performance. *Journal of Energy and Buildings*, Amsterdam, v. 33, p.719-729, 2001;
- OBBERDORFER, E.; LUNDHOLM, J.; BASS, B.; COFFMAN, R.; DOSHI, H.; DUNNETT, N.; GAFFIN, S.; KOHLER, M.; LIU, K.; ROWE, B. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions and Services. *BioScience*, v. 57, n.10, 2007.
- OLIVEIRA, Carlos Matheus., AMADOR, Raphael. Foto do Liceu de Brasília. N.d. Disponível em<<https://www.archdaily.com.br/br/919735/liceu-frances-francois-mitterrand-jt-arquitetura-plus-jean-dubus>> ISSN 0719-8906. Acesso em 20 de fev. 2021.
- OLIVEIRA, Vanessa Sousa de. Dilemas do lazer em áreas protegidas: o caso do Jardim Botânico de Brasília – JBB. 2018. 184f. Dissertação (Mestrado Profissional em Turismo). Programa de Pós-graduação em Turismo. Universidade de Brasília. Brasília – DF, 2018.
- OKE, Tim R. *Boundary layer climates*. 2ª Edição. Londres: Routledge, 1987.
- PARIZOTTO, S.; LAMBERTS, R. Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil. *Energy and Buildings*, v. 43, n. 7, p. 1712–1722, 1 jul. 2011.
- PENG, L. L. H.; JIM, C. Y. Seasonal and diurnal thermal performance of a subtropical extensive green roof: the impacts of background weather parameters. *Sustainability*, v. 7, n. 8, p. 11098–11113, 14 ago. 2015. <http://dx.doi.org/10.3390/su70811098>
- POE, S.; STOVIN, V.; BERRETTA, C. Parameters influencing the regeneration of a green roofs retention capacity via evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, v. 523, p. 356–367, abr. 2015.
- RAPOSO, F. Manual de boas práticas de coberturas verdes. 2013. 187f. Dissertação (Mestrado em Construção e Reabilitação). Instituto Superior-Técnico, Universidade de Lisboa. Lisboa, Portugal. 2013.
- RAZZAGHMANESH, M.; BEECHAM, S.; SALEMI, T. The role of green roofs in mitigating urban heat island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 15, p. 89–102, 2016.
- RIVERO, R. **Arquitetura e clima**. Acondicionamento térmico natural. 2ed. Porto Alegre: D.C. Luzzatto, 1986.
- ROMERO, Marta Adriana Bustos. **Arquitetura do Lugar**: uma visão bioclimática da sustentabilidade em Brasília. São Paulo, Nova Técnica Editorial, 2011.

- ROMERO, Marta Adriana Bustos. **A arquitetura bioclimática do espaço público**. Editora Universidade de Brasília, 4ª impressão, 2015.
- ROMERO, Marta Adriana Bustos. **Princípios Bioclimáticos para o Desenho Urbano**. Brasília. Copymarket.com, 2000.
- ROMERO, Marta Adriana Bustos., BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello., LIMA Erondina Azevedo de., VIANNA, Elen Oliveira., WERNECK, Daniela Rocha & SALES, Gustavo de Luna. **Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas**. Brasília: Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Editora ETB, 1ª edição, 2019.
- ROMERO, Marta Adriana Bustos. ESTBIO. Estratégias Bioclimáticas de Reabilitação Ambiental Adaptadas ao Projeto. Brasília: Apostila do curso de pós-graduação lato sensu – Reabilita, 10ª edição, 2019, 69 p. Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.
- SAADATIAN, O. et al. A review of energy aspects of green roofs. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, [s.l.], v. 23, p.155-168, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.022>.
- SAILOR, D. J. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy And Buildings*, v. 40, n. 8, p.1466-1478, jan. 2008. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.02.001
- SAILOR, D. J.; HUTCHINSON, D.; BOKOVOY, L. Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S. *Energy and Buildings*, [s.l.], v. 40, n. 7, p.1246-1251, jan. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.11.004>.
- SANTAMOURIS, M. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, v. 103, p. 682–703, maio 2014. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>.
- SEBTI, A.; BENNIS, S.; FUAMBA, M. Optimization of the restructuring cost of an urban drainage network. *Urban Water Journal*, v. 13, n. 2, p. 119–132, 17 fev. 2016.
- SEDUM SUPPLY SUSTAINABLE GREEN ROOFS, 2021. Disponível em <https://www.sedumsupply.co.uk/>. Acesso em 10 de agosto de 2021.
- SCHMITTER, P. et al. Effect of catchment-scale green roof deployment on stormwater generation and reuse in a tropical city. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 142, nº 7, 2016.
- SHINZATO, P.; DUARTE, D. H. S. Microclimatic Effect of Vegetation for Different Leaf Area Index – LAI. PLEA 2012 – 28th Conference
- SHINZATO, P.; DUARTE, D. H. S. Impacto da vegetação nos microclimas urbanos e no conforto térmico em espaços abertos em função das interações solo-vegetação-atmosfera. 2017.
- SILVA, Thomas Fernandes da. Tecnologia alternativa em drenagem urbana: telhado verde. 2017. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, PE. 2017.
- SILVA, Marcelo F. da Rocha e. Simulação energética de coberturas verdes. 2014. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Instituto Superior Técnico de Lisboa. Lisboa, Portugal. 2014.

- SPEAK A. F. et al. Metal and nutrient dynamics on an aged intensive green roof. *Environmental Pollution*, v. 184, p. 33-43, jan. 2014.
- SORTE, P. D. B.; Simulação Térmica de Paredes Verdes Compostas de Vegetação Nativa do Cerrado. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2016.
- TABARES-VELASCO, P. C.; SREBRIC, J. A heat transfer model for assessment of plant-based roofing systems in summer conditions. *Building And Environment*, [s.l.], v. 49, p.310-323, mar. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.019>.
- TASSI, R. et al. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão de águas pluviais. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 1, p. 139–154, mar. 2014.
- VERSINI, P.-A. et al. Assessment of the hydrological impacts of green roof: from building scale to basin scale. *Journal of Hydrology*, v. 524, p.562–575, maio 2015.
- VIANNA, Elen Oliveira. O campo térmico urbano: Ilhas de calor em Brasília – DF. 2018. 267f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Programa de Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2018.
- VIJAYARAGHAVAN, K.; JOSHI, U. M. Application of seaweed as substrate additive in green roofs: enhancement of water retention and sorption capacity. *Landscape and Urban Planning*, v. 143, p. 25-32, nov. 2015.
- VOLDER, A.; DVORAK, B. Event size, substrate water content and vegetation affect storm water retention efficiency of an un-irrigated extensive green roof system in Central Texas. *Sustainable Cities and Society*, v. 10, p. 59–64, fev. 2014.
- VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, v. 86, n. 3, p. 370–384, 2003.
- WEBER, Fernando da Silva. Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa *EnergyPlus*. Trabalho de conclusão de curso (graduação). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, CTC – Departamento de Engenharia Civil, 2018.
- WONG, G. K. L.; JIM, C. Y. Do vegetated rooftops attract more mosquitoes? Monitoring disease vector abundance on urban green roofs. *Science of The Total Environment*, v. 573, p. 222–232, 15 dez. 2016.
- WERNECK, Daniela Rocha. Estratégias de mitigação das ilhas de calor urbanas: estudos de caso em áreas comerciais em Brasília – DF. 2018. 118f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Programa de Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2018.
- ZANONI, V.A.G. Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília. 2015. 193f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2015.
- ZAREMBA, G. J.; TRAVER, R. G.; WADZUK, B. M. Impact of drainage on green roof evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 142, n. 7, p. 04016022, 2016.

ZINZI, M.; AGNOLI, S. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy And Buildings*, v. 55, p.66-76, 2012. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.09.024.

8 APÊNDICE

8.1 Apêndice I - Interface do programa para inputs e outputs

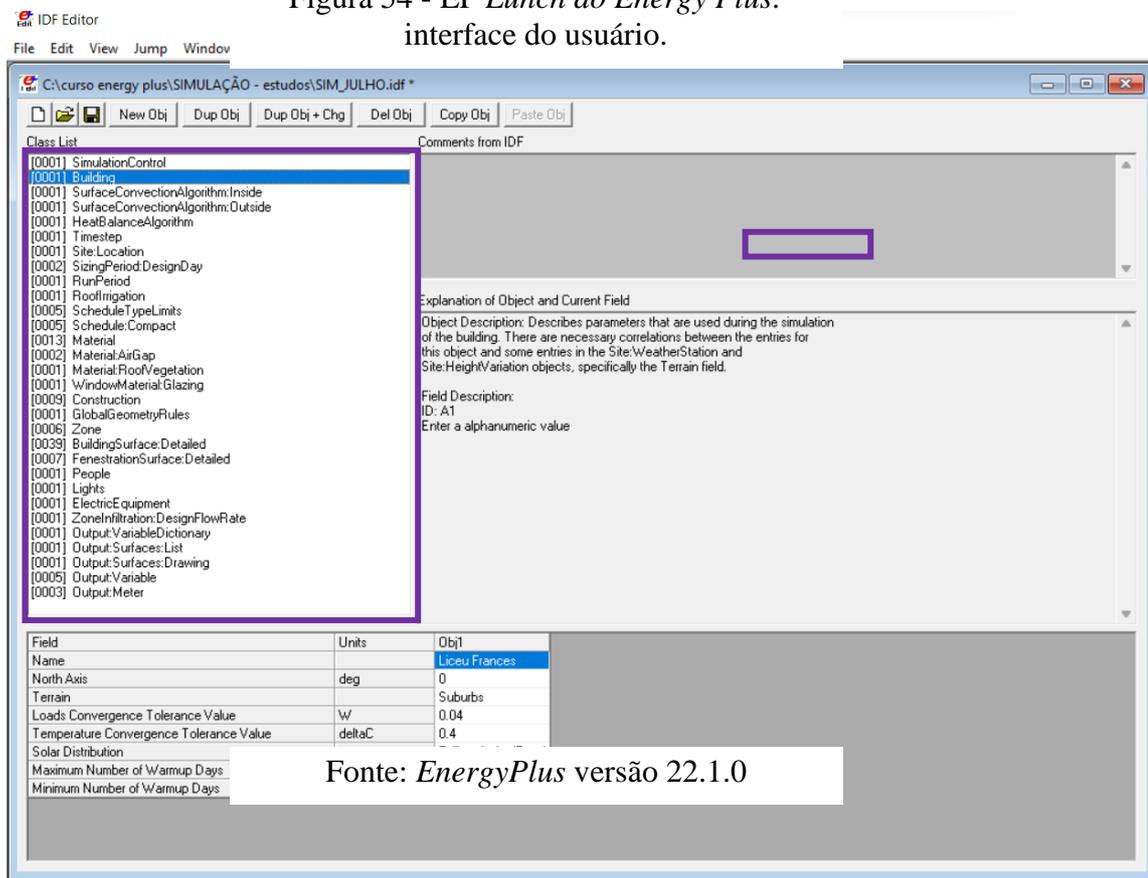
Algumas janelas do software *EnergyPlus* estão descritas a seguir para melhorar o entendimento de como os dados são inseridos, a partir da documentação do programa disponibilizada pelos desenvolvedores como o *Engineering Reference (2022)* e o *EnergyPlus Input Output References (2022)*.

Nem todos os parâmetros foram preenchidos nas simulações aqui apresentadas pois não foram considerados relevantes para o estudo proposto e outros que, por padrão, são preenchidos automaticamente sem prejuízo para aos resultados. Assim, somente o conjunto de parâmetros que efetivamente foram editados e preenchidos são referidos nesta sessão.

O *EP Launch* (Figura 51) é a janela que permite o controle de todos os aspectos da simulação e onde dá acesso ao campo de inserção do arquivo climático, ao botão *IDF Editor* e ao botão *Simulate*, como destacado na figura.

Os parâmetros são introduzidos com o recurso do *IDF Editor* e estão organizados por classes. Cada classe possui objetos e dentro destes estão um ou mais campos para preenchimento dos dados de entrada (Figura 54).

Figura 54 - EP Lunch do Energy Plus: interface do usuário



Fonte: *EnergyPlus* versão 22.1.0

Fonte: *EnergyPlus* versão 22.1.0

O primeiro item da *class list*, *Simulation Control* (Figura 55), permite que o usuário escolha o tipo de simulação pretendida, como por exemplo, a simulação para um cálculo de dimensionamento de um equipamento ou fluxo de energia sem utilizar um arquivo climático ou então uma simulação onde todos os equipamentos e fluxos de energia são previamente definidos e o arquivo climático do local ou arquivo equivalente é utilizado, considerando um dado período. Esta é a situação do estudo aqui proposto.

As classes e objetos estão na parte superior esquerda da janela e os campos de entrada, pertencentes aos objetos, parte inferior esquerda. Uma breve explicação de cada campo é apresentada à direita da janela. Os valores que estão à esquerda do nome dos objetos são as quantidades daqueles objetos no arquivo .idf, só existindo um valor se o objeto estiver em uso.

A janela apresentada como exemplo da interface do software representa os dados de entrada para o presente estudo, com um total de vinte e quatro itens.

Na classe *Building* têm-se os parâmetros alusivos ao estudo de caso: *Name* (nome do edifício) e o *North Axis* (o ângulo que o edifício/ ambiente faz com o Norte). Este último item é muito relevante e deve ser considerado no momento da modelagem do espaço construído no *Sketchup*. O parâmetro *Terrain* (*terreno*) diz respeito ao contexto da edificação na cidade e foi considerado subúrbio pelo perfil de ocupação e uso do solo no Lago Sul. Para o item *Solar Distribution* (Algoritmo de distribuição solar) – que trata do modo como a radiação solar é refletida pela superfície exterior e como é a absorção ou reflexão da radiação no espaço interno do ambiente construído. Há cinco opções no programa e a escolhida foi o *Full interior and Exterior*.

O *Warmup* é um parâmetro que tem por função garantir que os primeiros resultados dos primeiros dias da simulação sejam fiéis e para isso, o número de dados de fluxos de temperatura anteriores precisa ser suficiente. Os primeiros resultados são provenientes de variadas interações onde o software começa com temperaturas e fluxos elevados até sua conversão. Foram utilizados valores *default* para o estudo proposto, seguindo as orientações da documentação do EnergyPlus (*Input Output References*) - 0,04W. Os valores máximo e mínimo para os *warmup days* que aparecem na interface apresentada (Figura 53) são *default* do programa – vinte e cinco dias e seis dias, respectivamente.

O Objeto *Shadow Calculation* (Quadro 1) indica o controle de sombras no modelo, através da trajetória solar e o valor escolhido é o mais simples, *default* do software (*Average Over Days in Frequency* – frequência média durante os dias). O valor indica a posição média do sol em um período de 20 dias para determinar a quantidade de radiação solar que incide na edificação e sua influência direta em todos os valores de fluxo de energia. O arquivo climático carregado na simulação fornece os dados necessários para que esta informação seja processada no *EnergyPlus*.

Quadro 22 - Campos da Classe *Building* na interface do *EnergyPlus*: interface do usuário

Field	Units	Obj1
North Axis	deg	0
Terrain		Suburbs
Loads Convergence Tolerance Value	W	0.04
Temperature Convergence Tolerance Value	deltaC	0.4
Solar Distribution		FullInteriorAndExterior
Maximum Number of Warmup Days		25
Minimum Number of Warmup Days		6

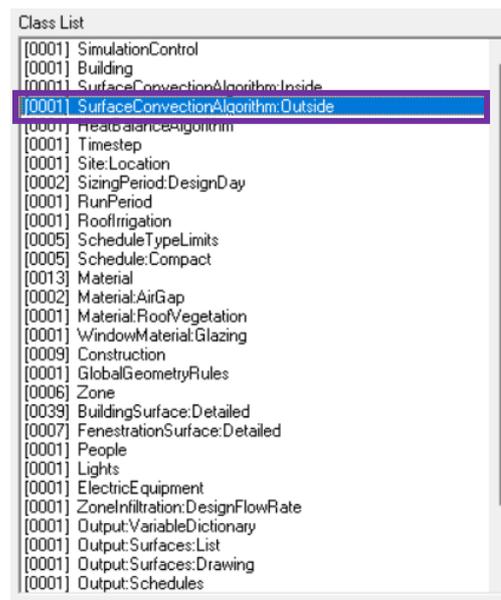
Fonte: *EnergyPlus* versão 22.1.0

O campo *Surface Convection Algorithm: Inside* (Figura 56) indica o modelo de cálculo para as trocas de calor por convecção do interior de todas as superfícies. Também foi utilizado o modelo *default*, TARP, que correlaciona as trocas de calor com a diferença de temperatura. É o mesmo valor utilizado na criação do modelo de Sailor (2008).

O campo *Surface Convection Algorithm: Outside* (Figura 54) controla o modelo de cálculo para as trocas de calor por convecção do exterior de todas as superfícies. O modelo escolhido é o *default*, o mesmo usado por Sailor (2008).

O campo *Heat balance Algorithm* indica o controle de transferência de calor e difusão do vapor de água por meio dos elementos construtivos. Também foi utilizado o *default* do programa, que, apesar de ser o mais simples, é o que suporta o modelo de coberturas verdes criado por Sailor (2008)

Figura 56 - O campo *Surface Convection Algorithm*.

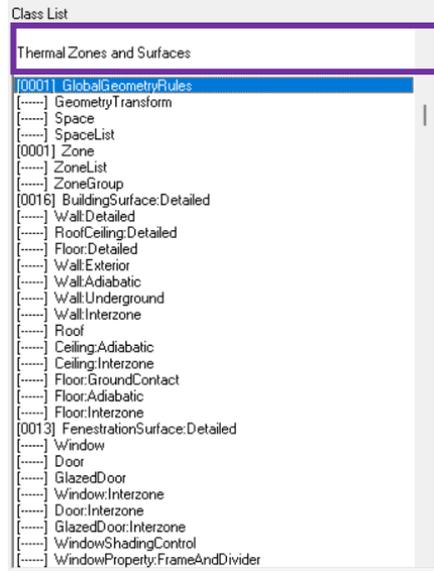


Fonte: *EnergyPlus* versão 22.1.0

Na classe *Thermal Zone and Surfaces* (Figura 56, 57 e 58) são definidas as características geométricas do ambiente ou edificação a ser simulado, além da zona térmica e massa interior (que ajudam na estabilização da temperatura interna). Os objetos que possuem números associados são os que foram preenchidos no input. O parâmetro *Global Geometric Rules* é preenchido automaticamente e o *Building Surface Detailed* preenchido pelo usuário para atribuir as características das superfícies detalhadamente (Figura 56). Para a sala de aula

em estudo foram configuradas dezesseis superfícies, entre paredes, piso, forro, laje de cobertura e as camadas da cobertura verde extensiva (Figura 55)

Figura 57 - Thermal Zone and Surfaces



Fonte: EnergyPlus versão 22.1.0

Figura 58 - Building Surface Detailed

Field	Units
Name	
Surface Type	
Construction Name	
Zone Name	
Space Name	
Outside Boundary Condition	
Outside Boundary Condition Object	
Sun Exposure	
Wind Exposure	
View Factor to Ground	
Number of Vertices	

Figura 59 - Building Surface Detailed

Obj8	Obj9	Obj10	Obj11	Obj12	Obj13	Obj14	Obj15	Obj16
Zn001:Wall008	Zn001:Wall009	Zn001:Wall010	Zn001:Wall011	Zn001:Wall012	Zn001:Wall013	Zn001:Wall014	Zn001:Flr001	Zn001:Roof001
Wall	Floor	Roof						
Medium Exterior Wz	Medium Floor	Medium Roof/Ceiling						
Full Building - 1 Zon	Full Building - 1 Zon							
Outdoors	Surface Zn001:Flr001	Outdoors						
SunExposed	NoSun	SunExposed						
WindExposed	NoWind	WindExposed						
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0
4	4	4	4	4	4	4	4	4

Fonte: EnergyPlus, 2022.

O item *Fenestration Surface: Detailed* (Figura 60) diz respeito a sub superfícies que representam os vãos envidraçados onde são especificados o nome e a localização da superfície em vidro em relação à volumetria do ambiente, o material que o compõe, se há sombreamento e as coordenadas relativas à subsuperfície (vértices).

Figura 60 - Fenestration Surface: Detailed

[0007] FenestrationSurface:Detailed	
[0001] People	
[0001] Lights	
[0001] ElectricEquipment	
[0001] ZoneInfiltration:DesignFlowRate	
[0001] Output:VariableDictionary	
[0001] Output:Surfaces:List	
[0001] Output:Surfaces:Drawing	
[0001] Output:Schedules	

Field	Units
Name	
Surface Type	
Construction Name	
Building Surface Name	
Outside Boundary Condition Object	
View Factor to Ground	
Frame and Divider Name	
Multinlier	

Fonte: EnergyPlus, 2022.

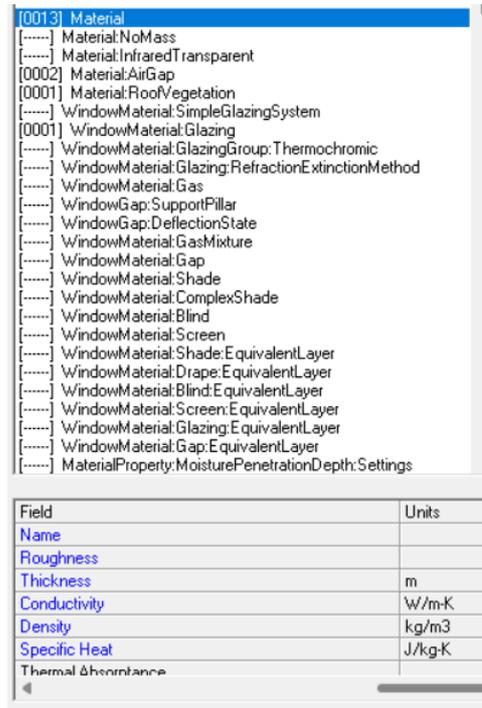
Figura 61 - Fenestration Surface: Detailed

Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
JanelaFachadaSul	Janela50x250A	Janela50x250B	Janela180x50	PortaAF80x210	PortaLatZ4	PortaLatZ5
Window	Window	Window	Window	Door	Door	Door
VidroSimples	VidroSimples	VidroSimples	VidroSimples	MadeiraPorta	MadeiraPorta	MadeiraPorta
Pn5	Pn5	Pn5	Pn5	Pn5	Po4	PI5
					PI5	Po6
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
1	1	1	1	1	1	1

Fonte: EnergyPlus, 2022

O item *Material* (Figura 62) permite a especificação de todos os materiais e suas propriedades térmicas que compõem as superfícies do espaço construído simulado, como por exemplo: o forro mineral, as portas em madeira, os blocos de concreto das paredes com sua argamassa de revestimento e as camadas de drenagem e impermeabilização do telhado verde.

Figura 62. Material



Fonte: EnergyPlus, 2022

Figura 63. Material

Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj10	Obj11	Obj12	Obj13
MadeiraPorta25mm	Parede140mmBlocc	AcabamentoExtern	F16 Acoustic tile	M14a 100mm heavy	Argamassa(25mm)	ConcretoBloco1.73c	CamadaFiltrante	CamadaDrenante	CamadaImpermeab
MediumSmooth	MediumRough	MediumSmooth	MediumSmooth	MediumRough	MediumRough	MediumRough	Smooth	Smooth	Smooth
0.03	0.1	0.02	0.0191	0.1016	0.025	0.0173	0.05	0.06	0.07
0.15	1.11	0.16	0.06	1.95	1.15	1.75	0.06	0.08	0.17
800	800	800	368	2000	2000	2400	160	800	1200
1300	920	1090	590	900	1000	1000	2500	920	920
					0.9	0.7	0.9	0.9	0.9

Fonte: EnergyPlus, 2022

Os demais itens da *Class List* não foram descritos para abreviar esta sessão sobre a interface do programa já que os principais itens foram apresentados.

Sobre os *outputs*, ou variáveis de saída, desejou-se verificar os processos de transferência de calor e massa com a análise dos resultados obtidos para a cobertura verde, a telha de fibrocimento e a laje impermeabilizada.

8.2 Apêndice II

Equação para o cálculo da troca de energia da vegetação e substrato por radiação de ondas longas

Equação 1 - cálculo da troca de energia da vegetação e substrato por radiação de ondas longas

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

$\varepsilon_1 = \varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_f \varepsilon_g$

$\sigma_f = 0.9 - 0.7 \exp(-0.75 LAI)$
Cobertura fracional

$$F_g = (1 - \sigma_f) \left[I_s^{\downarrow} (1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir}^{\downarrow} - \varepsilon_g T_g^4 \right] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K * \frac{\partial T_g}{\partial z}$$

Fonte:

Quadro 22– Variáveis do cálculo da troca de energia da vegetação e substrato por radiação de ondas longas aplicados na equação

Variáveis consideradas	
Temperatura do solo (K)	<i>Green roof soil temperature (°C)</i>
Temperatura da vegetação (K)	<i>Green roof vegetation temperature (°C)</i>
Incidência solar	<i>Outside face incident solar radiation rate (W/m²)</i>
Incidência infravermelho	<i>Site horizontal infrared radiation rate (W/m²)</i>

Considerando o modelo de Sailor (2008) os termos destacados correspondem ao cálculo das trocas por radiação. A cobertura fracional corresponde ao substrato/ vegetação de acordo com o índice de área foliar (LAI). A simulação realizada gera as variáveis necessárias em destaque no cálculo, através das variáveis de saída.