

O desempenho térmico de uma cobertura verde em simulações computacionais em três cidades brasileiras

Adriano Ethur Dias

O DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA COBERTURAS VERDE EM SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS EM TRÊS CIDADES BRASILEIRAS

ADRIANO ETHUR DIAS

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

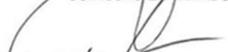


Prof. Dr. Glicerio Triches - Coordenador do PPGEC



Prof. Roberto Lamberts, PhD – Orientador

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Roberto Lamberts, PhD - Moderador - PPGEC / UFSC



Prof. Dr. Nathan Mendes – PPGEM / PUC-PR



Prof. Eneidr Ghisi, PhD – PPGEC / UFSC



Prof. Dr. Martin Ordenes – Pós-ARQ / UFSC

Florianópolis, Setembro de 2016

ADRIANO ETHUR DIAS

**O DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA COBERTURA VERDE
EM SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS EM TRÊS CIDADES
BRASILEIRAS**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Roberto Lamberts, PhD.

Florianópolis, Outubro de 2016

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

Ethur Dias, Adriano

O desempenho térmico de uma cobertura verde em simulações computacionais em três cidades brasileiras / Adriano Ethur Dias ; orientador, Roberto Lamberts - Florianópolis, SC, 2016.
192 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Coberturas Verdes. 3. Desempenho Térmico. 4. Análise Térmica. 5. Balanço Térmico. I. Lamberts, Roberto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

“É triste pensar que a natureza
fala e a humanidade não ouve. ”

“It's sad to think that nature
speaks and mankind will not
listen.”

(Victor Hugo)

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, aos meus pais que me deram essa vida.

As todas as pessoas de bem que encontrei nela.

As lições nela aprendidas, e o porvir.

Ao constante desejo de mudar para melhor.

Ao espaço e o tempo, que me colocaram nesta trajetória.

Ao meu orientador e amigo Roberto Lamberts pela condução das minhas ideias e conversas tão recompensantes. Agradeço por nunca ter saído de sua sala sem as respostas que precisava.

Aos Professores Martin e Enedir pelas duas avaliações deste trabalho e as contribuições que as seguiram.

Ao Professor Nathan pela gentileza de avaliar este trabalho final, comparecendo pessoalmente a defesa.

Aos bons amigos que fiz nesta ilha, dentro e fora da universidade, os quais pretendo levar para a vida.

A todos que contribuíram diretamente no trabalho, em especial a Gabriela e o Matheus.

As belezas naturais e a cordialidade dos habitantes da ilha que me inspiraram em cada dia deste processo.

Ao PPGEC pela bolsa concedida e pela oportunidade de novos aprendizados. E aos funcionários e gestores da UFSC que zelam pela mesma.

A todos que hoje precisam da ajuda que a academia poderia prover, e ainda assim encontram-se desamparados. Acredito, fielmente, que um dia chegaremos ao equilíbrio ideal.

RESUMO

A busca pela eficiência energética das edificações é um assunto amplamente discutido no meio acadêmico. Diversas são as tecnologias, políticas e práticas voltadas à redução do consumo energético. Neste trabalho, o desempenho térmico de uma cobertura verde foi analisado através de simulações computacionais no programa *EnergyPlus*, em três cidades brasileiras. Foi utilizado um modelo de 16m², com paredes e piso adiabáticos formando uma única zona térmica. A cobertura foi a única superfície exposta às transferências de calor com o ambiente externo. Como alternativas à cobertura verde, foram utilizadas como referência uma cobertura convencional de fibrocimento e uma variedade “fria” (superfície externa pintada de branco). O desempenho térmico foi analisado a partir do sistema de condicionamento por cargas térmicas ideais, com temperatura de operação fixada entre 22 e 24°C. Os totais de cargas térmicas necessárias, integradas no ano, foram: 20,4 kWh/m².ano (Belém-PA), 9,9 kWh/m².ano (Curitiba-PR) e 4,2 kWh/m².ano (Brasília-DF). Quando comparados ao desempenho térmico da cobertura convencional, as reduções de cargas térmicas encontradas foram de 83% (102,1 kWh/m².ano), 89% (78,3 kWh/m².ano) e 95% (72,4 kWh/m².ano), para Belém, Curitiba e Brasília, respectivamente. Comparando-se o desempenho térmico da cobertura verde com a cobertura “fria”, obteve-se uma redução de cargas térmicas de 28% em Belém (5,6 kWh/m².ano), 90% em Curitiba (86,5 kWh/m².ano) e 91% em Brasília (40,3 kWh/m².ano). O balanço térmico e períodos específicos foram analisados para as três coberturas. A evapotranspiração mostrou-se como a parcela fundamental para o melhor desempenho térmico da cobertura verde em situações de demanda de resfriamento. Na ocasião de demanda de aquecimento, a camada de substrato atua limitando a retirada de calor do ambiente interno por condução. Exceto em Brasília a adição de uma camada de isolamento foi suficiente para que os

desempenhos térmicos das coberturas de fibrocimento superassem o da cobertura verde sem isolamento. A cobertura verde conforme utilizada, mostrou-se uma forma de melhorar o desempenho térmico nos três climas simulados.

Palavras-Chave: Coberturas Verdes; Análise Térmica; Desempenho Térmico; Balanço Térmico.

ABSTRACT

The ever growing urban population, the increasing urbanization and its consequences, brings attention to the importance of the adequate utilization of the available energy resources. The quest for energy efficiency of buildings is a topic widely discussed in academia. Several are the technologies, policies and practices aimed at reducing energy consumption. In this thesis, the thermal performance of a green roof was assessed and analyzed through simulations in *EnergyPlus* using three different Brazilian cities. A prototype model of 16 m² of area was used. It is constituted by adiabatic walls and floor forming a single thermal zone. The roof was the only surface exposed to heat transfers with the external environment. As alternatives to the green roof, a fibrocement roof and "cool" variety of it (outer surface painted white) were also used. The thermal performance was analyzed by ideal thermal loads, with an air conditioning system with fixed operating thermostat set point between 22 and 24°C. The total thermal loads required during the whole year of simulations were: 20.4 kWh/m².year (in Belem-PA), 9.9 kWh/m².year (in Curitiba-PR) and 4.2 kWh/m².year (in Brasília-DF). When compared to the thermal performance of the conventional roof, thermal loads reductions were 83% (102.1 kWh/m².year), 89% (78.3 kWh/m².year) and 95% (72.4 kWh/m².year) using the green roof, in Belem, Curitiba and Brasília, respectively. Comparing the thermal performance of the green roof with the cool roof, there was a reduction in annual thermal loads of 28% in Belem (5.6 kWh/m².year), 90% in Curitiba (86.5 kWh/m².year) and 91% in Brasilia (40.3 kWh/m².year). The thermal balance, and specific periods of the year were analyzed for all three roofs in each city. The evapotranspiration was fundamental to the improve in the thermal performance of green roof, when there is cooling demand. In heating demand situations, the substrate layer acts as insulation, limiting the heat removed from the indoor environment by

conduction. The addition of a layer of insulation material was enough for the conventional and cool roofs perform better than the green roof without insulation, except in Brasilia. The used green roof proved itself as a way to improve the thermal performance in the three simulated climates using this specific model.

Key Words: Green Roof; Roof Thermal Analysis, Thermal Performance; Heat Balance.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	16
1.1.	OBJETIVOS.....	21
1.1.1.	OBJETIVO GERAL.....	21
1.1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
1.2.	JUSTIFICATIVA.....	22
1.3.	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	27
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1.	ASPECTOS ENERGÉTICOS DAS COBERTURAS FRIAS.....	29
2.2.	COBERTURAS VERDES.....	34
2.2.1.	CLASSIFICAÇÃO DAS COBERTURAS VERDES.....	35
2.2.2.	O DESEMPENHO E O BALANÇO TÉRMICO DAS COBERTURAS VERDES	40
2.3.	ESTUDOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS.....	48
2.4.	MODELOS DE COBERTURAS VERDES.....	66
2.4.1.	O MODELO INTEGRADO AO ENERGYPLUS - SAILOR (2008).....	71
2.4.2.	O BALANÇO TÉRMICO DO MODELO.....	73
2.5.	CONCLUSÃO DA REVISÃO.....	78
3.	MÉTODO.....	81
3.1.	O MODELO DE TESTES SIMULADO.....	82
3.2.	AS COBERTURAS UTILIZADAS.....	84
3.3.	CLIMATOLOGIA E ARQUIVOS CLIMÁTICOS.....	87
3.4.	AS SIMULAÇÕES PARAMÉTRICAS.....	91
3.4.1.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	97
3.5.	SIMULAÇÕES EM DIFERENTES CLIMAS.....	98
3.5.1.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	102
3.6.	RESUMO DO MÉTODO.....	107
4.	RESULTADOS.....	108
4.1.	ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES PARAMÉTRICAS.....	108
4.2.	ANÁLISES DA 2ª ETAPA DE SIMULAÇÕES EM TRÊS CLIMAS DISTINTOS.....	117
4.3.	ANÁLISES DO BALANÇO TÉRMICO NOS TRÊS CLIMAS DISTINTOS	125
4.3.1.	ANÁLISE DO BALANÇO TÉRMICO DE BELÉM – PA.....	126
4.3.2.	ANÁLISE DO BALANÇO TÉRMICO DE CURITIBA – PR.....	130

4.3.3.	ANÁLISE DO BALANÇO TÉRMICO DE BRASÍLIA – DF	133
4.4.	ANÁLISES DO BALANÇO TÉRMICO EM DIAS ESPECÍFICOS.....	137
4.4.1.	DIA DE MAIOR CARGA TÉRMICA DE RESFRIAMENTO; BELÉM – PA	138
4.4.2.	DIA DE MAIOR CARGA TÉRMICA DE AQUECIMENTO; CURITIBA – PR.....	145
4.4.3.	PERÍODOS ANALISADOS PARA BRASÍLIA – DF	152
4.5.	ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO COM ISOLAMENTO	166
4.6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS RESULTADOS	170
5.	CONCLUSÃO	174
5.1.	LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	176
5.2.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	177
6.	REFERÊNCIAS	179
	APÊNDICE I	190

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comportamento térmico de uma cobertura fria e um exemplo comparativo com uma cobertura convencional. Fonte: Net Zero Energy Building (2016).....	30
Figura 2 – Disposição de camadas típicas de uma cobertura verde. Fonte: Adaptado de Eric Nagler < http://designroofs.com >.....	37
Figura 3 – Balanço térmico simplificado de uma cobertura verde.....	42
Figura 4 – Variação da evapotranspiração (ET) em função do conteúdo volumétrico de umidade (CVU). As áreas sombreadas correspondem aos períodos de ausência de radiação.....	45
Figura 5 – Temperaturas de superfície externa em um dia de verão em La Rochelle. Fonte: Jaffal et al. (2012).....	50
Figura 6 – Diagrama de refletâncias de diferentes materiais. Fonte: Gaffin et al (2005), adaptado de Centro de Energia Solar da Flórida.	51
Figura 7 – Temperaturas superficiais registradas nos dias: (a) frio de inverno; (b) ensolarado de inverno; (c) quente de verão em La Rochelle. Fonte: Jaffal et al. (2012).....	55
Figura 8 – Desempenho energético da casa geminada. Em destaque o desempenho das diferentes configurações de coberturas verdes. (A) Barcelona; (B) Palermo; (C) Cairo. Fonte: Zinzi e Agnoli (2012).....	65
Figura 9 – O balanço térmico na cobertura verde, segundo o modelo. Fonte: Sailor (2008).....	75
Figura 10 – Fluxograma que representa o resumo da metodologia da pesquisa.....	82
Figura 11 – Representação em 3D e da sala adiabática utilizada nas simulações.	83
Figura 12 – Perfil da cobertura utilizada para as configurações convencional e fria.....	86
Figura 13 – Perfil da cobertura verde utilizada.....	87
Figura 14 – Zoneamento bioclimático brasileiro com as cidades estudadas em destaque. Fonte: (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014).....	88

Figura 15 – Representação da evolução mensal das médias de temperaturas do ar e radiação solar incidente segundo os arquivos climáticos das três cidades.....	89
Figura 16 – Representação da evolução mensal das médias de umidade relativa do ar e precipitação segundo os arquivos climáticos das três cidades.....	90
Figura 17 – Fluxograma das simulações paramétricas e parâmetros alterados (I a V).	94
Figura 18 – Representação gráfica em 3D do modelo de cobertura verde.	99
Figura 19 – Representação gráfica em 3D do modelo de cobertura convencional.	101
Figura 20 – Representação gráfica em 3D do modelo de cobertura fria	102
Figura 21 – Esquematização do balanço térmico analisado na cobertura verde.....	103
Figura 22 - Esquematização do balanço térmico analisado nas coberturas convencional e fria.....	104
Figura 23 – Análise dos resultados variando o Índice de área foliar, distribuídos em quartis. A tabela abaixo apresenta os intervalos destacados.....	112
Figura 24 - Análise dos resultados variando a Espessura do substrato, distribuídos em quartis. A tabela mostra os intervalos destacados.....	113
Figura 25 - Análise dos resultados variando a Altura da vegetação, distribuídos em quartis. A tabela apresenta os intervalos destacados.....	115
Figura 26 - Análise dos resultados variando a Resistência estomatal, distribuídos em quartis. A tabela apresenta os intervalos destacados.....	116
Figura 27 - Análise dos resultados variando o Tipo de substrato, distribuídos em quartis. A tabela apresenta os intervalos destacados.....	117
Figura 28 – Histogramas de distribuição de frequências registradas, obtidos para cada cobertura simulada para a cidade de Belém-PA	122
Figura 29 - Resultados encontrados para os componentes que compõem o balanço térmico para a cidade de Belém – PA.....	127

Figura 30 - Resultados encontrados para os componentes que compõem o balanço térmico para a cidade de Curitiba – PR.....	131
Figura 31 - Resultados encontrados para os componentes que compõem o balanço térmico para a cidade de Brasília – DF.....	134
Figura 32 – Resumo do balanço térmico anual com seus respectivos valores sobre as representações gráficas, para os três climas.	137
Figura 33 – Perfis de temperaturas superficiais externas apresentados para o dia 24/10, Belém – PA.....	141
Figura 34 - Perfis de temperaturas da superfície interna da cobertura apresentados para o dia 24/10, Belém – PA	142
Figura 35 – Perfil do comportamento dos fluxos de calor por condução através da cobertura, para o dia 24/10, Belém – PA	143
Figura 36 - Perfil do comportamento das taxas de acúmulo de calor na cobertura, para o dia 24/10, Belém – PA	144
Figura 37 – Balanço térmico para os registros acumulados durante o período analisado, para o dia 24/10, Belém – PA	145
Figura 38 - Perfis de temperaturas da superfície externa apresentados para o dia 24/06, Curitiba – PR.....	148
Figura 39 - Perfis de temperaturas da superfície interna da cobertura apresentados para o dia 24/06, Curitiba – PR	149
Figura 40 - Perfil do comportamento dos fluxos de calor por condução através da cobertura, para o dia 24/06, Curitiba – PR.....	150
Figura 41 - Perfil do comportamento das taxas de acúmulo de calor na cobertura, para o dia 24/06, Curitiba – PR	151
Figura 42 - Balanço térmico para os registros acumulados durante o período analisado, para o dia 24/06, Curitiba – PR .	152
Figura 43 - Perfis de temperaturas da superfície externa apresentados para o período de 03–07 de fev. para Brasília – DF	158
Figura 44 - Perfis de temperaturas da superfície externa apresentados para o período de 09–13 de set. para Brasília – DF	158

Figura 45 - Perfis de temperaturas da superfície interna da cobertura apresentados para o período de 03–07 de fev. para Brasília – DF	159
Figura 46 - Perfis de temperaturas da superfície interna da cobertura apresentados para o período de 09–13 de set. para Brasília – DF	160
Figura 47 - Comportamento dos fluxos de calor por condução através da cobertura para o período de 03–07 de fev. para Brasília – DF	161
Figura 48 – Comportamento dos fluxos de calor por condução através da cobertura para o período de 09–13 de set. para Brasília – DF	162
Figura 49 - Comportamento do acúmulo de calor na cobertura para o período de 03–07 de fev. para Brasília – DF	163
Figura 50 - Comportamento do acúmulo de calor na cobertura para o período de 09–13 de set. para Brasília – DF	163
Figura 51 - Resultados das parcelas que compõem o balanço térmico para a cidade de Brasília – DF durante o período de 03–07 de fev.	165
Figura 52 - Resultados das parcelas que compõem o balanço térmico para a cidade de Brasília – DF durante o período de 09–13 de set.	166

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Benefícios das Coberturas Verdes. Fonte: Adaptado de Berardi et al. (2014).....	24
Quadro 2 - Possível classificação de coberturas verdes e seus principais atributos. Fonte: Adaptado de Berardi et al. (2014).....	38
Quadro 3 - Classificação de coberturas verdes conforme o design construtivo. Fonte: Berardi et al. (2014).....	40
Quadro 4 – Relação encontrada experimentalmente entre os fluxos que compõem o balanço térmico. Fonte: Tabares-Velasco e Srebic (2011).....	44
Quadro 5 – Resultados de consumos energéticos e temperaturas internas das simulações realizadas. Fonte: Jaffal et al. (2012).....	53
Quadro 6 – Temperaturas superficiais internas do experimento realizado por Lopes (2007).....	58
Quadro 7 – Resultados de desempenho energético da casa não geminada, para as três cidades simuladas. Fonte: Zinzi e Agnoli (2012).....	62
Quadro 8 – Revisão de modelos de coberturas verdes. Fonte: Adaptado de Djedjig et al. (2012).....	68
Quadro 9 – Principais características contabilizadas no modelo. Fonte: Sailor (2008).....	73
Quadro 10 – Propriedades térmicas dos materiais utilizados nas simulações.	85
Quadro 11 – Resumo estatístico obtido para os valores contidos nos arquivos climáticos.	91
Quadro 12 – Parâmetros de entrada do modelo, seus valores-padrão, típicos e os adotados na parametrização.....	92
Quadro 13 – Os três tipos de substratos utilizados. Fonte: Adaptado de Sailor (2008).....	96
Quadro 14 – Configuração da cobertura verde utilizada na 2ª etapa de simulações.....	100
Quadro 15 – Variáveis analisadas e respectivas variáveis de saída (outputs) solicitadas	105
Quadro 16 – Resultados e configurações de casos extremos dentre os valores testados na 1ª etapa.	109

Quadro 17 – Desempenho térmico da cobertura verde (CV) comparado à cobertura de fibrocimento (FC).	118
Quadro 18 – Desempenho térmico da cobertura verde (CV) comparado à cobertura fria (CF).	119
Quadro 19 – Horas de operação e picos de demanda do sistema de cargas térmicas ideais para os casos simulados... ..	121
Quadro 20 - Resultados compilados para o desempenho térmico das três coberturas simuladas nos três diferentes climas.	125
Quadro 21 – Resultados encontrados para os componentes que compõem o balanço térmico para a cidade de Belém – PA.....	126
Quadro 22 – Resultados de precipitação, <i>runoff</i> e evapotranspiração em metros, para o ano de simulação em Belém – PA.....	130
Quadro 23 – Resultados encontrados para os componentes que compõem o balanço térmico para a cidade de Curitiba – PR	131
Quadro 24 – Resultados de precipitação, <i>runoff</i> e evapotranspiração em metros, para o ano de simulação em Curitiba – PR	133
Quadro 25 – Resultados encontrados para os componentes que compõem o balanço térmico para a cidade de Brasília – DF.....	134
Quadro 26 – Resultados de precipitação, <i>runoff</i> e evapotranspiração em metros, para o ano de simulação em Brasília – DF.....	136
Quadro 27 – Dados meteorológicos do dia em questão e resultados de desempenho térmico em Belém – PA.....	139
Quadro 28 – Registros de máximas, médias e mínimas das temperaturas de superfícies, fluxos e calor acumulado (24/10, Belém – PA).....	140
Quadro 29 – Dados meteorológicos do dia em questão e resultados de desempenho térmico em Curitiba – PR	146
Quadro 30 – Registros de máximas, médias e mínimas das temperaturas de superfícies, fluxos e calor acumulado (24/06, Curitiba – PR).....	147
Quadro 31 – Dados meteorológicos representados nos dois períodos de simulação selecionados para análise em Brasília – DF	153

Quadro 32 – Desempenho térmico das três coberturas e comparações percentuais de redução (convencional) e acréscimo (fria) para os dois períodos analisados	154
Quadro 33 – Registros de máximas, médias e mínimas das temperaturas de superfícies, cargas térmicas e calor acumulado para os períodos analisados (Brasília – DF).....	156
Quadro 34 – Resultados compilados para o desempenho térmico das três coberturas simuladas com camada de isolamento.	167
Quadro 35 – Resultados do desempenho térmico da cobertura verde sem isolamento comparada às demais coberturas acrescidas da camada de isolamento	169

SIMBOLOGIA

Q_v	– fluxo de calor na camada de vegetação (W/m ²)
Q_s	– fluxo de calor na camada de substrato (W/m ²)
σ_v	– cobertura fracional de vegetação
σ	– constante de Stefan-Boltzmann (5,67 x 10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴)
I_s	– radiação incidente de ondas curtas (W/m ²)
I_{iv}	– radiação incidente de ondas longas (W/m ²)
α_v	– refletância da vegetação
α_s	– refletância do substrato
ϵ_v	– emissividade da vegetação
ϵ_s	– emissividade do substrato
ϵ_1	– $\epsilon_v + \epsilon_s - \epsilon_v \epsilon_s$ (fator relacionado a aproximação das trocas de calor por radiação entre a vegetação e o substrato)
T_v	– temperatura da vegetação (K)
T_s	– temperatura do substrato (K)
H_v	– fluxo de calor sensível na vegetação (W/m ²)
H_s	– fluxo de calor sensível no substrato (W/m ²)
L_v	– fluxo de calor latente na vegetação (W/m ²)
L_s	– fluxo de calor latente no substrato (W/m ²)
z	– espessura ou profundidade (m)
K	– condutividade térmica (W/m.K)

1. INTRODUÇÃO

Na maioria dos países, a utilização de energia nas edificações representa cerca de um terço do total consumido (EIA, 2013). Limitando-se ao consumo de energia elétrica esse total é ainda maior. Em 2010, nos Estados Unidos, aproximadamente 48% de toda energia produzida no país foi consumida pela operação de edifícios, correspondendo à de 75% da energia elétrica abastecida. Com isso, o setor foi responsável por 44,6% das emissões de CO₂ (EIA, 2013). Segundo a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD), nos países em desenvolvimento, o setor de edificações residenciais foi responsável por mais da metade do consumo total de energia elétrica (OECD, 2003). No Brasil, dos 615 TWh de energia elétrica disponibilizada em 2015, 223 TWh (36%) foram consumidos em edificações, com o setor residencial sendo responsável por 131 TWh (21%) e o comercial por 91,4 TWh (15%) (MME, 2016).

Uma parcela considerável deste consumo energético deve-se à utilização de sistemas de aquecimento e resfriamento. Segundo Poole e Geller (1997), em pesquisas realizadas utilizando-se de dados dos anos 80, os aparelhos de ar-condicionado eram responsáveis por 7% em média, do consumo total das edificações. Ghisi, Gosch e Lamberts (2007), em uma pesquisa espacialmente e quantitativamente significativa, analisaram, em doze estados, o uso final da energia elétrica em residências brasileiras. Foram detectadas diferenças significativas no uso final de energia residencial entre cidades localizadas nas oito zonas bioclimáticas. Este fato demonstra que as características climáticas locais exercem forte influência no consumo de energia por parte das edificações. A parcela de energia elétrica destinada aos aparelhos de ar-condicionado correspondeu, em média, a 10% do consumo total da energia elétrica nas residências brasileiras. No período do verão, esta parcela é mais significativa, correspondendo de 2 a 27% do (16% em média) do consumo de energia. No período de inverno, esta parcela reduziu-se, correspondendo de 0 a 7% (2% em média). Com isso, os autores concluem que os crescentes gastos energéticos com aparelhos de ar condicionado, em especial no período de verão, são motivos de grande preocupação. Portanto,

este é um campo que deve receber maior atenção dos estudos e políticas propostas. Ressalta-se este fato para zonas que apresentem maiores demandas de resfriamento, pois o percentual de residentes que possuem aparelhos de ar condicionado em casa, ainda é baixo (3 a 11% em 2007) (GHISL; GOSCH; LAMBERTS, 2007).

Devido a fatores que derivam dos padrões de crescimento econômico e espacial das cidades, estudos atestam que a demanda de energia consumida tende a um crescimento proporcionalmente superior ao crescimento populacional (BERARDI, 2013). Assim, entende-se que o aumento do consumo de energia para resfriamento é uma fonte de preocupação não só para países que possuem condições climáticas quentes como também cidades que sofrem com os efeitos térmicos proporcionados pelo adensamento urbano. Áreas urbanas adensadas apresentam temperaturas do ar maiores que em suas zonas periféricas, este fenômeno é conhecido como de ilha de calor urbana. O efeito ocorre como resultado de mudanças graduais nas superfícies, materiais e estilos construtivos utilizados na urbanização, o que inclui a substituição da vegetação natural por edificações e vias pavimentadas. As superfícies das edificações e pavimentações absorvem a radiação solar e com isso, elevam-se as temperaturas superficiais, o que torna o ar circundante mais quente e acarreta em maior emissão de radiação de ondas longas ao nível do solo. Áreas pavimentadas não recebem o efeito natural de resfriamento proporcionado pela vegetação, que ocorre em áreas verdes. O aumento da temperatura do ar no ambiente urbano eleva tem como consequência a elevação da demanda de cargas térmicas de resfriamento em ambientes artificialmente condicionados (AKBARI; KONOPACKI, 2005).

Santamouris et al. (2001), em estudo realizado em Atenas, demonstraram experimentalmente efeitos do clima urbano sobre o consumo energético das edificações. A metodologia do estudo consistiu em análises de um ano de medições de temperatura, realizadas por 30 estações de medição, distribuídas por toda área urbanizada. Uma estação periférica serviu de referência. Foram estudadas como variáveis a densidade da urbanização e a presença, ou não, de áreas verdes. Os dados foram alvo de uma análise espacial em graus-hora para aquecimento e resfriamento. A média resultante de diferenças de temperaturas

do ar externo para a estação referência foi de 10°C, com máxima de 15°C. A partir de medições de referência de um edifício real monitorado foram realizadas simulações computacionais que demonstrassem as variações na demanda energética com e sem a presença do efeito de ilha de calor urbana, nos locais de medição. Em função da elevação da temperatura do ambiente externo, no período de verão, as cargas térmicas de resfriamento da edificação simulada chegaram a dobrar, e os picos da demanda triplicaram em alguns locais. No período de inverno houve um aumento de até 30% nas cargas térmicas de aquecimento.

A análise dos dados registrada nas áreas verdes monitoradas no meio urbano indica a existência do efeito de resfriamento proporcionado pela vegetação. Os autores concluem que nessas áreas, o efeito de ilha de calor se inverte em noites quentes do verão. As temperaturas das áreas verdes se apresentam ainda mais baixas que as das zonas suburbanas periféricas e a estação referência. Por outro lado, isso acarreta em possíveis aumentos de cargas térmicas de aquecimento nestas regiões durante o período de inverno (SANTAMOURIS et al., 2001). As conclusões do estudo são interessantes, pois, o Brasil é um território que apresenta altos índices de incidência solar, e possui maiores demandas de resfriamento do que aquecimento. Com 18°C de média de temperatura anual, o clima de Atenas só é comparável no Brasil, ao subtropical que ocorre na região Sul (médias anuais próximas de 18°C) ou ao tropical de altitude (ocorre no Sudeste), que apresenta médias anuais entre 17 e 22°C (FREITAS, 2016). Os demais climas brasileiros apresentam médias anuais mais elevadas, resultando em maiores possibilidades de sofrerem os efeitos desfavoráveis das ilhas de calor. Destaca-se para este trabalho, o aumento das cargas térmicas de resfriamento necessárias na operação das edificações.

A envoltória das edificações é onde ocorrem as interações com o ambiente externo. As características climatológicas representam a maior parte da contribuição nos fluxos de calor para dentro e fora da edificação. Há um grande potencial de redução de consumo energético a partir de modificações das estruturas e estilos construtivos das envoltórias das edificações. Particularmente, entre os componentes da envoltória, as coberturas foram identificadas como uma estrutura em que

intervenções podem contribuir significativamente para essa redução (PEREZ et al., 2012; GAGLIANO et al., 2015; SANTAMOURIS, 2012).

Al-Sanea (2012) estudou matematicamente a evolução do desempenho térmico da cobertura de edificações e o balanço térmico de três variáveis meteorológicas: radiação solar, radiação eletromagnética de ondas longas e temperatura externa. Conforme esperado, a fonte dominante de energia que resulta em ganhos de calor através da cobertura, foi a radiação solar. De forma geral, as trocas por radiação de ondas longas com o céu representaram mais que o dobro das trocas por convecção, a partir das alterações de temperatura superficial.

Resultados indicam que entre 19 e 25% das áreas metropolitanas são coberturas de edificações, 29 a 39% são superfícies pavimentadas e as áreas verdes cobririam de 20 a 37% das áreas. Akbari e Rose (2008) determinaram estes dados a partir de uma determinada metodologia aplicada à ortofotos coloridas de alta resolução. Foi analisada a distribuição do tipo de superfície das áreas metropolitanas em quatro cidades americanas (Chicago, Houston, Sacramento e Salt Lake). Os autores recomendam a utilização de estratégias de aumento de albedo das coberturas, pelo potencial de amenizar as temperaturas do ambiente urbano e minimizar a absorção da radiação solar.

Uma estimativa do efeito de três diferentes estratégias de redução das temperaturas de ambientes internos sobre o consumo energético de aquecimento e resfriamento em edificações foi realizado por Akbari e Konopacki (2005). Foram elas: (a) Uso de coberturas frias, com $\alpha=0,8$ (considerado um efeito direto); (b) Posicionamento de indivíduos arbóreos caducifólios para efeitos de sombreamento (também considerado um efeito direto); (c) A arborização do ambiente urbano aliado à utilização de superfícies e pavimentações refletivas (consideradas um efeito indireto). Uma quarta alternativa, que foi a combinação de todas as alternativas, também foi avaliada. A metodologia consistiu em cinco etapas: Definição de protótipos, simulações do consumo energético, determinação dos efeitos diretos de cada estratégia, determinação dos efeitos indiretos e sumarização em agrupamentos de resultados para fácil interpolação. Mais de 300 cidades americanas foram alvo de simulações. Os resultados foram tabelados para possibilitar a

consulta de estimativas do potencial de redução de consumo energético de cada estratégia, em uma determinada cidade. Esta consulta poderia ser realizada a partir de três variáveis de fácil obtenção: graus-dia de resfriamento ou aquecimento, temperatura anual média e latitude.

Ressalta-se a devida cautela para se analisar os resultados obtidos, pois estes levam em conta muitas das características de climatologia, estilos construtivos e matriz energética local. Entretanto, nota-se que o potencial de impacto dos efeitos indiretos (c) não passou de 30% em nenhuma ocasião. Soma-se a este fato, que tal valor foi registrado quando o modelo de simulação contabilizava o cenário irrealista de 100% da superfície urbana dotada de alta refletância ($\alpha=0,8$). Isto possibilita a conclusão de que, considerado apenas o aspecto energético, melhores resultados podem ser obtidos pela intervenção direta sobre as edificações quando comparadas as intervenções voltadas às melhorias do entorno ou ambiente externo. Entre os efeitos diretos avaliados, a utilização de coberturas frias (a) demonstrou maior potencial quando comparada ao plantio de árvores no entorno (b) (AKBARI; KONOPACKI, 2005).

As simulações realizadas com edificações com estilos construtivos mais antigos (protótipo Pré-1980) indicaram que edifícios sem (ou com baixo nível de) isolamento sofreram maior impacto das estratégias de redução de consumo. O protótipo mais atual (Pós-1980), equipado com maior nível de isolamento, mostrou menor influência das estratégias no desempenho. Ressalta-se também, o fato de que as maiores reduções foram obtidas nas edificações residenciais, quando comparadas as tipologias de edificações comerciais e de escritórios.

Destaca-se que as aplicações das tecnologias para redução de consumo energético levaram ao aumento da demanda de aquecimento em diversos casos. Estes efeitos foram maiores nas cidades de climas frios e temperados, o que é diferente da realidade da maioria das cidades brasileiras. Com a exceção das capitais da região sul (Florianópolis, Curitiba e Porto Alegre), as demais capitais brasileiras se situariam no agrupamento apresentado como o de maior potencial de redução das demandas de resfriamento, em uma análise de graus-dia de resfriamento a partir do valor referência ($18,3^{\circ}\text{C}$) utilizado no estudo (WEATHER UNDERGROUND, 2016).

Um estudo foi realizado para determinar a importância da fração da envoltória que corresponde à cobertura, para edificações dotadas de coberturas verdes. Martens, Bass e Alcazar (2008), realizaram simulações computacionais no programa ESP-r, para o período de verão na cidade de Toronto. Os resultados indicam que quanto maior a relação cobertura-envoltória, maior o consumo energético de resfriamento, para ambas os tipos de coberturas usadas como referência (uma cobertura verde e uma cobertura metálica com isolamento). Entretanto, a redução de consumo obtida com a utilização da cobertura verde é proporcionalmente maior, com o aumento da relação cobertura-envoltória da edificação. Para as edificações de dois e três andares, o aumento da relação cobertura-envoltória aproximou o consumo do andar superior aos dos demais andares. Esta homogeneização do desempenho térmico de cada andar é alcançada com valores menores da relação cobertura-envoltória. Isso ocorre devido ao fato de que as coberturas verdes estão menos sujeitas às oscilações diárias de temperaturas e aos fluxos de calor induzidos pelas variações e pico de radiação solar durante o dia.

Conclui-se que coberturas são espaços apropriados para a utilização de técnicas que busquem a economia de energia nas edificações. Além da utilização de camadas de isolamento na cobertura, duas tecnologias são frequentemente discutidas na literatura: as que buscam aumentar o albedo (coberturas frias ou refletivas) e as que propõem a cobertura total ou parcial da área com vegetação, as chamadas coberturas verdes (SANTAMOURIS, 2012). Estas são o objeto maior de estudo do presente trabalho. As coberturas frias são apresentadas de forma sucinta, por servirem apenas de referência comparativa no desenvolvimento desta pesquisa. Posteriormente, as coberturas verdes são apresentadas em maiores detalhes.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é a análise do desempenho térmico de uma cobertura verde, comparado a uma

cobertura convencional de fibrocimento, através de simulações computacionais, em três cidades brasileiras.

1.1.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos são citados:

- Analisar a sensibilidade dos parâmetros de entrada do modelo de coberturas verdes integrado ao *EnergyPlus*.
- Compreender e analisar o balanço térmico nas coberturas verdes segundo o modelo.
- Analisar o comportamento das coberturas em períodos específicos para cada cidade.
- Analisar a influência da adição de uma camada de isolamento ao modelo utilizado.

1.2. Justificativa

Coberturas verdes comumente são consideradas uma solução valiosa e inovadora para o problema atualmente enfrentado de escassez de áreas verdes em áreas urbanizadas. Apesar disso, registros da presença de coberturas vegetadas datam épocas tão antigas quanto 600 a.C., pois os Jardins Suspensos da Babilônia, uma das Sete Maravilhas do Mundo Antigo, seriam um exemplo de uma cobertura verde do tipo “intensiva” (KÖHLER et al., 2002). Estruturas deste tipo são encontradas em registros de civilizações da antiga Mesopotâmia, Romanos e povos Nórdicos, dentre outros (SHIMMY, 2012).

Com o advento da intensificação da urbanização, coberturas verdes foram reintroduzidas nas discussões sobre diversos aspectos das cidades, com arquitetos e engenheiros da Europa e Estados Unidos, propondo esse tipo de cobertura como forma de reintegrar as edificações ao ambiente natural. Nos anos 70, além dos Países Escandinavos, França, Suíça e principalmente a Alemanha, tomaram frente na utilização de coberturas verdes, onde Estados Unidos e Canadá não demoraram a se juntar. Esta evolução, em ritmo cada vez maior até hoje, se reflete no fato do Japão recentemente ter indicado a utilização deste tipo de cobertura como primordial para o

amortecimento das ilhas de calor e a promoção de edifícios sustentáveis (BERARDI, 2013).

Somados aos aspectos energéticos que serão posteriormente discutidos detalhadamente por ser o objeto de trabalho deste estudo, as coberturas verdes possuem o potencial de oferecer uma série de benefícios multidisciplinares para a edificação e o ambiente em que estão inseridas.

O principal destes efeitos é o potencial de retenção das águas pluviais. As coberturas verdes não só reduzem o volume escoado para os sistemas de drenagem das cidades, como corroboram na amortização da vazão de pico, permitindo melhoras em situações urbanas onde chuvas intensas possam causar inundações e o menor dimensionamento dos sistemas de drenagem urbanos quando na fase de planejamento (SIMMONS et al., 2012).

Outros efeitos já pesquisados e comprovados das coberturas verdes são a melhora da qualidade do ar no ambiente urbano (YANG et al., 2008), o aumento da vida útil da laje da cobertura pelo efeito de proteção superficial (TEEMUSK; MANDER, 2009), isolamento acústico e absorção de ruídos do ambiente urbano (YANG et al., 2012). Efeitos ecológicos como a redução da perda de habitats e aumento da biodiversidade do ambiente urbano também foram estudados (BAUMANN, 2006; FRANCIS; LORIMER, 2011). As coberturas verdes provêm à oportunidade de reintegrar espaços da cidade tipicamente inutilizados e os demais benefícios podem incluir aumento do interesse estético na integração entre as coberturas verdes e o ambiente natural (KÖHLER, 2003). Há também a influência positiva da exposição visual à espaços comuns dotados de vegetação, sobre a saúde e bem-estar humanos (BELL et al., 2014). Alguns dos diversos benefícios citados por Berardi et al. (2014), em uma extensa revisão do estado da arte desta tecnologia, estão no Quadro 1 à seguir. Pode-se concluir que as coberturas são importantes componentes da edificação para a aplicação de práticas que busquem a melhor eficiência da mesma, como também para melhorar a qualidade do ambiente urbano em que está inserida (GETTER; ROWE, 2006).

Quadro 1 - Benefícios das Coberturas Verdes. Fonte:
Adaptado de Berardi et al. (2014)

Benefícios Ambientais relacionados a utilização das Coberturas Verdes
Redução de consumo energético
Melhor comportamento das temperaturas internas
Redução das demandas de aquecimento e resfriamento
Redução do efeito de ilha de calor urbana
Melhora do microclima circundante (COP A/C)
Otimização do desempenho de Painéis Fotovoltaicos
Aumento da vida útil das lajes de cobertura
Redução da pegada de carbono
Redução da poluição do ar
Isolante acústico
Redução dos níveis de ruído do ambiente urbano
Redução das descargas pluviais
Mitigação da vazão de pico do sistema de drenagem urbano
Redução da perda de habitats e biodiversidade urbana
Paisagismo favorável à saúde e bem-estar social

Uma quantificação bibliométrica foi feita em 2013, para analisar a frequência e a distribuição espacial das publicações a respeito de coberturas verdes no meio acadêmico internacional. Após raras aparições nos anos 60 e 70, até 1992 apenas quatro publicações eram listadas. O número de publicações cresceu rapidamente, atraindo grande atenção, a partir dos anos 90. Somente durante ano de 2012, o último avaliado, alcançou-se a

marca de 74 publicações. Há ênfase nos aspectos das pesquisas relacionadas à engenharia (arquitetura e construção), representando cerca de 40% do total das publicações. Uma análise espacial sugere que os dois maiores contribuintes são Estados Unidos (com 34% das publicações) e os Países da União Europeia (33%) (BLANK et al., 2013). Os resultados retratam que a maioria dos estudos historicamente concentrou-se regiões de clima temperado.

Sproul et al. (2014), em estudo de análise de custo de ciclo de vida envolvendo coberturas verdes e frias, do *Lawrence Berkeley National Laboratory*, concluíram que a escolha entre coberturas frias ou verdes extensivas, deve ser orientada pelas “preocupações” ambientais e sociais do projetista responsável. Se o aquecimento global for o fator em questão, coberturas frias serão, segundo esse estudo, até três vezes mais eficientes. Há de se considerar que é levada em conta a matriz energética americana, que difere significativamente da brasileira. Por outro lado, se o ambiente local em menor escala é o interesse primário, as coberturas verdes seriam a preferência. É evidente que o manejo de águas pluviais urbanas é um fator decisivo em favor das coberturas verdes neste aspecto. Em termos de custo, as coberturas verdes chegaram a custar quatro vezes mais que as coberturas frias, em análises de 50 anos de uso, incluindo o consumo energético. Apesar das diversas vantagens já mencionadas, o alto custo inicial é o ponto mais desfavorável na opção pelas coberturas verdes. Este pode ser mais de três a seis vezes o custo inicial de um telhado convencional (SAADATIAN et al., 2013). Berardi et al. (2014) citam o fato de que ainda são escassas as análises de ciclo de vida e de custo de ciclo de vida. Eventualmente, novos estudos apresentarão informações que apoiem e facilitem as decisões entre tipos de coberturas.

O desempenho energético de coberturas verdes é um assunto que tem ganhado muito espaço nos anos recentes. Diversos trabalhos experimentais e baseados em simulações a partir de modelos computacionais estão disponibilizados na literatura. Apesar da notável importância deste campo de estudo, ainda existem espaços a serem preenchidos, em especial no que diz respeito aos estudos mais detalhados, envolvendo parâmetros ou condições climáticas específicas (SANTAMOURIS, 2005, 2014; ASCIONE et al., 2013).

Dentre diversos autores que apresentam conclusões satisfatórias em estudos sobre coberturas verdes, Simmons et al. (2008) concluem que o conjunto de benefícios oferecidos pelas coberturas verdes extensivas possui grande potencial para regiões de climas com altas temperaturas e índices de pluviosidade.

Um estudo interessante apresentado em Alexandri e Jones (2008) demonstra a capacidade das coberturas verdes de amenizar a temperatura do ar circundante amortizando o efeito de ilha de calor urbana, em algumas grandes cidades do mundo. Este efeito foi maior em cidades quentes como Bombaim, na Índia, e Riad, na Arábia Saudita, e menor em cidades frias, como Londres e Moscou. As coberturas verdes quando comparadas às coberturas frias, refletem menos radiação de ondas curtas. Em cânions urbanos isso evita múltiplas reflexões, que ao incidir em outras superfícies, são absorvidas. Por transformarem parte do calor absorvido, em calor latente, através da evapotranspiração, a temperatura da superfície das coberturas verdes pode manter-se baixa mesmo com valores de absorvância elevados.

Scherba et al. (2011) encontrou resultados semelhantes através de modelagens computacionais. Nesse estudo também se avaliou o desempenho de diferentes coberturas, integradas a painéis fotovoltaicos. Coberturas verdes e frias amenizam as temperaturas superficiais da cobertura. Com isso, proporcionam redução considerável também nas temperaturas superficiais dos painéis fotovoltaicos. Auxilia-se assim o funcionamento, por mantê-los em temperaturas mais próximas das faixas ideais de operação. Evita-se também, a exposição às grandes oscilações de temperatura que desgastam e reduzem a vida útil dos mesmos (CHEMISANA; LAMNATOU, 2014). De forma geral, os benefícios e impactos de coberturas verdes estão intrinsecamente relacionados com os objetivos de tornar as edificações e as cidades mais sustentáveis (BERARDI et al., 2014).

Segundo Saadatian et al. (2013), coberturas verdes possuem a vantagem de proporcionar possibilidades de grandes economias de energia para resfriamento, devido à sua grande massa e inércia térmica, quando em condições favoráveis, e combater os efeitos de ilha de calor urbana. Em menor escala, também contribui o fato de emitirem menos radiação de onda longa que coberturas convencionais. As coberturas verdes reduzem a temperatura ambiente de dia e à noite, auxiliam os

processos que visam o conforto térmico dos ocupantes por oferecer trocas térmicas mais amenas e homogêneas. Entretanto, a redução de consumo de energia que uma cobertura verde pode proporcionar está sujeita a vários parâmetros como: o entorno, a tipologia, propriedades térmicas dos materiais da cobertura, e características variadas como a densidade e o teor de umidade do substrato utilizado, a energia despendida para manutenção e irrigação, fatores meteorológicos como níveis de radiação solar incidente, exposição aos ventos, precipitação e umidade do ar do local. As características fisiológicas da vegetação influenciam diretamente a eficiência do sistema (SAADATIAN, 2013). Portanto, para que se busque a melhor compreensão do desempenho térmico das coberturas verdes, pesquisas fazem-se necessárias. Entender o balanço térmico das coberturas verdes e os aspectos climáticos envolvidos pode ser útil na busca pela maior eficiência energética das edificações.

1.3. Estrutura do trabalho

A dissertação é apresentada em cinco capítulos. Introdução, revisão bibliográfica, o método da pesquisa e os resultados. Por fim as conclusões do estudo. Na introdução são apresentados os temas do trabalho, focando em discussões atuais e são apresentadas as devidas justificativas. Neste capítulo também se definem os objetivos da dissertação e sua estrutura de apresentação.

Na revisão bibliográfica, primeiramente são comentados brevemente os aspectos do desempenho térmico das coberturas frias. De forma mais ampla, são apresentadas as coberturas verdes, por serem o objeto de estudo desta pesquisa. São discutidos os impactos da utilização de coberturas verdes sobre o desempenho térmico de edificações e o balanço térmico da cobertura, através da revisão de literatura. O modelo matemático de coberturas verdes utilizado na pesquisa é então apresentado.

O terceiro capítulo apresenta o método utilizado na pesquisa, que foi baseado em simulações computacionais em três diferentes cidades. São descritos nesse capítulo, as etapas e os detalhes das simulações, suas formas de análise, o clima das cidades e os tipos de cobertura utilizados. Portanto, definem-se

também os parâmetros de entrada e variáveis de saída do programa utilizado.

O quarto capítulo compreende a apresentação, análise e discussão dos resultados das simulações, contextualizando-os dentro dos aspectos apresentados na revisão bibliográfica e das propostas discutidas no método, em especial a comparação entre os tipos de cobertura e a influência dos climas. Por fim, são tecidas conclusões a respeito dos resultados.

O quinto capítulo apresenta as conclusões que dizem respeito à realização da pesquisa como um todo. Nesse capítulo também são discutidas as limitações do estudo e as recomendações para futuros trabalhos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas as investigações realizadas na literatura disponível pela fundamentação teórica voltada ao desenvolvimento da pesquisa. Primeiramente, na seção 2.1 são considerados trabalhos que atestam os efeitos da utilização das coberturas brancas ou frias como tecnologia para a redução do consumo energético das edificações e a influência do clima em seu desempenho.

Após a devida diferenciação entre as estratégias, na seção 2.2 apresenta-se e aprofunda-se a pesquisa a respeito das coberturas verdes. Primeiramente são apresentadas as classificações e uma visão geral. Posteriormente, são discutidos os aspectos energéticos e o balanço térmico, e apresentados trabalhos sobre o desempenho térmico e energético das coberturas verdes, entre estudos experimentais e os realizados através de simulações computacionais.

Sequencialmente, na seção 2.3 são apresentados aspectos de diferentes modelos matemáticos para coberturas verdes presentes na literatura. Por fim é apresentado o modelo que integra a ferramenta computacional (*Energy Plus*) utilizada no desenvolvimento desta pesquisa. A seção 2.4 apresenta a síntese do capítulo de revisão da literatura.

2.1. Aspectos energéticos das coberturas frias

A utilização das chamadas coberturas frias é uma forma relativamente barata, passiva e eficiente de redução de consumo energético em ambientes condicionados ou de redução de horas de desconforto e temperaturas máximas internas atingidas em ambientes não condicionados (SYNNEFA; SANTAMOURIS; AKBARI, 2007; STAVRAKAKIS; ANDROUTSOPOULOS; VYÖRYKKÄ, 2016). A tecnologia apresentada pelas coberturas frias é caracterizada por dois fatores chave: a alta refletância solar de suas superfícies e a alta emissividade térmica dos materiais que as compõem. O comportamento térmico é otimizado de forma através de duas propriedades térmicas (apresentados na Figura 1, à esquerda). Um deles é a alta

refletância dos materiais, que expressa a sua característica de refletir a maior parte da radiação solar incidente durante o dia (PISELLO; COTANA, 2014). A outra propriedade é a alta emissividade permite que os materiais liberem através de trocas radiativas de ondas longas o calor armazenado nas estruturas, principalmente durante o período noturno (ZINZI; AGNOLI, 2012). Este efeito é conhecido como resfriamento radiante. Ambas as características permitem que as temperaturas superficiais externas se mantenham mais baixas reduzindo a transferência de calor através das coberturas para dentro das edificações, quando comparadas às mesmas coberturas desprovidas de alta refletância (AKBARI et al., 2005).

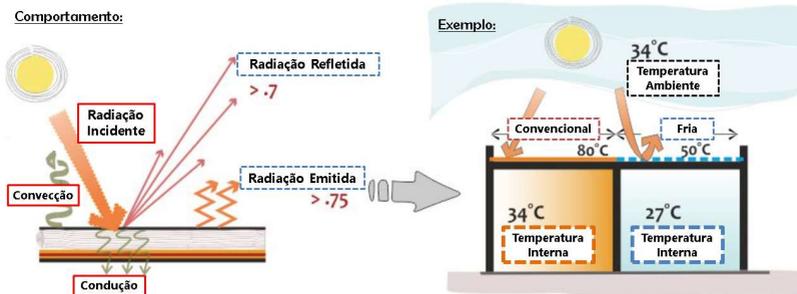


Figura 1 – Comportamento térmico de uma cobertura fria e um exemplo comparativo com uma cobertura convencional. Fonte: Net Zero Energy Building (2016)

A alta refletância é comumente obtida através da aplicação de pinturas brancas ou refletivas ou utilizando-se de materiais naturalmente dotados de cor clara. Os valores de albedo considerados para esse tipo de cobertura situam-se entre 0,75 e 0,90 (SANTAMOURIS, 2014). Em respeito ao conceito de materiais frios, é importante notar que a alta refletância (que se refere ao espectro solar visível) não implica necessariamente em um alto albedo, pois a radiação visível representa somente a aproximadamente 46% da radiação que atinge a superfície do planeta, com 43% correspondendo ao espectro infravermelho. Ainda que a tendência das cores claras seja a de também possuir considerável refletividade para a faixa do espectro infravermelho, é possível que materiais com menores refletâncias atinjam maiores albedos devido ao desempenho diferenciado

nesta faixa. Um exemplo deste fato foi experimentalmente demonstrado por Prado e Ferreira (2005), onde a cerâmica vermelha apresentou maior albedo que o fibrocimento (0,67 e 0,39 respectivamente), apesar da menor refletância do espectro luminoso visível (0,33 e 0,36 respectivamente).

A alta emissividade, de forma geral, pode ser obtida com uma simples aplicação de uma pintura, ou pela própria natureza do material. Altos níveis de emissividade só não são obtidos com a utilização de superfícies metálicas polidas. No caso da utilização destes materiais de baixa emissividade na superfície da cobertura, o calor acumulado na estrutura ou no interior da edificação, não é facilmente retransmitido para a atmosfera. Para Prado e Ferreira (2005) estes materiais devem ser desqualificados como “frios”, devido à emissividade ser decisiva na diminuição da temperatura superficial do material, e com isso, somente as perdas por convecção, tendem a não ser suficientes para resfriá-los.

Ambos os comportamentos térmicos supracitados permitem a redução das cargas térmicas de resfriamento utilizadas nos sistemas de condicionamento de ar dos ambientes internos, porém também podem acarretar na maior demanda de cargas térmicas de aquecimento devido às facilidades em ser retirado o calor dos ambientes internos (ZINZI; AGNOLI, 2012; VIRK et al., 2015; SANTAMOURIS, 2014; PISELLO; COTANA, 2014; STAVRAKAKIS, ANDROUTSOPOULOS E VYÖRYKKÄ, 2016). Portanto conclui-se que a aplicação desse tipo de cobertura é mais eficiente onde o objetivo seja o de reduzir os ganhos de calor nos períodos mais quentes do ano, de forma que, estes ganhos não sejam compensados pelo aumento de consumo para aquecimento, possível de ser registrado nos períodos mais frios.

Cheng e Givoni (2005) estudaram experimentalmente os efeitos da coloração das superfícies da envoltória de módulos de testes em clima quente e úmido (Hong Kong). Para a construção considerada leve (*light concrete*), a diferença entre temperatura máxima do ar interno entre os módulos preto e branco foi de 12°C. As temperaturas registradas no interior da célula branca foram somente de 2 a 3°C maiores que as temperaturas do ar externo. Este estudo corrobora a avaliação de numerosos estudos que atestam que as estratégias de aumento de albedo são particularmente eficientes em climas quentes.

Shariah et al. (1998) estudaram na Jordânia os efeitos da refletância das superfícies externas no consumo energético de edificações residenciais, através de simulações no programa TRNSYS. Dois climas foram simulados, um considerado ameno (Amam) e um quente (Aqaba). Alterando o valor de refletância de 0 para 1, as reduções obtidas foram de 32% (sem isolamento) e 26% (com isolamento) para o clima ameno. Para o clima mais quente, reduções mais expressivas foram alcançadas. Para o edifício sem isolamento foram obtidos 47% (sem isolamento) e 32% (com isolamento) de redução no consumo total. O consumo de aquecimento pouco foi impactado. Dentre as superfícies analisadas, a cobertura apresentou influência e potencial de reduções superiores às das quatro paredes somadas.

Synnefa, Saliari e Santamouris (2012) investigaram computacionalmente o impacto energético da utilização de coberturas frias em uma escola em Atenas. Através de medições experimentais realizadas no edifício real, um modelo computacional foi validado, e após a sua calibração foram simulados no programa TRNSYS alguns cenários. Nestes foram aplicadas pinturas elastoméricas que proporcionariam uma refletância de 0,89 para a cobertura, e a utilização (ou não) de 5cm de camada isolante na cobertura. Os resultados apresentaram reduções máximas de 1,5 a 2,8°C da temperatura do ambiente interno no verão, e 0,5°C no inverno. O consumo energético foi impactado em 40% de redução no edifício sem isolamento e 35% no edifício isolado. Estes benefícios foram grandes, quando comparados às penalidades impostas pelo aumento do consumo de aquecimento. Este aumento foi de 10% para o edifício sem isolamento e de 4% para o edifício isolado. As temperaturas atingidas na superfície externa da cobertura se reduziram em até 25°C. A não exposição da cobertura a grandes variações de temperatura proporcionam também uma vida útil mais longa da mesma.

Synnefa, Santamouris e Akbari (2007) realizaram uma extensa investigação para analisar a influência dos efeitos de variações na refletância e resistência térmica de coberturas frias, sobre o desempenho energético. Foram realizadas simulações paramétricas de um modelo residencial, em 27 cidades situadas entre as faixas de latitude 19° e 42° em ambos os hemisférios. Diferentes climas foram representados, variando entre

mediterrâneo, continental úmido, subtropical árido e climas desérticos dentre outros, com a exceção de climas frios.

Dependendo da localidade, os resultados demonstraram que os aumentos de refletância de 0,65 (de 0,2 para 0,85) proporcionaram reduções do consumo anual de resfriamento na faixa de 9 a 48 kWh/m², representando 18 a 93% do total. Os benefícios obtidos com a utilização da cobertura fria superaram os efeitos negativos, onde o aumento do consumo de aquecimento representou somente de 0,2 a 17 kWh/m². O pico da demanda de resfriamento foi reduzido em 11 a 27%. As horas de desconforto do ambiente interno decresceram de 9 a 100% e as reduções de temperaturas internas foram de 1,2 a 3,3°C, no caso das edificações não condicionadas artificialmente. As reduções mais expressivas foram obtidas em edifícios sem isolamento. Por fim constata-se que para ambas as alterações, de refletância e resistência térmica da cobertura testada, os resultados de redução de consumo de resfriamento obedeceram a uma relação linear em todas as cidades simuladas. Os autores tecem conclusões positivas a respeito da utilização das coberturas frias (SYNNEFA; SANTAMOURIS; AKBARI, 2007).

Também em Atenas, Stavrakakis, Androutsopoulos e Vyörykkä (2016), analisaram computacionalmente o desempenho energético e o conforto térmico de uma zona térmica com uma cobertura fria através de simulações dinâmicas em modelo validado experimentalmente. No período anual de simulação, duas condições de verão foram analisadas, sendo elas com e sem condicionamento artificial. No caso do edifício não condicionado, o consumo de energia utilizado na ventilação foi reduzido em 25% e as horas de conforto térmico dos ocupantes apresentaram um aumento de 3%. Para o ambiente condicionado as reduções de consumo de resfriamento foram de, ao menos 18%, compensando os aumentos de consumo de aquecimento que corresponderam a no máximo 12%. Os autores concluem que a cobertura fria é uma solução eficiente para este caso, pois provê melhoras para o conforto térmico de verão e garante economias de energia no período anual.

Akbari et al. (1997), através de medições experimentais em edifícios residenciais na cidade de Sacramento, Califórnia, obtiveram como resultados até 80% (2,2 kWh/dia) de redução na demanda de resfriamento em edificações sem isolamento, com a simples mudança da refletância das coberturas de 0,18 para

0,73. Após os procedimentos experimentais os edifícios foram modelados com o programa DOE-2.1E. Os resultados encontrados atestam que as simulações computacionais subestimaram os efeitos de economia de energia e amortização dos picos de demanda de resfriamento em até duas vezes. Os modelos atuais evoluíram, e não apresentam as mesmas imprecisões, entretanto este fato demonstra que se deve avaliar com cautela os resultados de simulações obtidos em climas que não são exclusivamente quentes. Isto porque, analogamente ao fato constatado, os aumentos de cargas térmicas necessárias no período de aquecimento também podem ser subestimados.

Apresentados alguns trabalhos a respeito do desempenho energético / térmico das coberturas frias, pode-se concluir que, apesar de depender das demais características da edificação, a utilização deste tipo de cobertura apresentará resultados satisfatórios, se o objetivo for a redução do consumo de resfriamento. Quando expostas a climas mais quentes (e até mesmo subtropicais) estas vantagens tendem a superar a possível desvantagem existente, que é o aumento das necessidades de aquecimento. Deve-se atentar para situações em que há a ausência de isolamento térmico, apesar de serem demonstrados benefícios mesmo na utilização conjunta da cobertura fria com isolamento. Esta é uma abordagem interessante para residências brasileiras localizadas nas zonas bioclimáticas de climas tropicais, e que tipicamente não possuem isolamento.

As coberturas frias representam um campo crescente e extensamente estudado nas últimas décadas, com novos trabalhos constantemente sendo publicados. Estes trabalhos por vezes comparam a utilização das coberturas frias com as coberturas verdes, sob o mesmo ponto de vista. Na seção 2.4, após a devida apresentação das coberturas verdes, alguns destes trabalhos são apresentados.

2.2. Coberturas verdes

Nesta seção são apresentadas e discutidas as coberturas verdes. Primeiramente é apresentada uma visão geral da tecnologia e suas classificações. Um breve histórico e seus benefícios multidisciplinares são descritos, para então serem

aprofundados as discussões a respeito do desempenho térmico das coberturas verdes a partir de estudos experimentais e de simulações computacionais. Demais aspectos energéticos e o balanço térmico também são apresentados. Finalizando, são apresentados aspectos de alguns dos modelos matemáticos disponíveis na literatura, e apresentado em maiores detalhes o modelo que foi integrado à ferramenta computacional utilizada na metodologia desta pesquisa.

2.2.1. Classificação das coberturas verdes

Coberturas verdes também são identificadas na literatura como coberturas vegetadas, telhados verdes, tetos verdes, telhados jardim, coberturas vivas, dentre outras denominações similares. Estas são essencialmente coberturas que possuem suas superfícies parcialmente ou completamente cobertas com algum tipo de vegetação, que por sua vez está fixada em um substrato, provendo suporte para o estabelecimento da mesma. Podem, e, usualmente, são incluídas camadas adicionais, como aquelas destinadas a prover a devida drenagem da água ou barreiras de impermeabilização contra a passagem de umidade e a penetração de raízes. Oberndorfer et al. (2007) definem como cobertura verde toda esta estrutura da cobertura, incluindo a vegetação e as camadas adicionais, visto que estas em conjunto determinam sua funcionalidade. Dvorak e Volder (2010) limitam-se ao design das estruturas para definir telhado verde como uma cobertura plana ou inclinada desenhada para suportar vegetação. Ou pode-se dar a simples definição de que são telhados que dispõem de plantas em sua camada exterior.

Coberturas verdes são caracterizadas por uma sucessão de camadas usualmente utilizadas (por ordem de aplicação de suas camadas a partir do teto do interior da edificação). Podem-se definir cinco camadas como as essenciais: (a) laje de sustentação; (b) membrana impermeabilizante; (c) camada de drenagem; (d) substrato; (e) vegetação (SAADATIAN et al., 2013).

Composições mais complexas podem incluir outras camadas (como as representadas na Figura 2), e ainda dispor de outras camadas funcionais, como os isolantes térmicos. Portanto, infundáveis configurações de coberturas verdes são possíveis,

visto que estas são estruturas compostas por camadas diversas e complexas com diferentes funções. As classificações e respectivas definições que são apresentadas nesta seção não devem ser consideradas definitivas, entende-se que são baseadas no que é atualmente utilizado no mercado e em pesquisas da área.

Apresentar-se-á uma melhor descrição da composição de camadas, de forma que a cobertura verde assim configurada seja capaz de exercer a funcionalidade e gerar os efeitos que são discutidos neste trabalho. Conforme ilustrado na Figura 2, uma membrana sintética de material impermeável compõe a camada imediatamente acima da laje estrutural, para prevenir a passagem de umidade. Usualmente, acima desta, uma barreira anti-raízes é utilizada para impedir a penetração das mesmas na membrana impermeabilizante. Em seguida, situa-se uma camada responsável pela drenagem. Nesta camada diversos materiais diferentes podem ser aplicados, porém usualmente são materiais leves e de alta porosidade que possuem a finalidade comum de escoar o excesso de água retido no substrato para o sistema de águas pluviais ou captação. Esta alta capacidade de drenagem da cobertura verde é essencial para evitar o acúmulo de peso adicionado pela umidade ao substrato, além de ser importante para a fisiologia das espécies vegetais utilizadas. Pelo mesmo motivo, o peso estrutural, também não é favorável à utilização de alguns dos materiais convencionalmente usados para drenagem, como areia e brita.

Acima da camada de drenagem, acomoda-se uma camada de uma manta geotêxtil filtrante, para evitar que sedimentos do substrato se infiltrem junto à percolação da água e se acumulem, entupindo o sistema de drenagem. Sequencialmente, dispõe-se a camada de substrato, que pode ser de configurações diversas. Estas variam de composições 100% inertes a misturas com maiores quantidades de matéria orgânica. A espessura da camada de substrato encontra-se tipicamente entre 10 e 30 cm (SAILOR, 2008) e esta é considerada a camada responsável pela maior parte do peso da estrutura. A camada de substrato encontra-se parcialmente exposta ao ambiente externo à edificação. Por fim, sobreposta ao substrato, a última camada é composta pela vegetação, onde ocorre a interação direta entre os elementos do ambiente externo e a fisiologia das plantas, e das mesmas com o substrato (FIORETTI et al., 2008). Alterando

qualquer um dos componentes acima, ou com a eventual adição de outras camadas, altera-se também a eficiência da cobertura (CASTLETON et al., 2010). Coma et al. (2016) encontraram reduções de consumo 14,6% maiores somente comparando diferentes materiais utilizados na camada de drenagem.

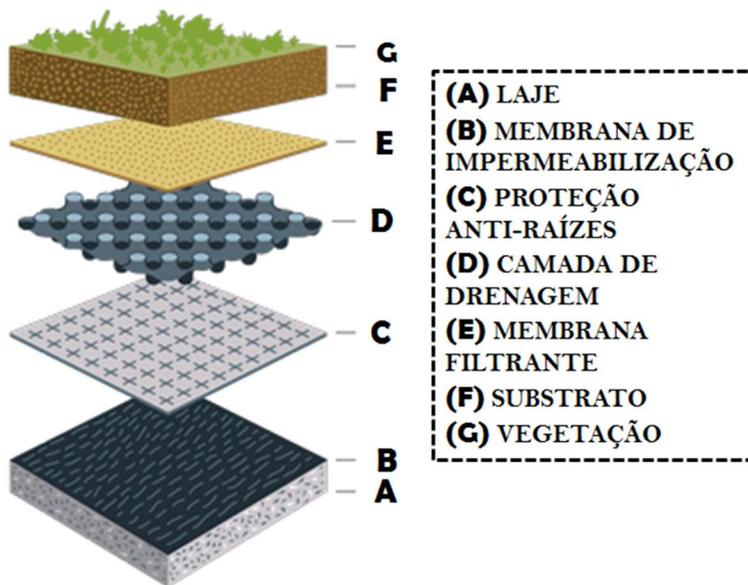


Figura 2 – Disposição de camadas típicas de uma cobertura verde. Fonte: Adaptado de Eric Nagler <<http://designroofs.com>>

As soluções tecnológicas propostas na construção de coberturas verdes são classificadas em normalmente duas categorias: extensivas e intensivas. Alguns autores incluem uma categoria intermediária, chamada de semi-intensiva (BERARDI et al., 2014; CAETANO et al., 2010). As diferenças estão essencialmente na espessura ocupada pela estrutura inteira e sua finalidade de uso. Também se diferem significativamente os custos de implantação e as necessidades de manutenção das mesmas. O Quadro 2 apresenta os principais atributos de cada categoria.

Quadro 2 - Possível classificação de coberturas verdes e seus principais atributos. Fonte: Adaptado de Berardi et al. (2014)

Principais atributos	Extensivo	Intensivo
Espessura do substrato	Menos de 20cm	Mais de 20cm
Peso da estrutura	60-150 kg/m ²	Acima de 300 kg/m ²
Diversidade de plantas	Baixa (Gramíneas, suculentas e herbáceas)	Alta (Arbustos e pequenas árvores)
Altura da vegetação	5-20 cm	Até 2m
Construção	Moderadamente simples	Tecnicamente complexa
Irrigação	Comumente desnecessária ou periódica	Necessidade de irrigação regular
Manutenção	Simple	Complicada
Acessibilidade	Geralmente inacessíveis	Acessíveis (Áreas de uso comum)
Custo	Baixo / Médio	Alto

Coberturas verdes intensivas são muitas vezes jardins localizados na cobertura. Envolvem uma camada de substrato considerável (maior que 20cm) e vegetação de médio porte. Estas coberturas acompanham um potencial superior para as funções tecnológicas as quais as coberturas verdes podem desempenhar, como o efeito de isolamento termo-acústico, retenção de águas pluviais e melhoras do desempenho térmico de resfriamento. Por outro lado, o alto peso estrutural requer estruturas mais reforçadas, sistemas de drenagem extremamente eficientes e eventualmente irrigação. Podem ou não necessitar manutenção intensa assim como um jardim comum ao nível do solo. Em sua maioria são áreas acessíveis e circuláveis, não só para facilidades de manutenção, como para usufruto comum. Coberturas intensivas oferecem a possibilidade de criar ambientes paisagísticos de maior diversidade proporcionando espaços recreativos, relaxantes ou de interação

social. Portanto, sua utilização é também diretamente ligada a maiores complexidades técnica e custos associados (BERARDI et al., 2014).

As coberturas extensivas possuem peso estrutural consideravelmente menor, por possuírem uma camada menos espessa de substrato (entre 5 e 10 cm). Sua implantação é comparativamente mais simples, de menor custo de execução e manutenção. Possibilita-se a implantação mesmo em coberturas inclinadas. As opções de combinações e complexidade das espécies vegetais são menores devido às restrições a espessura do substrato. Por vezes dispensam irrigação, situação onde as plantas utilizadas devem resistir às intempéries e sazonalidades. Apresentam, devido ao baixo peso estrutural, a possibilidade de serem opções mais viáveis para o retrofit de edificações. Dependendo do caso, nem mesmo necessitam de reforços estruturais (CASTLETON et al., 2010; JAFFAL et al., 2012).

Classificam-se também as coberturas verdes de acordo com o design construtivo e forma de implantação. São eles: (a) Sistema pré-cultivado, onde a vegetação e as camadas são comercializadas dispostas em rolos em que a vegetação ou já se encontra desenvolvida (gramíneas) ou se desenvolverá a partir da implantação (banco de sementes); (b) Sistemas modulares, onde módulos múltiplos são pré-fabricados, com características próprias, para então serem transportados e implantados diretamente sobre a cobertura exposta; ou (c) Sistemas “inteiros ou completos”, que são os tradicionais, da forma apresentada pelo presente capítulo, onde toda a região vegetada é uma só estrutura. Sua implantação e manutenção são consideradas mais complicadas que as outras formas, porém esta configuração promove maior adaptabilidade espacial e às configurações para cada projeto. Outras características desta forma de classificação estão apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Classificação de coberturas verdes conforme o design construtivo. Fonte: Berardi et al. (2014)

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

Apesar de comuns, as classificações aqui apresentadas não estão isentas de críticas. Alguns autores discursam sobre o fato de que as características de estratificação da cobertura são tão importantes como outros aspectos tidos como secundários, como por exemplo, a manutenção e a fisiologia das espécies vegetais utilizadas. Fioretti et al. (2008) exemplificam que coberturas verdes de configurações idênticas podem diferir no desempenho pela simples presença ou não de manutenção, sazonalidade das estações e clima locais. Assim sendo, a ausência de uma classificação mais precisa deriva dentre outras razões, do conhecimento ainda limitado quantitativamente a respeito destas estruturas e seu funcionamento.

2.2.2. O desempenho e o balanço térmico das coberturas verdes

Coberturas frias e coberturas verdes são alternativas que são frequentemente comparadas sob o mesmo ponto de vista, o da eficiência energética da cobertura e de toda edificação. O comportamento térmico das coberturas verdes se difere das coberturas frias (seção 2.1), que se comportam de maneira semelhante a uma cobertura convencional, apoiando-se na redução da absorvância para otimização do seu desempenho (Figura 1).

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 (PARIZOTTO; LAMBERTS, 2011).

A vegetação interage com uma parcela da radiação incidente, assimilando parte do calor e liberando-o posteriormente através dos processos de evapotranspiração decorrentes da fotossíntese. O sombreamento proporcionado pelas folhagens à camada subjacente de substrato é outro fator em questão. Em adição a este efeito, a camada de substrato adiciona considerável massa térmica e contribui com “certo nível” de isolamento. A umidade contida no mesmo aumenta também a inércia térmica de toda estrutura e está constantemente sujeita à evaporação para o ambiente (SAADATIAN et al., 2013; DJEDJIG et al., 2012). Assim, as propriedades do substrato e o comportamento da vegetação influenciam diretamente o desempenho térmico. Este por sua vez depende da climatologia de uma forma mais complexa que das coberturas frias ou convencionais.

A Figura 3 apresenta uma esquematização do balanço térmico em uma cobertura vegetada. A Equação 1 apresenta a forma geral do balanço térmico de uma cobertura verde. Percebem-se nas parcelas relacionadas aos processos de evapotranspiração as diferenças em relação aos fluxos presentes nas coberturas convencionais e frias (Figura 1). Portanto, o balanço térmico das coberturas verdes pode ser dividido em quatro fluxos principais, mais o calor armazenado na estrutura (Q_{ar}). A resultante das trocas sensíveis por radiação (Q_{rad}) e convecção (Q_{cv}), as trocas latentes referentes aos processos de evapotranspiração (Q_{et}) e o calor transportado através das camadas da cobertura por condução (Q_{cd}).

$$Q_{rad} = Q_{cv} + Q_{cd} + Q_{ar} + Q_{et} \quad (1)$$

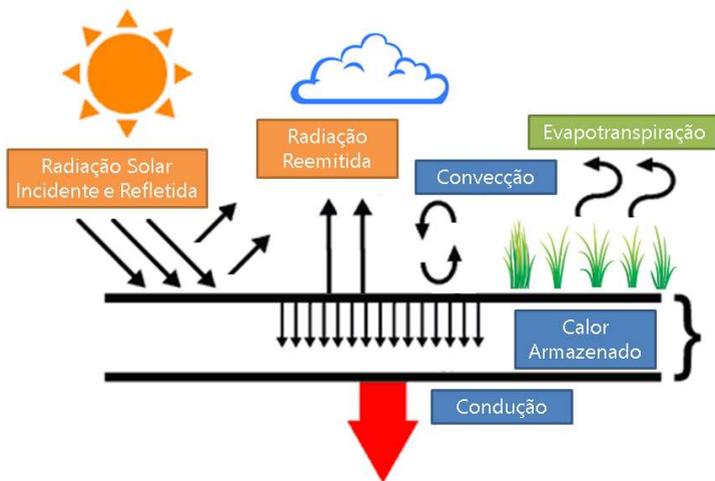


Figura 3 – Balanço térmico simplificado de uma cobertura verde

Tabares-Velasco e Srebic (2011) estudaram detalhadamente os fluxos de calor em um experimento laboratorial com o devido controle de diversas variáveis, onde foram reproduzidas condições climáticas de um ambiente natural em uma câmara isolada. O experimento foi realizado sobre um protótipo monitorado de uma cobertura verde sem isolamento, em versões com e sem plantas. A espessura do substrato foi de 9 cm e o índice de área foliar utilizado foi 2,7, e a altura média das plantas sendo 5 cm. A influência de cada um destes parâmetros será apresentada posteriormente na composição dos modelos matemáticos.

O experimento foi realizado com a finalidade de gerar dados mais precisos para: o melhor entendimento das relações entre as variáveis do balanço térmico, os respectivos fluxos e o desenvolvimento de um novo modelo matemático para o balanço térmico das coberturas verdes (TABARES-VELASCO; SREBIC, 2012). Estados estáveis foram estudados em oito cenários, onde foram variadas cinco variáveis, uma de cada vez. Foram elas: umidade relativa do ar, radiação incidente, velocidade do vento, temperatura do ar e espécie de planta. O cenário climático

representado foi de condições de verão, quando o ambiente interno se encontra mais frio que o ambiente externo.

A principal função de uma cobertura verde é prevenir que a radiação solar seja conduzida para o interior da edificação (FIORETTI et al., 2008). Portanto, os processos de transferência de calor se iniciam na interface externa da cobertura, onde uma fração da radiação solar incidente é interceptada pela vegetação, sombreando e assim reduzindo a transmissão do calor para a camada de substrato. Se a cobertura fracional de vegetação não for 100%, o substrato receberá o restante da radiação solar direta. A refletividade das camadas de vegetação e do substrato influencia na redução da absorção da radiação incidente. Os substratos apresentam maior refletividade com menores teores de umidade. Entretanto, a influência dessa variação em função da umidade não é grande, em especial, perante o dinamismo dos processos de evapotranspiração (TABARES-VELASCO; SREBIC, 2011).

A parcela de radiação solar refletida retorna para o ambiente. A carga térmica absorvida aquece a vegetação e o substrato, elevando suas temperaturas superficiais. As temperaturas superficiais de ambas as camadas regem os fluxos de energia trocados por radiação de ondas longas. Ocorrem trocas por radiação entre a vegetação e o substrato, e também destes com o céu e o entorno o qual as coberturas estão expostas. A taxa líquida de trocas por radiação é o fluxo principal ou, o fluxo que rege o balanço térmico (TABARES-VELASCO; SREBIC, 2011). O Quadro 4 apresenta a relação entre os fluxos de energia medidos no experimento laboratorial divididos pela taxa líquida de radiação, para as situações com e sem a presença de vegetação e com e sem umidade no substrato.

Quadro 4 – Relação encontrada experimentalmente entre os fluxos que compõem o balanço térmico. Fonte: Tabares-Velasco e Srebic (2011)

	Sem plantas - Molhado	Sem plantas - Seco	Com plantas - Molhado	Com plantas - Seco
Q_{cv}/Q_{rad}	0,29	0,40	0,23	0,57
Q_{cd}/Q_{rad}	0,21	0,32	0,09	0,14
Q_{et}/Q_{rad}	0,50	0,28	0,68	0,29

Os fluxos de calor por convecção ocorrem na superfície da vegetação e do substrato em contato com o ar do ambiente externo. Estes fluxos são regidos pelas características físicas de rugosidade da superfície dos mesmos (que resultam em diferentes coeficientes de convecção), as temperaturas superficiais, a temperatura do ar e a velocidade de movimentação do ar.

Aliado aos fluxos térmicos apresentados, a presença de umidade no sistema, “desequilibra” o balanço térmico. A camada de substrato apresenta uma determinada capacidade volumétrica de retenção de umidade, que é introduzida no sistema pela precipitação, irrigação e em menor parcela por condensação. Assim, o calor absorvido pelo substrato é em parte retransmitido para a atmosfera através de trocas de calor latente por evaporação, onde para que ocorra o transporte de umidade para o ar, depende-se da umidade relativa do ambiente externo. O conteúdo de água presente no substrato contribui também para criar um forte efeito de inércia térmica. Este efeito deve-se em parte à massa térmica do substrato e ao alto calor específico da água envolvida no processo de evaporação (FIORETTI et al., 2008).

Em conjunto, as funções metabólicas da vegetação, como a fotossíntese, a respiração e a transpiração resultante (comumente denominado evapotranspiração quando também são contabilizados também os efeitos de evaporação da água do substrato) se utilizam de uma parcela significativa da radiação solar absorvida. Estes processos são limitados pela resistência estomatal das plantas e pelo teor de umidade disponível no

substrato. A resistência estomatal é uma variável que se refere à resistência exercida pela superfície foliar ao transporte de umidade. É uma medida obtida a partir do diferencial de pressão de vapor d'água medido entre a superfície da folha e o ar circundante a partir do qual, começam a ocorrer os processos de evapotranspiração. Os fatores que regem a evapotranspiração são: a temperatura e umidade relativa do ambiente externo, a intensidade e qualidade do espectro luminoso, a velocidade do vento e a densidade e área superficial da folhagem da vegetação. Aumentos de radiação incidente potencializam os processos de evapotranspiração, porém estes processos estabilizam-se após certo nível de radiação (TABARES-VELASCO; SREBIC, 2011). Estes níveis são definidos pela fisiologia da planta e atuam em conjunto com os fatores como a resistência estomatal. Experimentalmente as taxas de evapotranspiração demonstraram relação linear com relação aos conteúdos volumétricos de umidade presente no substrato, em uma faixa que variou dos 7 a 27% de conteúdo volumétrico, conforme apresentado na Figura 4.

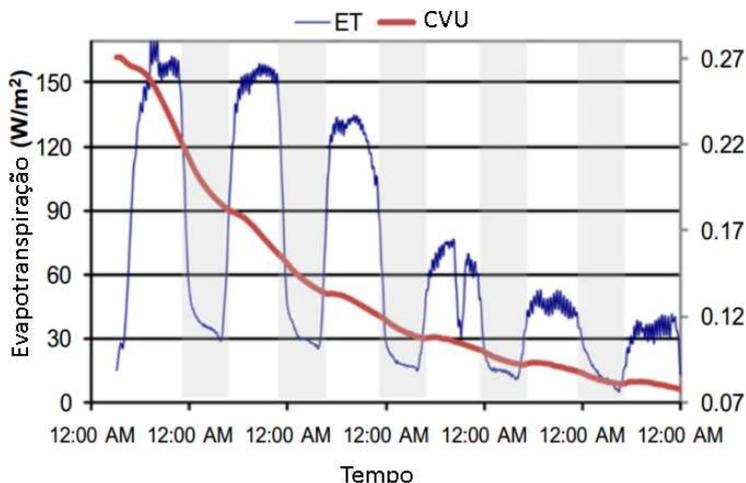


Figura 4 – Variação da evapotranspiração (ET) em função do conteúdo volumétrico de umidade (CVU). As áreas sombreadas correspondem aos períodos de ausência de radiação.

Por fim, a carga térmica referente à parcela restante da radiação absorvida e armazenada no substrato é transmitida por

condução através do substrato para as camadas subjacentes, até aquecer a superfície interna da estrutura. Este calor será transmitido por convecção para o ar do ambiente interno e por radiação para as paredes e superfícies internas. A possível retirada de calor do ambiente interno se dá da mesma forma, em sentido inverso (NIACHOU et al., 2001). O fluxo que atravessa a cobertura por condução em uma determinada área é resultante do diferencial de temperatura encontrado entre os estratos superficial e inferior do substrato, multiplicados pela condutividade elétrica do mesmo. A condutividade elétrica do substrato por sua vez é influenciada pelas características térmicas dos materiais que o compõem. Estudos demonstraram que a condutividade aumenta com o aumento do teor de umidade do substrato, em relação quase sempre linear (TABARES-VELASCO; SREBIC, 2009; SAILOR; HUTCHINSON; BOKOVOY, 2008; KOTSIRIS et al., 2011). Entretanto, Tabares-Velasco e Srebic (2011) ao quantificar os fluxos conduzidos em situações controladas, encontraram fluxos menores para os maiores teores de umidade presentes no substrato. Isso ocorreu, pois, as maiores taxas de evapotranspiração decorrentes do maior teor de umidade no substrato desempenham o importante papel em redirecionar os fluxos que poderiam ser conduzidos para o interior da zona, para o ambiente externo. É importante ressaltar que isto não acarreta necessariamente em um benefício para o desempenho, pois em situações onde se deseja manter o calor no interior da edificação, as perdas serão favorecidas.

Limitando-se a condução, as variáveis que regem o processo acabam por exercer um efeito de isolamento da cobertura, diminuindo o fluxo através desta para dentro ou para fora, sentido que depende fortemente das condições climáticas externas (SAADATIAN et al., 2013). Entretanto, este efeito é tão dinâmico que calcular a transmitância térmica média para um determinado intervalo de tempo não gera resultados satisfatórios para serem extrapolados para outros estudos de fluxo de calor através da cobertura, nem mesmo para modelos semelhantes (KOTSIRIS et al., 2011).

De maneira geral, é na evapotranspiração em que reside o diferencial do comportamento térmico de uma cobertura verde. Tabares-Velasco e Srebic (2011) demonstraram em seus experimentos que a evapotranspiração exerce o papel de controlar a intensidade dos demais fluxos. Isto se dá através de

uma espécie de modulação dos fluxos de entrada e saída do sistema, dependendo do metabolismo das plantas e condições do ambiente externo.

Algumas tendências do comportamento térmico de uma cobertura verde podem ser exemplificadas. O aumento das temperaturas superficiais da vegetação eleva os fluxos de calor trocados por convecção. Este aumento, também eleva a quantidade de radiação emitida para o céu, diminuindo assim as taxas resultantes das trocas térmicas por radiação. Da mesma forma, as temperaturas da vegetação aumentam quando a evapotranspiração diminui. Como por exemplo, no processo em que o substrato vai secando, em que há reduções da capacidade da vegetação de converter o calor sensível em latente (TABARES-VELASCO; SREBIC, 2011). Este efeito não ocorrerá caso seja mantida a umidade do substrato em níveis adequados para a manutenção da evapotranspiração em nível igualmente elevado. Neste caso, a magnitude dos efeitos de resfriamento evaporativo proporcionado à vegetação e a maior inércia térmica do substrato quando úmido, mantem as temperaturas da vegetação mais baixas, limitando outras formas de trocas de calor. A temperatura do substrato tende a manter-se sempre menor devido ao efeito de sombreamento proporcionado pela vegetação. O inverso acontece em ocasiões em que o ambiente interno encontra-se mais quente que o ar externo. A vegetação nesse caso proporciona uma espécie de isolamento sobre o substrato, favorecendo a redução das perdas de calor através da cobertura para o exterior.

Pode-se resumir que, em uma situação prática, para climas quentes e períodos de verão, o efeito de evapotranspiração das coberturas verdes é o principal no papel de redução da carga térmica transmitida à edificação. Por este motivo, os maiores benefícios energéticos podem ser obtidos em climas caracterizados por altas temperaturas e altos índices de incidência de radiação solar (SIMMONS et al., 2008; ALEXANDRI; JONES, 2008). Em climas frios e períodos de inverno, o efeito de evapotranspiração favorece as perdas de calor do sistema como um todo, proporcionando inclusive a retirada de calor do ambiente interno. Entretanto há o contraponto do efeito de isolamento proporcionado pela camada de substrato, o que favorece a manutenção de calor no interior da edificação. De forma geral, para as localidades mais frias, é

possível concluir que quanto menor for o teor de umidade presente no substrato, menor será a retirada de calor do ambiente interno através da cobertura (ZINZI; AGNOLI, 2012).

2.3. Estudos experimentais e computacionais

Nesta seção são apresentados trabalhos experimentais e computacionais a respeito do desempenho térmico e energético de coberturas verdes como base para discussão dos diversos aspectos relacionados. Coberturas verdes são altamente eficientes na redução da variação da temperatura interna do ambiente e na redução de consumo em climas quentes, e possivelmente climas frios (BERARDI et al., 2014). Historicamente mais utilizada em climas temperados típicos do hemisfério norte, até o início do século pouco se sabia da real eficiência energética das coberturas verdes. Entretanto, estudos recentes têm demonstrado que mesmo considerando as temporadas quente e fria em climas diversos, coberturas verdes, quando dotadas das configurações apropriadas, tendem a apresentar desempenho térmico satisfatório (JAFFAL et al., 2012).

Segundo Saadatian et al. (2013), coberturas verdes têm a vantagem de proporcionar possibilidades grandes em economia de energia para resfriamento simultaneamente combatendo os efeitos de ilhas de calor urbanas, argumento que também utilizado para as coberturas frias (SANTAMOURIS, 2008; CONSTANZO, EVOLA; MARLETTA, 2015; VIRK et al., 2015). Santamouris (2014) alerta para o fato de que as características da edificação também definem os possíveis impactos das coberturas verdes sobre o desempenho térmico. De forma direta, quanto maior o nível de isolamento, menor será o impacto energético proporcionado (JAFFAL et al., 2012; ZINZI; AGNOLI, 2012; AKBARI; KONOPACKI, 2005). Da mesma forma, se a maior parte da carga térmica que a edificação recebe se dá por ganhos em formas como: a ventilação natural, ganhos internos ou radiação solar transmitida através das janelas e paredes; as contribuições das coberturas verdes podem ser limitadas. Por outro lado, em situações em onde as maiores cargas térmicas sejam atribuídas às transferências através da cobertura, coberturas verdes podem contribuir significativamente para

reduzir as demandas de resfriamento e aquecimento (SANTAMOURIS, 2014).

Segundo Andrade e Roriz (2008) as coberturas verdes quando comparadas às convencionais, apresentam um ótimo desempenho térmico em situações onde são exigidas cargas térmicas de resfriamento, particularmente por amortecer as temperaturas das superfícies externa e interna da cobertura. Esta afirmação é particularmente válida para situações de verão. Em uma cobertura envelhecida as temperaturas das superfícies de lajes expostas no verão podem chegar até 90°C, conforme registrado por Williams et al. (2010) durante o verão em Sydney, Austrália. Portanto, a cobertura verde também evita que a laje seja exposta a grandes oscilações de temperatura, maximizando sua vida útil (TEEMUSK; MANDER, 2009). Este efeito de “proteção” da laje da cobertura é diretamente visualizado também nos resultados de simulações computacionais de Jaffal et al. (2012). Em um dia ensolarado em La Rochelle, França, as temperaturas superficiais externas do telhado convencional simulado chegaram a 58°C, enquanto as da cobertura verde (temperatura do substrato) não passaram de 19°C no mesmo dia (Figura 5). A variação da temperatura superficial externa é importante no desempenho térmico, pois, como visto na seção 2.4.3, maiores temperaturas de superfície, em especial as internas, estão diretamente relacionadas ao fluxo de calor para o interior da zona, em situações onde se necessite cargas térmicas de resfriamento.

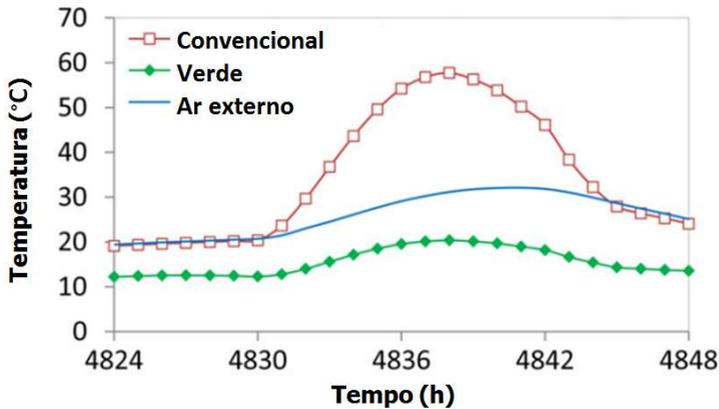


Figura 5 – Temperaturas de superfície externa em um dia de verão em La Rochelle. Fonte: Jaffal et al. (2012)

Laar e Grimme (2006) demonstraram o efeito de amortização das oscilações de temperatura da superfície interna de lajes, em experimentos práticos realizados em células teste no clima tropical do Rio de Janeiro. Este estudo considerou coberturas verdes sobre uma laje de concreto e uma cobertura de fibrocimento (tipicamente utilizados em construções de baixa renda). Foram realizados testes com e sem a cobertura vegetal para ambos os casos. No caso da cobertura com a laje de concreto exposta, em um dia quente de verão, a amplitude registrada foi de 21°C, variando de 29 a 50°C. A mesma cobertura quando dotada de vegetação apresentou 7°C de amplitude na temperatura superficial do substrato (de 31 a 38°C), uma redução de 14°C (66%). No caso com o telhado de fibrocimento sem a vegetação a amplitude foi de 28°C, variando de 26 a 54°C. Quando vegetada a amplitude foi de 14°C, variando de 29 a 43°C. Este valor representou uma redução de 50% na amplitude de oscilação das temperaturas superficiais internas. Nota-se que as temperaturas máximas atingidas pelas coberturas verdes também foram de 11 e 12°C menores quando comparadas com as coberturas não vegetadas.

Utilizando-se de análises das temperaturas superficiais externas registradas em um modelo de cobertura verde monitorada, Gaffin et al. (2005) estimaram qual seria o albedo necessário para uma cobertura não vegetada reproduzir o

padrão de comportamento de temperaturas superficiais observado na cobertura verde. Os valores encontrados para esta variável, denominada no estudo de “albedo equivalente”, estão entre os mais altos valores de albedo de materiais disponíveis para utilização em coberturas frias (entre 0,7 e 0,85), conforme apresentado na Figura 6. Portanto, telhados verdes apresentam o potencial de exibir a mesma eficiência em termos de redução de fluxos de calor, que as mais eficientes coberturas brancas. Os autores concluem que os resultados sugerem que a melhoria da eficiência de resfriamento por parte da vegetação pode ser otimizada através do uso de diferentes configurações.

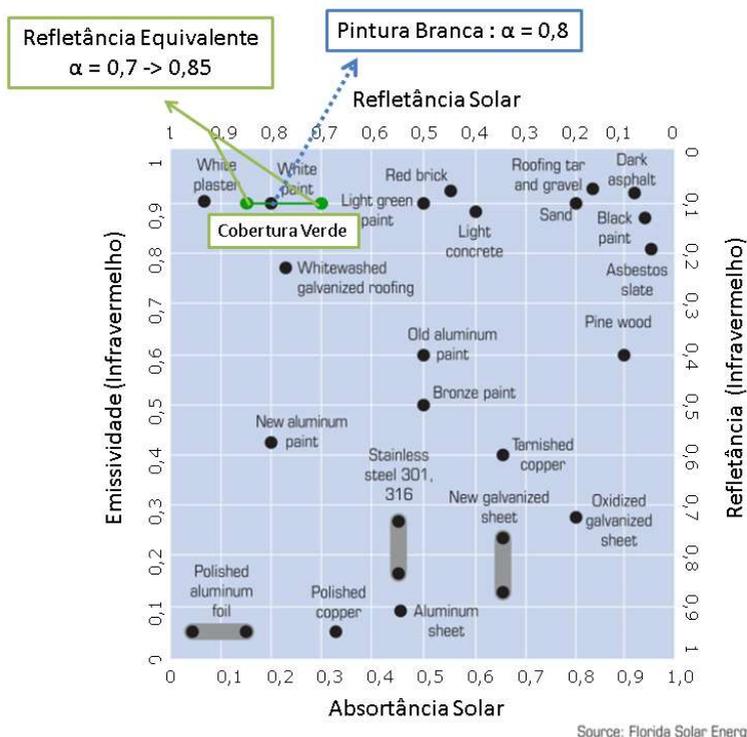


Figura 6 – Diagrama de refletâncias de diferentes materiais.
Fonte: Gaffin et al (2005), adaptado de Centro de Energia Solar da Flórida.

Jaffal et al. (2012) realizaram estudos com objetivo de contribuir no entendimento de fatores ainda não perfeitamente

compreendidos a respeito dos impactos das coberturas verdes no desempenho energético das edificações, incluindo uso de energia e condições do ambiente interior. Foram analisados fatores como o isolamento da cobertura, e parâmetros da vegetação. A metodologia consistiu em simulações realizadas no software TRNSYS de um modelo residencial unifamiliar de 100m² com uma cobertura verde incorporada. As três cidades e os respectivos climas simulados foram: La Rochelle - França (mediterrâneo temperado), Atenas - Grécia (mediterrâneo quente) e Estocolmo - Suécia (frio).

Os resultados indicam que os maiores efeitos foram obtidos com a cobertura sem isolamento. Nesta condição a redução foi de até 51% do consumo anual de energia, em La Rochelle. Entretanto quando utilizados 5 cm de isolamento na cobertura, esta redução atinge somente 11% de redução de consumo. Este valor pouco varia com o incremento da camada isolante mais, mas chegando a quase neutralização dos efeitos quando utilizados 30 cm de isolamento. Cenário em que a redução de consumo da cobertura verde foi de somente 3% do consumo comparado com telhado convencional.

Os resultados (Quadro 5) também demonstraram que para o período anual, as coberturas verdes resultaram em melhorias no desempenho nos três climas estudados, mesmo quando utilizados 10 cm de isolamento. Em Atenas, o mais quente dos climas estudados, a redução foi de 31% (27,7 - 40,5 kWh/m².ano). A melhora de desempenho concentrou-se na redução do consumo de resfriamento (55% de redução), com uma pequena penalidade do aumento do consumo de aquecimento (7% de aumento). Em La Rochelle a economia proporcionada foi pequena, com 5% de redução (38,5 para 36,2 kWh/m².ano). Esta redução concentrou-se na melhora do consumo de resfriamento que foi quase zerado, diminuindo de 2,5 para 0,1 kWh/m².ano para cobertura verde. O consumo de aquecimento foi praticamente idêntico (0,1 kWh/m².ano de aumento). Para o clima frio de Estocolmo, houve redução de 8% do consumo (de 131 para 120,3 kWh/m².ano). O consumo foi exclusivamente de aquecimento para ambas as coberturas.

Quadro 5 – Resultados de consumos energéticos e temperaturas internas das simulações realizadas. Fonte: Jaffal et al. (2012)

Ambiente artificialmente condicionado						
Cidade	Aquecimento (kWh/m ² .ano)		Resfriamento (kWh/m ² .ano)		Consumo total (kWh/m ² .ano)	
	Conv.	Verde	Conv.	Verde	Conv.	Verde
Atenas	14,1	15,2	26,4	12,5	40,5	27,7
La Rochelle	36,0	36,1	2,5	0,1	38,5	36,2
Estocolmo	131,0	120,3	0,0	0,0	131,0	120,3
Ambiente naturalmente ventilado						
Cidade	Temperatura interna média (°C)		Temperatura interna máxima (°C)			
	Conv.	Verde	Conv.	Verde		
Atenas	33,9	31,3	35,4	32,7		
La Rochelle	28,4	26,4	30,1	28,0		
Estocolmo	25,6	24,2	27,2	25,8		

Em Atenas e Estocolmo o consumo energético é reduzido por motivos diferentes. No clima quente de Atenas a demanda diminui principalmente devido aos efeitos do sombreamento e evapotranspiração proporcionados pela vegetação. No caso do clima frio de Estocolmo, a redução de consumo se dá através do efeito de isolamento adicional proporcionado pela camada de substrato e a camada de ar subjacente à folhagem, apesar dos efeitos de evapotranspiração existirem.

Análises de períodos diários foram realizadas para La Rochelle, em três situações, baseando-se nas temperaturas superficiais e fluxos através da cobertura (Na Figura 7 são apresentadas as temperaturas). Foram elas: O dia mais quente de verão, e os dias mais frios, nublado e ensolarado do inverno. A cobertura verde apresentou melhor desempenho que a

convencional no dia mais quente e no dia mais frio, e pior desempenho no ensolarado de inverno. Em um dia de inverno ensolarado (b), os efeitos da evapotranspiração das plantas e do substrato favorecem a perda de calor através da cobertura, gerando por fim maiores demandas de aquecimento. Nesta ocasião a temperatura do substrato esteve até 2,9°C mais baixas que a temperatura externa, e 3,8°C mais baixas que a temperatura da vegetação. Entretanto, na ausência de altos níveis de radiação solar, cenário do dia de inverno nublado (a), o efeito se inverte. A evapotranspiração é limitada, permitindo assim que a camada de substrato atue como isolante. Neste caso as temperaturas do solo mantiveram-se até 5,6°C mais altas que a temperatura externa. A temperatura da vegetação esteve em média 4,9°C mais baixas que a do solo, isto ocorre devido mais exposição às baixas temperaturas do ar e trocas radiativas significativas com o céu. Para o dia de verão (c), ocorrem reduções drásticas com relação à cobertura convencional. O resfriamento passivo proporcionado pela cobertura verde evidencia-se nos fluxos de retirada de calor do ambiente chegando a valores quase três vezes maiores. As temperaturas do substrato mantiveram-se até 12,8°C abaixo da temperatura externa. As temperaturas da vegetação estiveram 13,2°C acima das temperaturas do solo. A temperatura máxima atingida pelo substrato da cobertura verde neste dia (20°C) foi 38°C inferior à registrada na cobertura convencional (58°C). Portanto, são resultados satisfatórios considerando que foi utilizado considerável isolamento e o clima de La Rochelle ser um clima mediterrâneo temperado. Maiores potenciais seriam registrados, fosse o clima analisado em detalhes, o de Atenas.

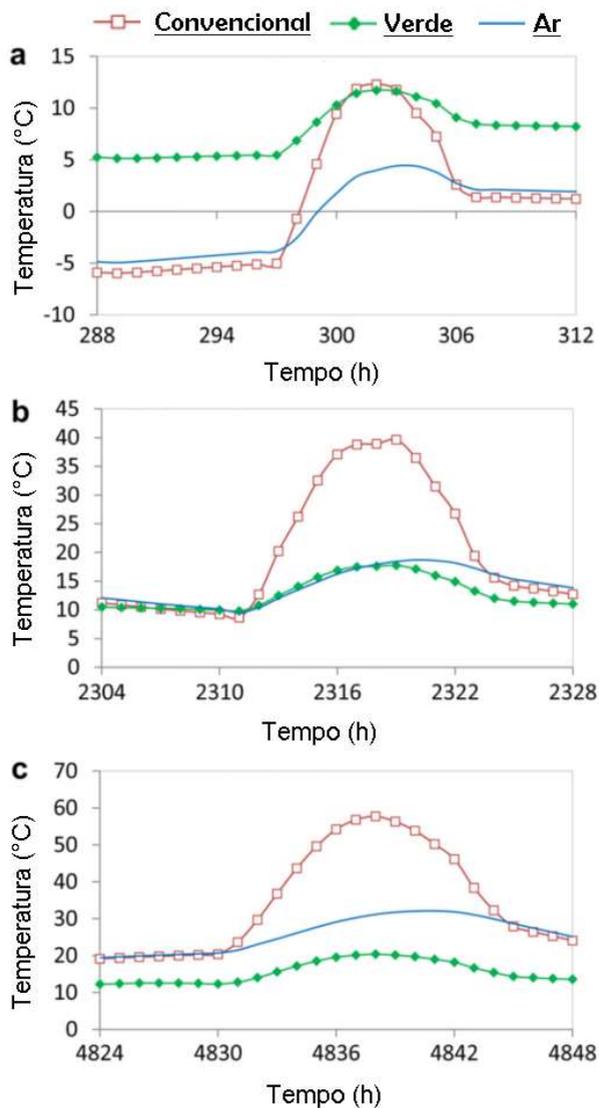


Figura 7 – Temperaturas superficiais registradas nos dias: (a) frio de inverno; (b) ensolarado de inverno; (c) quente de verão em La Rochelle. Fonte: Jaffal et al. (2012)

A variabilidade sazonal da eficiência das coberturas verdes também foi investigada por Getter et al. (2011). Em estudo realizado no meio oeste dos Estados Unidos, foi comparada experimentalmente uma cobertura verde construída em um processo de retrofit e um telhado com cobertura de uma camada de cascalho. As temperaturas superficiais fluxos de calor e foram analisados por estações do ano. Os resultados demonstram que os impactos da cobertura verde sobre os fluxos de calor variam conforme a estação, em geral de forma menos extrema, favorecendo o desempenho térmico.

No período de verão os impactos foram muito significativos. Em comparação com a cobertura referência, houve uma variação média de 167% em média do fluxo de calor. Neste caso, a cobertura de cascalho apresentou 327 W/m².mês transferidos para o interior da edificação, enquanto a cobertura verde proporcionou o fluxo no sentido invertido, com 220 W/m².mês em média sendo retirados através da cobertura. No inverno a redução foi de 13% de redução do calor retirado da edificação. O fluxo reduziu-se de 3017 W/m².mês para 2623 W/m².mês na cobertura verde. O impacto sobre os fluxos de calor no outono (-5%) e na primavera (+3%) foi menos significativo (GETTER et al., 2011). Os resultados encontrados estão de acordo com o que outros autores demonstraram para Hong Kong (JIM; HE, 2010). Ressalta-se como um aspecto interessante o fato de que as maiores influências das estações sobre os fluxos de calor foram exercidas naquelas que coincidentemente registram o maior consumo energético, sendo elas, o inverno, e em especial o verão.

Santamouris et al. (2007) estudaram a instalação de uma cobertura verde com a utilização de procedimentos experimentais e computacionais em um edifício institucional em Atenas, Grécia. A primeira fase da pesquisa consistiu no monitoramento do edifício, dividido em oito zonas, gerando os dados que serviram para a posterior comparação. Através de simulações computacionais no programa TRNSYS, foram simulados dois cenários para o edifício, com e sem isolamento. Foram analisados dados de consumo energético no ano dividido em dois períodos, um de aquecimento e um de resfriamento. Durante o período de aquecimento, as penalidades energéticas decorrentes da implantação da cobertura verde foram desprezíveis. A média mensal foi de 2,2% de aumento do

consumo no edifício isolado (variando de -7 a 13%). O edifício sem isolamento apresentou 0,2% em média de redução no consumo (variando de -3 a 12%). Durante o período de resfriamento, maiores reduções no consumo energético foram alcançadas. A média mensal de redução foi de 26,4% no edifício sem isolamento. A variação entre os meses foi de 15 a 49%. Para o edifício com isolamento a redução média foi de 14%, com variações entre 6 e 33%. Estes resultados demonstram significativa melhora no desempenho energético quando considerado o ano inteiro. As pequenas desvantagens da utilização da cobertura verde no período de aquecimento foram desprezíveis perante as vantagens oferecidas para o período de resfriamento.

Parizotto e Lamberts (2011) investigaram o desempenho térmico de uma cobertura verde, em comparação a duas coberturas: cerâmica e metálica, no clima temperado de Florianópolis. Dados quantitativos de fluxo de calor, obtidos da edificação experimental conhecida como “*Casa Eficiente*” foram analisados. Foram estudados dois períodos de sete dias, um período quente (início de março) e um frio (fim de maio). A redução do ganho de calor através da cobertura verde durante o período quente foi de 92 e 97% e a retirada de calor através da cobertura foi aumentada em 49 e 20%, quando comparadas a cobertura cerâmica e metálica respectivamente. Estes resultados atestam a eficiência energética da cobertura verde em situações onde há a necessidade de retirada de calor dos ambientes internos. Durante o período frio, o ganho de calor foi reduzido em 70 e 84%, em relação à cobertura cerâmica e metálica respectivamente. Isto poderia resultar em maiores necessidades de resfriamento. Porém devido às reduções exercidas pela cobertura verde sobre as perdas de calor (44% para a cerâmica e 52% para a metálica), o desempenho final foi favorável. Isto é constatado no fato de que a temperatura interna do ar no período mais frio foi maior sob a cobertura verde.

Oliveira (2009) realizou um experimento no Rio de Janeiro, onde uma adaptação de telhado verde para habitações de interesse social foi proposta. Apesar de a cobertura verde receber maior incidência solar que a cobertura referência (fibrocimento), esta foi capaz de reduzir a temperatura interna em até 4,4°C nos períodos mais quentes do dia. Registrou-se uma

redução em cerca 4,0°C na camada de imediatamente acima da cobertura.

Resultados favoráveis também foram obtidos por Lopes (2007) em experimento realizado em São Carlos, como resultado da utilização de uma cobertura verde extensiva. Foram monitoradas as temperaturas internas da cobertura em quatro módulos construídos com diferentes coberturas. A cobertura verde apresentou a menor média e a menor amplitude das temperaturas registradas (Quadro 6). Outro estudo referente ao mesmo conjunto de módulos, realizado por Vecchia (2006), apresentou resultados semelhantes. Em um determinado dia de temperatura externa máxima de 34°C, a temperatura interna do módulo com cobertura verde foi 5,2°C menor (28,8°C). As demais coberturas apresentaram desempenho inferior. O módulo com cobertura de cerâmica apresentou temperaturas internas 3,6°C inferiores a externa (30,4°C). O telhado de fibrocimento apresentou comportamento similar com 31°C de máxima. A laje de concreto apresentou elevação de 0,7°C (34,7°C) em relação à temperatura externa e a cobertura de aço galvanizado apresentou o pior desempenho, com temperatura máxima interna do módulo sendo 45°C, 11°C maior que a temperatura externa.

Quadro 6 – Temperaturas superficiais internas do experimento realizado por Lopes (2007)

SISTEMAS DE COBERTURAS		TEMPERATURAS SUPERFICIAIS INTERNAS		AMPLITUDE TÉRMICA (°C)
		MÁXIMAS (°C)	MÍNIMAS (°C)	
01	Aço Galvanizado	57,8	9,8	48,0
02	Fibrocimento	48,6	9,5	39,1
03	Laje pré-moldada cerâmica	45,0	11,5	33,5
04	Cerâmica	32,8	12,5	20,3
05	CVL	26,7	17,5	9,2

Ferraz (2012) realizou medições em um protótipo experimental de cobertura verde extensiva por um período de dez meses em São Paulo. A cobertura verde quando comparada a uma cobertura cerâmica com forro de PVC registrou picos de demanda de carga térmica de aquecimento e resfriamento consideravelmente menores ao longo do dia. Durante o período quente, o protótipo com a cobertura verde dispensou a necessidade de resfriamento (*referência* 24°C), o que foi necessário no caso da cobertura de cerâmica. Durante o período frio, as cargas térmicas necessárias à cobertura de cerâmica foram até dez vezes superiores. Os efeitos de sombreamento e isolamento, citados anteriormente, também foram constatados nesta pesquisa. Na cobertura verde a temperatura interna se manteve menor que a temperatura externa nos períodos quentes do dia. A temperatura interna manteve-se superior à temperatura externa nos períodos mais frios. Esta relação nem sempre foi obedecida na cobertura de cerâmica. Menores amplitudes nas temperaturas superficiais externas também foram constatadas na cobertura verde com relação à cobertura de cerâmica. Estes resultados novamente demonstraram o desempenho térmico superior da cobertura verde, no caso e período analisado.

Extensa literatura é existente para reforçar o argumento de que as coberturas verdes melhoram o desempenho térmico das edificações. Esta melhora pode-se dar não só em climas quentes, como em climas frios também. Estes efeitos são indiscutíveis em especial quando comparados às coberturas convencionais e quando aplicados em edificações sem isolamento e na ocasião de materiais com alta absorvância. Em respeito à melhora do desempenho térmico das coberturas em climas quentes, as coberturas frias são frequentemente lembradas na literatura como capazes de proporcionar efeitos iguais ou superiores as coberturas verdes.

Zinzi e Agnoli (2012) investigaram esta comparação entre a eficiência energética de coberturas verdes e frias através de simulações computacionais para três diferentes cidades na região do Mediterrâneo. É interessante notar que o estudo contempla três diferentes climas de uma mesma divisão mais abrangente, que é a do clima *Mediterrâneo*. Barcelona, na Espanha, que apresenta clima temperado frio com chuva bem distribuída ao longo do ano, e maior demanda de aquecimento.

Palermo, na Itália, que apresenta clima mais equilibrado, temperado ameno com inverno seco. E Cairo, no Egito, onde se apresenta um clima desértico quente e frio, com mínimas precipitações e maiores demandas de resfriamento durante todo o ano.

As edificações simuladas foram residências unifamiliares geminadas (dois andares) e não geminadas (um andar) em configurações com e sem isolamento ($R = 0,6$ e $1,4$, respectivamente). As simulações foram realizadas no programa *Design Builder* que utiliza o *EnergyPlus* para os cálculos. O *EnergyPlus* possui integrado o modelo monodimensional para cobertura verde desenvolvido por Sailor (2008) que será posteriormente apresentado na seção 2.4.2.

Quatro tipos de cobertura foram utilizados nas simulações, sendo eles: convencional (refletância; $\alpha=0,25$, e emissividade; $\epsilon =0,9$), com pintura metálica ($\alpha =0,65$; $\epsilon =0,4$), com pintura branca elastomérica ($\alpha =0,8$; $\epsilon =0,9$) e vegetada ($\alpha =0,25$; $\epsilon =0,9$). Para a cobertura verde foram testadas as configurações: irrigada, seca e sujeita à precipitação. Os pesquisadores também tomaram a precaução de utilizar menor nível de isolamento nas coberturas verdes, de forma a compensar o isolamento naturalmente proporcionado pela camada de solo. A cobertura verde ocupava somente 80% das coberturas com o restante disponível para circulação (concreto).

Diversos resultados interessantes foram apresentados. Um ponto interessante a ser destacado é a cobertura verde, dentre as quatro alternativas investigadas, foi a única que apresentou redução no consumo energético perante a cobertura convencional em qualquer uma das situações simuladas. Considerando somente a cobertura verde sujeita à precipitação local. Os benefícios da redução foram obtidos em qualquer variação do clima, da tipologia ou o nível de isolamento da edificação (Quadro 7).

A cobertura fria apresentou desempenho de resfriamento superior a verde, no clima seco do Cairo. Para a casa não geminada, a redução de consumo da cobertura fria comparada à convencional foi de 29 e 30%, para as configurações com e sem isolamento, respectivamente. Com a utilização da cobertura verde estas reduções foram de 3 e 14%. Essa grande diferença de desempenho ocorreu devido ao fato da evapotranspiração representar grande parte da capacidade de perda ou redução de

ganho de calor do ambiente interno da edificação através da cobertura. Em Palermo, com isolamento, as reduções foram de 17 e 4%, para as coberturas fria e verde, respectivamente. No caso da casa sem isolamento, a redução no consumo foi maior utilizando-se a cobertura verde (9%) do que com a cobertura fria (5%).

Quadro 7 – Resultados de desempenho energético da casa não geminada, para as três cidades simuladas. Fonte: Zinzi e Agnoli (2012).

Cidade	Tipo de Cobertura	Consumo energético (kWh/m ² .ano)			
		Com isolamento	% de redução	Sem isolamento	% de redução
Barcelona	Conv.	41,6	0%	79,8	0%
	Metálica	39,8	4%	76,7	4%
	Fria	43,8	-5%	90,7	-14%
	Verde	38,3	8%	72,1	10%
Palermo	Conv.	30,6	0%	51,1	0%
	Metálica	27,6	10%	45,9	10%
	Fria	25,5	17%	48,4	5%
	Verde	29,4	4%	46,6	9%
Cairo	Conv.	41,1	0%	57,2	0%
	Metálica	36,6	11%	48,5	15%
	Fria	29,1	29%	40	30%
	Verde	39,9	3%	49,2	14%

Cabe ressaltar que o desempenho da cobertura fria foi o pior dentre todas testadas no clima de Barcelona, devido às reduções de ganho de calor e altas taxas de perdas por resfriamento radiativo noturno, resultando em um balanço anual desfavorável ao consumo energético. A cobertura verde sujeita à precipitação local apresentou reduções de consumo de 8 e 10% em relação a cobertura convencional, para as configurações com e sem isolamento, respectivamente. Esta redução da demanda de energia para aquecimento sugere uma possível generalização da melhora do desempenho térmico. Entretanto, a afirmação de que as coberturas verdes melhoram o desempenho térmico de uma edificação, por via de regra, é uma afirmação incorreta. Entretanto, segundo Santamouris (2014) é questão de tempo até um consenso nesse sentido ser alcançado. Em todo caso, são

necessários estudos prévios para que os projetos executados contemplem suas particularidades e se adaptem às melhores configurações possíveis, principalmente em função dos aspectos climáticos do ambiente em que estão inseridos.

Considerado as simulações que tiveram como finalidade a análise de influência do conteúdo de umidade coberturas verdes (resultados apresentados na Figura 8), a opção da cobertura verde irrigada apresentou o melhor desempenho entre as alternativas simuladas (irrigada, seca e sujeita a precipitação) para ambos os períodos (de resfriamento e aquecimento) em Palermo e no Cairo. Esta configuração simulou uma cobertura onde o substrato manteve-se constantemente saturado, o que poderia ser obtido com alguma forma de irrigação “inteligente”. Para o clima do Cairo isto permitiu maiores taxas de evapotranspiração e a melhora foi significativa. Para o clima temperado de Palermo, a demanda de aquecimento se manteve praticamente a mesma, porém foram reduzidas a quase zero as demandas de resfriamento. Para o clima de Barcelona o telhado verde seco apresentou melhor desempenho energético devido à menor condutividade que o substrato seco apresenta, aumentando o efeito de isolamento. Este efeito é favorável em condições onde as demandas de aquecimento são predominantes. Estes resultados segund os autores corroboram para a importância da irrigação em situações onde se desejam obter o melhor desempenho energético ou em climas aonde o desempenho das coberturas verdes quando sujeitas as precipitações locais não sejam satisfatórios (ZINZI; AGNOLI, 2012). Portanto, o projeto e o manejo da irrigação de uma cobertura verde devem ser calibrados e ajustados de acordo com as condições climáticas locais e sua finalidade de uso na edificação. Pode-se adotar uma generalidade em que, para regiões frias, o substrato deve manter-se o mais seco possível sem que seja afetada a sobrevivência das plantas. E para regiões quentes, deve-se manter a umidade do substrato mais próxima do ponto de saturação. Para situações onde resfriamento e aquecimento fazem-se necessários, uma análise para cada caso é a melhor opção.

Um dos pontos chaves para o equilíbrio funcional de uma cobertura verde é a irrigação (SANTAMOURIS, 2014). Entretanto, no caso de uma cobertura verde não ser irrigada, dependendo dos níveis de pluviosidade local, pode ser uma

alternativa arriscada no aspecto energético. No caso do Brasil, a maior parte das regiões (com exceção do interior nordestino), ainda que apresentem estações secas, não apresentam escassez prolongada de chuvas com a frequência registrada no clima desértico estudado por Zinzi e Agnoli (2012).

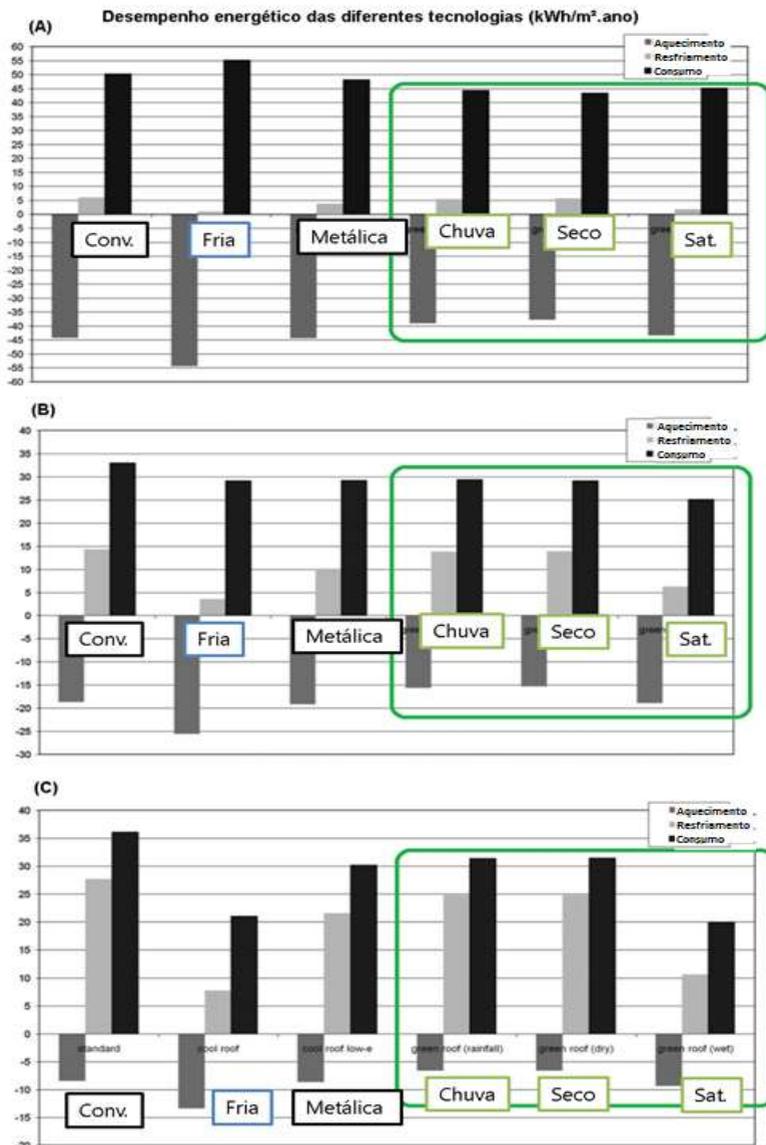


Figura 8 – Desempenho energético da casa geminada. Em destaque o desempenho das diferentes configurações de coberturas verdes. (A) Barcelona; (B) Palermo; (C) Cairo. Fonte: Zinzi e Agnoli (2012)

2.4. Modelos de coberturas verdes

Com o crescimento da relevância do tema, ocorrido a partir dos anos 90 (BLANK et al., 2013), diversas metodologias e modelos matemáticos para o cálculo dos processos de transferência de calor e massa e o desempenho térmico associado às coberturas verdes foram desenvolvidos. Djedjig et al. (2012) apresentam uma revisão a respeito dos modelos disponibilizados na literatura técnica, apresentado no Quadro 8.

Os resultados de estudos experimentais como os que foram apresentados na seção anterior são de grande valor para o entendimento do desempenho de uma cobertura verde. Entretanto estes são resultados específicos para cada edificação analisada e dependem dos substratos e espécies vegetais utilizadas (DJEDJIG et al., 2012). No caso dos estudos de simulação, estes dependem de modelos previamente desenvolvidos. Alterando parâmetros do substrato e vegetação, Wong et al. (2003) encontraram variações nas reduções de consumo de resfriamento em uma faixa que variou de irrisórios 0,6% a significativos 14,5%. Kotsiris et al. (2012) realizaram experimentos para calcular coeficientes de transmitância dinâmicos para a cobertura verde como um só material, e encontrou diferenças entre os valores teóricos e os determinados analiticamente entre 27 e 40%, entre cinco substratos analisados.

A quantificação do processo de evapotranspiração é a parte mais complicada, por depender de numerosas variáveis. Yaghoobian e Srebic (2015), por exemplo, apresentam resultados em que substrato sem a vegetação absorveu 32% (6,2 kWh/m²) a mais de radiação do que quando completamente coberto pela vegetação. As cargas de resfriamento decresceram 13 kWh por m² acrescido de vegetação. Beatrice (2011) avaliou experimentalmente o desempenho de três espécies e três diferentes espessuras de substrato para coberturas verde (5, 10 e 15 cm). O desempenho variou muito pouco entre as espécies testadas, enquanto a maior influência registrada foram as decorrentes das alterações na espessura da camada de substrato. Além disto, conforme já discutido anteriormente, o desempenho térmico também depende fortemente dos fatores

climáticos. Estes achados atraem a atenção para a necessidade do desenvolvimento de modelos que aprimorem a avaliação do desempenho térmico de coberturas verdes sob as mais diferentes configurações e cenários (DJEDJIG et al., 2012).

Modelar o comportamento térmico de coberturas verdes requer o estudo de diversos fenômenos físico-químicos e biológicos que interagem entre si constantemente, como as transferências de calor e massas que ocorrem através de diferentes camadas e incluem elementos instáveis, como o metabolismo da vegetação (CAPAZOLLI et al., 2013). Apesar desta complexidade os primeiros modelos consideravam todo o processo que ocorre na cobertura verde somente como um potencial de redução do valor de resistência térmica da estrutura. Outros, ainda que de forma simples, incluíram maiores detalhes, onde os efeitos de sombreamento e a estratificação das camadas são considerados. Existem vários métodos de cálculo para determinar o desempenho energético das coberturas verdes, e apesar da importância e potencial demonstrado pelos seus aspectos energéticos, diversos autores relatam que não são numerosos os estudos detalhados do seu comportamento de parâmetros específicos que auxiliem o projetista, com algumas exceções validadas (SAILOR, 2008; JIM; HE, 2010; DJEDJIG et al., 2012; KOTSIRIS et al., 2012; TABARES-VELASCO; SERBIC, 2012).

Quadro 8 – Revisão de modelos de coberturas verdes.
 Fonte: Adaptado de Djedjig et al. (2012)

Modelos computacionais de coberturas verdes		
Modelo	Suposições	Descrição
E. Barrio (1998)	A vegetação como uma zona térmica renovável	Fornecer uma temperatura constante e o teor de umidade do solo
D. J. Sailor (2008)	Inércia térmica do substrato desprezível e proporções constantes de mistura de ar na folhagem	Soluciona o balanço de temperatura para a superfície do solo e da folhagem.
E. Alexandri e P. Jones (2007)	Temperatura e umidade não são uniformes horizontalmente, o modelo é bidimensional em respeito a camada de vegetação	Solucionado através de equações diferenciais parciais de transferência de calor e massa
C. Feng et al. (2010)	Fotossíntese é relevante e a temperatura da folha é conhecida	Balanço de energia geral por toda a cobertura extensiva
H. He & C. Y. Jim (2010)	Camada multifoliar semi-transparente (Propriedades radiativas)	Desenvolvimento de um modelo de sombreamento eficiente (SEM), a partir da propagação das ondas eletromagnéticas
S. E. Ouldboukthitine (2011)	Inércia térmica do substrato constante e desprezível.	Um conjunto de equações soluciona os efeitos de transferência de massa da água nas propriedades do substrato

P. C. Tabares-Velasco (2011)	Inércia térmica do substrato desprezível e regime permanente	Modelo baseado em experimentações laboratoriais
Djedjig et al. (2012)	Os efeitos de transferência de massa da água e a inércia térmica são contabilizados	O regime é transiente e a evapotranspiração domina o processo

Del Barrio (1998) foi uma das pioneiras nestes estudos mais complexos, desenvolvendo um modelo de balanço de energia que considera as trocas de calor por radiação de ondas longas e curtas, o efeito de resfriamento proporcionado pela evapotranspiração, e as trocas sensíveis e por condução no solo, a partir de uma temperatura externa mantida constante. Outros modelos contabilizam a vegetação e o ar aprisionado entre ela e o substrato, como uma só camada, compondo um único “material” (TAKAKURA et al., 2000). Modelos ainda mais completos como o de Alexandri e Jones (2007) contabilizam também as trocas de calor convectivas entre a vegetação, o substrato e o ar circundante em diferentes parcelas. Este modelo considera inclusive a não uniformidade da temperatura e umidade ao longo da folhagem e do substrato, em um modelo bidimensional.

Feng, Meng e Zhang (2010) deram maior ênfase aos processos de fotossíntese. De acordo com Jim (2012), em relação à composição da vegetação utilizada, as variáveis que exercem maior influência sobre o desempenho térmico são: a quantidade de biomassa e sua complexidade metabólica. Em seu estudo, foi analisada a utilização de três tipos diferentes de vegetação: gramínea, arbustiva e herbácea rasteira, para o clima de Hong-Kong. Outras características da vegetação, como a índice de cobertura da área de superfície foliar e a densidade foliar influenciam também as trocas de calor, porém neste caso em menor escala. Os estudos de Zinzi e Agnoli (2012), que utilizaram o modelo de Sailor, apresentaram resultados semelhantes, com as alterações do índice de área foliar resultando em pequenas variações de desempenho. Entretanto resultados diferentes foram relatados nos estudos de simulações paramétricas realizados por Capazzoli et al (2013). Utilizando-se

do mesmo modelo, o índice de área foliar foi identificado entre os parâmetros de maior impacto sobre o desempenho térmico.

A integração dos modelos matemáticos desenvolvidos às ferramentas de simulação via códigos de programação é uma questão relevante. Modelos apurados oferecem a oportunidade da realização de estudos de simulações mais detalhados, gerando novos dados, que por sua vez voltam a servir de base para estudos que busquem evoluir a respeito das simplificações dos processos de transferências de calor e massa dos modelos. As possibilidades apresentadas pelas simulações não se limitam ao entendimento da interação entre a cobertura e o ambiente externo, mas também permitem a investigação e a avaliação de processos que envolvem outros elementos da edificação e que integram o também desempenho térmico das coberturas verdes. Como exemplos podem ser citados, os sistemas de irrigação, os elementos de sombreamento e interações com painéis fotovoltaicos. As comparações entre as diferentes configurações possíveis e com outros tipos de cobertura, como em alguns dos estudos apresentados neste trabalho, atraem maior interesse para o desenvolvimento dos modelos (TABARES-VELASCO; SREBIC, 2012).

Conforme apresentado na revisão, no desempenho térmico das coberturas verdes, características do substrato, como a condutividade térmica, capacidade térmica e albedo, variam em função da umidade contida no mesmo. Em um cenário real diferentes propriedades e a geometria da vegetação, variam em função de diversos parâmetros. Estes não somente relacionadas ao teor de umidade contido no substrato, mas também com outros fatores que afetam a saúde da vegetação, como a idade das plantas e a disponibilidade de nutrientes e ph do substrato. As plantas murcham e sofrem constantes mudanças em sua atividade metabólica em função de fatores climáticos como escassez prolongada de chuvas, chuvas torrenciais, geadas e precipitação de neve. Estas variabilidades devido as suas singularidades são consideradas constates no modelo escolhido (SAILOR, 2008), o que alerta para possibilidades de constantes melhoras na precisão e representação de diversos fenômenos físicos na formulação dos diversos modelos.

Frankenstein e Koenig (2004) desenvolveram metodologias e formulações de cálculos para o Corpo de Engenheiros do Exército Americano, conhecida como FASST

(*FAST All Season Soil Strength*). Este modelo teve forte derivação de dois modelos utilizados em modelagens atmosféricas (de biosfera). Estes modelos calculam simultaneamente as temperaturas da superfície do solo e da vegetação para cada intervalo de tempo (SAILOR, 2008). Utilizando o modelo de Frankenstein e Koenig (2004) como base, Sailor (2008) adaptou os cálculos para uma cobertura verde, através de importantes variáveis e elementos do balanço energético. Particularmente a espessura do substrato de uma cobertura verde é pequena comparada à espessura do solo presentes no ambiente natural (o qual os modelos que serviram de base se utilizam).

O modelo foi integrado ao programa *EnergyPlus*, uma ferramenta computacional de simulação de edificações gratuita, mantida pelo Departamento de Energia dos EUA, e por isso amplamente utilizada para análise térmica de edificações (GETTER et al., 2011). Pelos motivos citados e pela livre disponibilidade do programa, este foi o modelo escolhido para ser utilizado nesta pesquisa.

Ainda que simplificações sejam feitas e a variabilidade de certos fenômenos físicos seja deliberadamente desconsiderada no modelo, este inclui em seus cálculos de uma forma relativamente simples uma parcela considerável dos fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos no processo (JAFFAL et al., 2012). O modelo foi validado na Universidade da Flórida, a partir de medições de temperatura, de um edifício monitorado, com excelentes resultados, o que expressa as possibilidades de obtenção de resultados condizentes com situações reais (SAILOR, 2008).

2.4.1. O modelo integrado ao EnergyPlus - Sailor (2008)

O *EnergyPlus* é um programa de simulações energéticas em edificações, e utiliza dois dos códigos de simulação amplamente utilizados, o BLAST e o DOE-2. A primeira versão data de 2001 (SAILOR, 2008). O programa soluciona, em intervalos de tempo pré-determinados, incontáveis equações, fluxos e balanços de energia, em constantes interações com diversos elementos climatológicos e do entorno. O aproveitamento energético por iluminação natural, aquecimento

solar, e outras interações da edificação, não restritas a somente a energia, como a captação de águas pluviais e poluição atmosférica figuram entre as características que podem ser modeladas no programa. O *EnergyPlus* é constantemente atualizado por seus desenvolvedores, e, duas vezes ao ano o Departamento de Energia disponibiliza uma nova versão, visando integrar ao programa os avanços obtidos no campo de pesquisa de simulações computacionais.

Um modelo baseado em fenômenos físicos do balanço de energia de uma cobertura verde foi desenvolvido e integrado ao software de simulação *EnergyPlus* por Sailor, em 2008. Dentro do programa, um módulo permite ao usuário a especificação do “*ecorooft*”, somente como a última camada de uma cobertura. Com uma diversidade de parâmetros de entrada (Quadro 9), a classe de objetos de entrada disponível (*Material:RoofVegetation*) projetista explorar opções de design de coberturas verdes, incluindo espessura e propriedades térmicas e hídricas do substrato e as características de vegetação como as propriedades térmicas, a resistência estomatal mínima (parâmetro biofísico que rege a capacidade de transpiração da planta), altura e o índice de área de foliar. A entrada de água no sistema se dá de suas formas, através da definição de frequência e intensidade da irrigação e a precipitação que acompanha o arquivo climático. As camadas de drenagem e das membranas de proteção não são componentes do modelo, e necessitam ser modeladas separadamente, assim como a laje e demais componentes da cobertura (SAILOR, 2008).

Quadro 9 – Principais características contabilizadas no modelo. Fonte: Sailor (2008)

Características relevantes a serem definidas no modelo apresentado (Sailor, 2008)
Solo
Condutividade Térmica
Capacidade Térmica
Densidade
Vegetação
Altura
Índice de cobertura foliar
Cobertura fracional
Albedo
Resistencia estomatal

2.4.2. O balanço térmico do modelo

O modelo “Biosfera Simples”, apresentado por SELLERS et al. (1986) sobre o qual o modelo foi desenvolvido envolve sete variáveis de estado-físico: duas temperaturas superficiais (uma para a folhagem da vegetação e uma para a superfície do solo) duas interceptações de umidade (uma para a vegetação e outra para o substrato), e três diferentes “estoques” de umidade no substrato (dois níveis que podem ser alcançados pela vegetação e uma camada mais profunda em que a umidade penetra por difusão hidráulica e gravidade é descarregada para a drenagem).

De forma análoga o modelo para coberturas verdes apresentado por Sailor (2008), divide o balanço térmico em duas partes, porém utiliza-se de somente duas partições para o transporte de umidade no substrato, próximo à superfície e na chamada zona de raízes. Portanto, para cada timestep, duas equações de balanço são resolvidas simultaneamente, uma para a superfície da vegetação (Q_v) e uma para a superfície do solo (Q_s), 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 oferecer

os fluxos e informações para novo cálculo do balanço térmico, sucessivamente. O balanço em detalhes e as equações resultantes são complexos e aqui são apresentados de forma sumarizada. Informações mais detalhadas podem ser encontradas nas publicações dos autores (SAILOR, 2008; FRANKSTEIN; KOENIG, 2004; DICKENSON et al., 1986; SELLERS et al., 1986)

$$Q_v = \sigma_v [I_s (1 - \alpha_v) + \epsilon_v I_{iv} - \epsilon_v \sigma T_v^4] + \frac{\sigma_v \epsilon_s \epsilon_v \sigma}{\epsilon_1} (T_s^4 - T_v^4) \quad (2)$$

$$+ H_v + L_v$$

$$Q_s = (1 - \sigma_v) [I_s (1 - \alpha_s) + \epsilon_s I_{iv} - \epsilon_s \sigma T_s^4] \quad (3)$$

$$+ \frac{\sigma_v \epsilon_s \epsilon_v \sigma}{\epsilon_1} (T_s^4 - T_v^4)$$

$$+ H_s + L_s + K \times \frac{\partial T_s}{\partial z}$$

Como em uma cobertura convencional, o balanço térmico de uma cobertura verde é dominado pela radiação solar incidente (SAILOR, 2008). Neste modelo unidimensional, a vegetação é considerada uma camada única e homogênea sobre o substrato, que por sua vez é modelado como uma camada de características também homogêneas, por onde o fluxo de calor resultante das trocas sensíveis e latentes é transmitido por condução. A inércia térmica do substrato é desprezada (DJEDJIG et al., 2012). Portanto, de forma geral as equações do modelo consideram os seguintes processos de transferência de calor ao compor os balanços e fluxos contabilizados na camada de vegetação e no solo, a partir da radiação incidente (Figura 9):

(a) Absorção de radiação de ondas curtas pela vegetação e pelo substrato; $I_s (1 - \alpha_v)$ e $I_s (1 - \alpha_s)$

(b) Trocas por radiação de ondas longas entre a vegetação e o céu e entre o substrato e o céu; $\epsilon_v I_{iv} - \epsilon_v \sigma T_v^4$ e $\epsilon_s I_{iv} - \epsilon_s \sigma T_s^4$

(c) Trocas por radiação de ondas longas entre a vegetação e o céu e entre as folhas e o substrato; $\frac{\sigma_v \epsilon_s \epsilon_v \sigma}{\epsilon_1} (T_s^4 - T_v^4)$

(d) Trocas por convecção entre a vegetação, o substrato e o ambiente externo, incluindo o ar “aprisionado” entre a camada de vegetação e o substrato; $\rightarrow H_v$ e H_s

(e) Fluxos de calor latente contabilizados como a evaporação da umidade do solo e a transpiração realizada pela vegetação. $\rightarrow L_v$ e L_s

(f) Trocas por condução no substrato (que por sua vez trocam calor com as demais camadas da cobertura modeladas fora do modelo de cobertura verde). $\rightarrow K \times \frac{\partial T_s}{\partial z}$

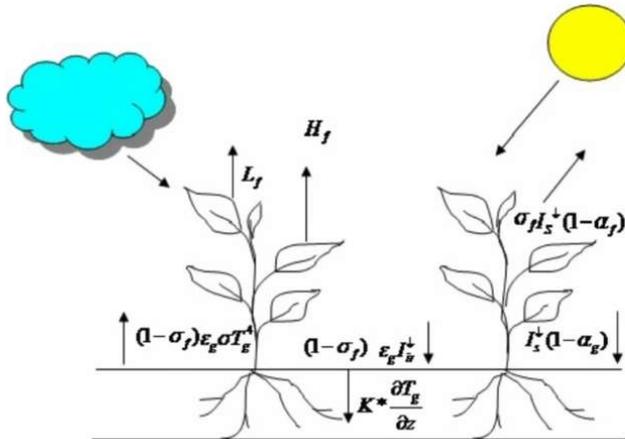


Figura 9 – O balanço térmico na cobertura verde, segundo o modelo. Fonte: Sailor (2008)

As parcelas do balanço térmico referentes às trocas por radiação são mais simples e dependem apenas das temperaturas superficiais, refletâncias e emissividades da vegetação e do substrato, e a radiação de solar incidente de ondas curtas e a radiação infravermelha do céu. A fração correspondente destas trocas de cada um é regida pela cobertura fracional, e explicada no próximo parágrafo.

As trocas por convecção que ocorrem na vegetação e no substrato são influenciadas pelo diferencial de temperaturas entre eles e a do ar próxima a cobertura, e a velocidade do vento próxima a superfície da vegetação. No caso da vegetação esta também é dependente do índice de área foliar (*Leaf Area Index* – LAI). O índice de área foliar é o principal parâmetro que representa a abundância da vegetação da cobertura. Este

parâmetro é uma relação da área projetada pelas folhas da vegetação sobre a área da superfície do substrato. Por exemplo, se a área somada da superfície das folhas for três vezes maior que a área ocupada pela cobertura, valor do LAI seria três. A cobertura fracional representa a fração da cobertura que é sobreposta por um ou mais folhas. Definindo-a de uma forma direta é a fração do substrato sombreada pela vegetação. É esta variável que também define as parcelas de trocas radiativas que ocorrerão entre as interfaces solo/vegetação e o ambiente externo, e é calculada diretamente a partir do índice de área foliar.

Consideradas as trocas de calor latente, ocorrem transferências também de massa através da remoção de umidade da superfície do solo pela evaporação, depende da velocidade do vento próxima à superfície e a diferença entre a umidade relativa do ar e o teor de umidade do substrato. A partir desta diferença, para cada temperatura da superfície do substrato, um coeficiente de vaporização fornece a temperatura do ar circundante para qual ocorrerá à evaporação.

A outra parcela de transferência de massa é a remoção de umidade do substrato através da transpiração por parte da vegetação. Este é um processo metabólico / fisiológico e por isso mais complexo. Este processo é regido pela abertura e fechamento dos estômatos. Estes são pequenas aberturas na superfície foliar, por onde a umidade retirada do substrato é liberada para atmosfera sob a forma de vapor d'água. O diferencial de pressão de vapor entre o interior das células vegetais e o ar circundante determinará sua abertura ou fechamento. A resistência a esta difusão de vapor d'água para atmosfera é chamada resistência estomatal. Esta característica da vegetação dependerá da intensidade luminosa (que rege a fotossíntese), teor de umidade do solo e o diferencial de pressão de vapor entre os estômatos e o ar circundante.

A resistência estomatal mínima é uma característica da vegetação, portanto, são aquelas em que as condições são mínimas para que ocorra o processo de transpiração. A resistência estomatal a cada momento dependerá de quatro fatores no modelo, relacionados à radiação solar, umidade relativa do ar, teor de umidade do substrato e o índice de área foliar. O modelo também contabiliza a resistência aerodinâmica

às trocas latentes, em função da rugosidade da camada de vegetação.

No modelo unidimensional, é assumido que as transferências de calor ocorrem somente no sentido vertical. Para as camadas horizontais as temperaturas seriam homogêneas. Isto permite uma relação menos complexa para que o modelo contabilize as alterações das propriedades térmicas do substrato em resposta a variação do conteúdo de umidade. Sailor (2008) realizou experimentos com oito diferentes tipos de substrato para explorar estas variações. A difusividade e a condutividade térmica demonstraram variar linearmente de acordo com o nível de saturação do substrato. Em seus experimentos os substratos quando saturados demonstraram possuir o dobro da condutividade e capacidade térmica 40% maior em média, que os mesmos substratos quando secos (SAILOR, 2008). Tabares-Velasco e Srebic (2012) posteriormente encontraram relações similares ao validar o modelo desenvolvido por eles.

Diversas aproximações e correções são feitas através dos cálculos com “fatores de estabilidade”. A adição de umidade ao substrato altera o albedo (em um acréscimo máximo de 8% quando seco que é calculado por uma função aproximada) também de forma proporcional. O peso da umidade no solo também é contabilizado alterando a densidade do mesmo.

A umidade entra no sistema através da irrigação e da precipitação, e sai de três formas: evaporação do substrato, evapotranspiração pelas folhas e *runoff*. A entrada de água no substrato é limitada a $0,0125\text{m}^3/\text{m}^2$ por hora (correspondente 12,5 mm de chuva) e as variações das propriedades térmicas são limitadas a uma variação de $\pm 10\%$ por hora. Estas limitações se dão para evitar cálculos imprecisos e até mesmo a instabilidade do modelo. Ainda que seja aparentemente uma aproximação simplificada, são captadas as variações nominais de umidade diárias e sazonais (SAILOR, 2008). Apesar das limitações ressalta-se a recomendação deste modelo, e o fato de ter sido utilizado em outros estudos com resultados satisfatórios e condizentes com cenários reais (SAADATIAN et al., 2013).

O modelo foi validado a partir de dados de monitoramento na *University of Central Florida*. Apesar da não existência de dados de temperatura superficial do substrato da cobertura monitorada, as observações experimentais e das simulações

computacionais se mostraram coerentes, caracterizando o sucesso na incorporação do modelo a ferramenta *EnergyPlus*. Testes adicionais de sensibilidade foram realizados, e as variações em parâmetros-chave corresponderam ao que era esperado. Como exemplo: (a) um incremento na espessura da camada de solo resultou em maior efeito de isolamento; (b) o aumento da abundância de vegetação resultou em um maior efeito de resfriamento no verão e maior necessidade de aquecimento no inverno; (c) o aumento de irrigação beneficiou o desempenho térmico em climas secos (SAILOR, 2008).

O modelo representa um avanço nas possibilidades de entendimento do desempenho energético das coberturas verdes. O próprio autor aponta como possíveis aprimoramentos, a possibilidade de utilizar-se de mais de uma cobertura verde por simulação, a utilização de mais de um tipo de cobertura verde em uma mesma laje, o aprimoramento dos esquemas de controle da irrigação inteligentes e adaptações para que o modelo interprete melhor variações bruscas nas propriedades térmicas do substrato, por exemplo, as associadas aos eventos de chuvas intensas.

2.5. Conclusão da revisão

Este capítulo apresentou uma revisão de literatura com o objetivo de contextualizar os aspectos energéticos das coberturas verdes, tendo como ponto de partida a problemática da redução do consumo energético de edificações. O efeito das ilhas de calor urbanas e as altas temperaturas dos ambientes urbanos, inegavelmente estão relacionados à parte do consumo de energia por parte das edificações (SANTAMOURIS et al., 2001). Portanto, lidar melhor com esta situação é um ponto importante na busca pela eficiência energética das edificações, através da melhora do desempenho termo-energético de seus componentes. A análise de artigos da literatura disponível permite concluir que: dentre diversas estratégias apresentadas para a mitigação destes efeitos, as coberturas são um dos alvos de maior potencial (AKBARI et al., 2008).

Estudos foram apresentados, a partir dos quais se pode concluir que as coberturas verdes demonstram potencial significativo de proporcionar melhorias ao desempenho termo-

energético das edificações, podendo inclusive equiparar-se aos de algumas das melhores alternativas de redução de consumo, como as coberturas frias, o uso de isolamento térmico e o sombreamento (GAFFIN et al., 2005, ZINZI; AGNOLI, 2012, AKBARI et al., 2005). Entretanto, diferentemente das coberturas frias, que se apoiam somente no aspecto energético, as coberturas verdes são amplamente discutidas como uma forma de transformar positivamente as cidades em diversos aspectos, com benefícios de grande valor para o ambiente urbano que ultrapassam os aspectos energéticos (BERARDI et al., 2014).

A revisão demonstra que este é um tema atual e internacionalmente constitui um crescente campo no âmbito das pesquisas nas áreas de engenharia e arquitetura (BLANK et al., 2013). Em âmbito nacional ainda são numerosas as pesquisas que se dedicaram ao desempenho energético das coberturas verdes em maiores detalhes. Estudos experimentais estão disponíveis, porém considerando estudos de simulações computacionais, não foram encontrados trabalhos na literatura brasileira.

Ao longo da revisão foram abordados autores que demonstraram a preocupação sobre a necessidade da melhor compreensão dos aspectos que envolvem os processos de trocas de calor nas coberturas verdes. Eles investiram esforços variados no campo do desenvolvimento de novos modelos e estudos experimentais e de simulação, em diferentes edificações e climas. Os resultados obtidos são, em sua maioria, satisfatórios, com conclusões que apontam para validações a partir de balanços térmicos reais e dos benefícios ao desempenho térmico das coberturas verdes.

Dentre os modelos matemáticos discutidos, destaca-se o de Sailor (2008) por ser incorporado ao programa *EnergyPlus*. Este programa vem sendo utilizado em vários estudos com resultados diferenciados entre si, dados que os parâmetros das simulações e as cidades simuladas são diferentes (CAPAZOLLI et al., 2013; JAFFAL et al., 2012; ZINZI; AGNOLI, 2012). Um dos poucos pontos controversos quanto ao desempenho termo-energético das coberturas verdes, diz respeito à influência sobre as necessidades de cargas térmicas de aquecimento em períodos frios. Alguns autores obtiveram até mesmo uma pequena redução enquanto outros demonstram o aumento desta necessidade. É consenso entre os autores que o desempenho

termo-energético é fortemente impactado, e possivelmente dominado, pelo clima e suas características. Em situações de climas quentes, com demandas de resfriamento significativas é inegável a melhora do desempenho termo-energético, pois todos os autores obtiveram reduções de consumo energético em diversos níveis (ALEXANDRI; JONES, 2012; ZINZI; AGNOLI, 2012; JAFFAL et al., 2012; SANTAMOURIS et al., 2007). Este fato torna muito interessante a análise através de simulações em âmbito nacional, pois o Brasil é um país que possui climas quentes e maior demanda de resfriamento predominante na maior parte do território.

Unanimidade entre os estudos é o fato de que o isolamento da cobertura (JAFFAL et al., 2012), como também da edificação como um todo (ZINZI; AGNOLI, 2012), limita de forma considerável os efeitos das coberturas verdes e frias sobre o desempenho térmico da edificação (JAFFAL et al., 2012; ZINZI; AGNOLI, 2012). Edificações populares, de baixa renda ou habitações de interesse social demonstram potencial de serem beneficiadas. Considerando as tipologias das construções existentes no Brasil ainda são maioria as que não possuem isolamento (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015).

Assim, apresentada a revisão bibliográfica, conclui-se que a melhor compreensão dos aspectos energéticos das coberturas verdes e a investigação do seu desempenho termo-energético em alguns casos definidos é parte da atual demanda acadêmica. Isto se torna a motivação do presente trabalho, aliado à colaboração investigativa se as coberturas verdes são elementos capazes de melhorar o desempenho termo-energético das edificações, ajudando no melhor equilíbrio das interações urbanas (BERARDI, 2013; BERARDI et al., 2014, SANTAMOURIS, 2014).

3. MÉTODO

O presente capítulo apresenta o método utilizado neste trabalho. São apresentadas detalhadamente as três etapas de simulação que constituem o método. Cada uma dessas etapas é apresentada em uma seção própria do capítulo onde definem-se os casos simulados, os parâmetros de entrada e demais configurações. As simulações computacionais foram realizadas no programa *EnergyPlus*, versão 8.4. O procedimento das simulações e a escolha das variáveis de saída analisadas (o produto resultante das simulações) são apresentados neste capítulo. A análise e discussões dos resultados são apresentados posteriormente no capítulo 4.

A seção 3.1 introduz os parâmetros do protótipo e do ambiente utilizado nas simulações. Foi idealizado um modelo de testes. Suas dimensões, características e demais detalhes são descritos nessa seção. Em sequência, a seção 3.2 caracteriza o entorno e fatores externos utilizados nas simulações, apresentando os climas e as referências dos arquivos climáticos utilizados.

A seção 3.3 descreve a primeira das três etapas de simulações. Essa consiste em uma série de 1125 simulações paramétricas. As simulações consistiram em variações pré-determinadas de parâmetros de entrada, com a finalidade de possibilitar uma análise de sensibilidade do modelo estudado. Na primeira etapa, todas as simulações foram realizadas em uma única cidade (Belém-PA) e somente a coberturas verde foi analisada.

Em seguida a seção 3.4 apresenta a segunda etapa de simulações, onde foram realizadas simulações em três diferentes cidades que apresentam características climatológicas distintas (Belém-PA, Brasília-DF e Curitiba-PR). A finalidade desta etapa foi produzir resultados que possam auxiliar no melhor entendimento a respeito do desempenho térmico das coberturas verdes e frias em diferentes climas do Brasil, segundo o modelo estudado.

Na segunda etapa foram realizadas simulações buscando-se resultados que permitissem a comparação do desempenho térmico das coberturas verdes com outros tipos de cobertura. Assim, uma cobertura convencional e uma cobertura fria também foram simuladas.

Na terceira etapa as coberturas foram acrescidas de uma camada de isolamento. A finalidade desta etapa foi analisar os impactos da presença desta camada sobre o desempenho térmico das coberturas verdes segundo o modelo utilizado. O fluxograma da Figura 10 resume as três etapas que constituem o método.

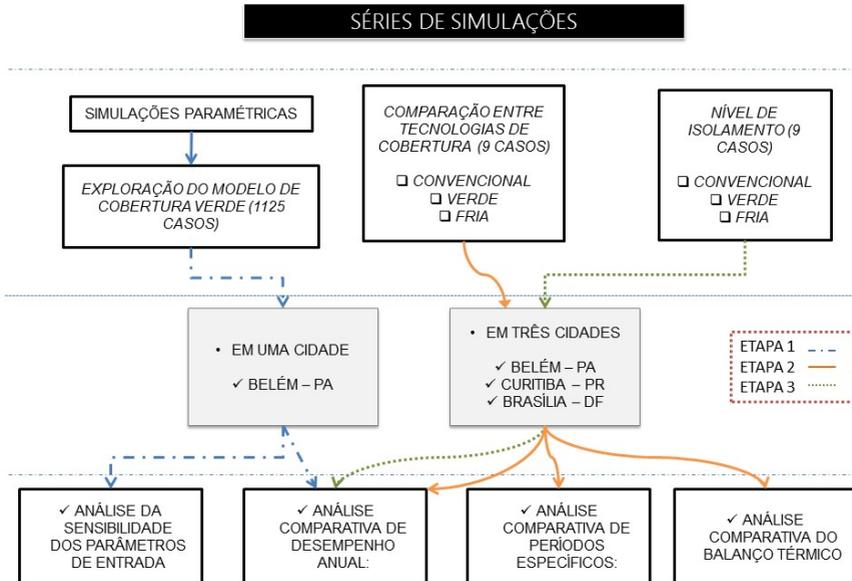


Figura 10 – Fluxograma que representa o resumo da metodologia da pesquisa

3.1. O modelo de testes simulado

A definição dos parâmetros de simulação se iniciou com a escolha do ambiente que foi modelado para ser alvo da análise térmica. O modelo de testes utilizado nas simulações deste trabalho representa uma única zona térmica de dimensões 4m x 4m, totalizando 16m², com 2,8m de altura e 44,8 m³ de volume interno (Figura 11). Devido à finalidade da investigação se voltar exclusivamente para a influência dos fatores climáticos e os processos de trocas de calor que ocorrem na cobertura, optou-se

por utilizar superfícies adiabáticas para compor as paredes e o piso da sala simulada. Internamente, é necessária configurar os materiais que compõem tais superfícies adiabáticas. Essas superfícies foram compostas por um material desprovido de inércia térmica (Poliestireno expandido – Quadro 2). O entorno da edificação foi definido como urbano (*Terrain:Urban*).

O ambiente interno foi artificialmente condicionado, de forma constante, ao longo de todo período (um ano) de simulação. O sistema escolhido foi o sistema de cargas térmicas ideais a partir de cargas fixas (*Ideal Loads Air System*), sem limites de capacidade operativa, caracterizando a análise de desempenho térmico. Os *setpoints* do termostato foram fixados em 22°C para aquecimento, e, 24°C para resfriamento, de forma a simular uma temperatura ambiente de relativo conforto térmico. Estes valores foram escolhidos por representaram uma faixa de $\pm 1^\circ\text{C}$ a partir da temperatura de 23°C.

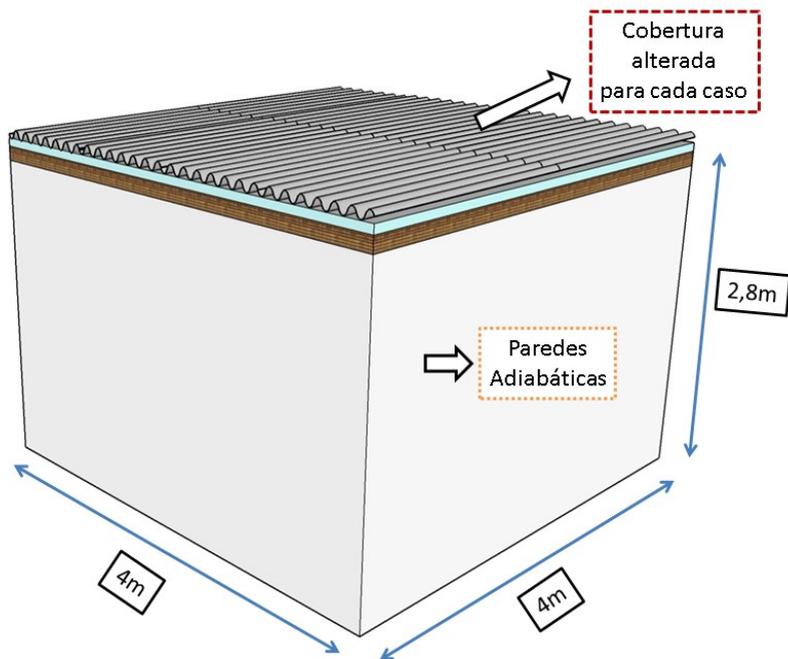


Figura 11 – Representação em 3D e da sala adiabática utilizada nas simulações.

Em todas as etapas de simulações, as características do ambiente simulado foram mantidas constantes, com a exceção das propriedades e atributos da cobertura, e dos arquivos climático, que serão descritos nos itens a seguir.

3.2. As coberturas utilizadas

Ao longo das etapas de simulação foram utilizados três tipos de coberturas que são aqui apresentadas: (a) Coberturas verdes, em diferentes configurações; (b) Cobertura de telha de fibrocimento; (c) Cobertura fria de fibrocimento.

A primeira camada da cobertura, que foi utilizada em todos os casos simulados, é uma laje armada em blocos cerâmicos, com espessura total de 12 cm. No Quadro 10 estão descritas as propriedades térmicas dos materiais e as espessuras utilizadas nas simulações.

Camadas dos Modelos	Espessura (m)	Densidade (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/m. K)	Calor específico (J/kg.K)
Poliestireno Exp. (Paredes)	0,15	10	0,001	2500
Isopor (Isolante)	0,15	15	0,04	1420
Laje mista	0,12	1087	1,05	920
Cobertura Fibrocimento / Fria				
Fibrocimento ($\epsilon = 0,9$)	0,008	1800	0,65	840
Câmara de ar	$R = 0,21 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$			
Cobertura Verde				
Camada filtrante	0,005	160	0,06	2500
Camada de drenagem	0,06	800	0,08	920
Barreira impermeável	0,007	1200	0,17	920

Quadro 10 – Propriedades térmicas dos materiais utilizados nas simulações.

A cobertura convencional foi definida como uma cobertura composta de telha de fibrocimento e uma câmara de ar não ventilada inserida entre a laje da cobertura e a telha (Figura 12). Diferenciam-se estruturalmente somente as coberturas verdes e a cobertura convencional. A cobertura fria utilizada foi uma simples reprodução desta cobertura convencional com telha de fibrocimento, com a alteração do valor de absorvância solar de 0,75 para 0,2. Esta alteração é uma forma de representar de forma simples uma pintura branca na superfície externa da

cobertura. A emissividade do fibrocimento em ambas as configurações é 0,9. Para a resistência térmica da câmara de ar, optou-se por usar o valor correspondente ao fluxo descendente. Esta escolha foi necessária pois no programa não é possível configurar na simulação um valor diferenciado para fluxo ascendente e um para fluxo descendente.

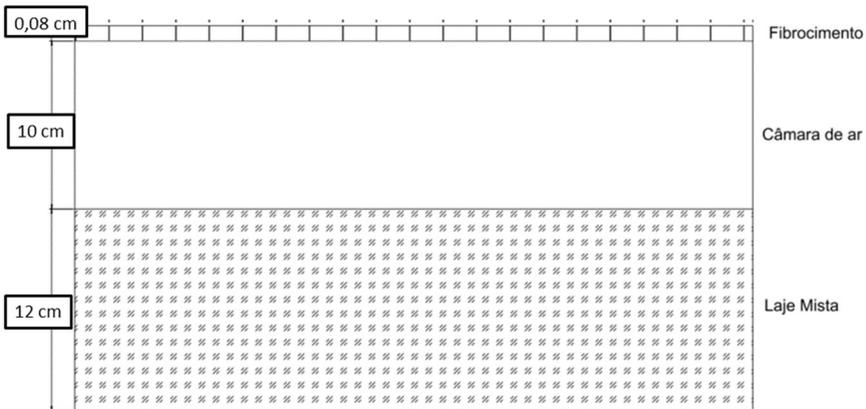


Figura 12 – Perfil da cobertura utilizada para as configurações convencional e fria.

No caso das coberturas verdes, suas características são definidas pelos parâmetros de entrada de uma classe específica correspondente ao modelo específico de coberturas verdes no *EnergyPlus*. Conforme apresentado na revisão bibliográfica este modelo contempla apenas as configurações das camadas de substrato e da vegetação. As demais camadas que compõem as coberturas verdes devem ser definidas junto aos demais materiais utilizados na simulação, e estão representadas na Figura 13. Foram incluídas três camadas sobrepostas sobre a laje na configuração da cobertura verde: Uma camada filtrante, uma de drenagem e uma barreira impermeabilizante. As características destas camadas foram as mesmas utilizadas por Capozzoli et al. (2013). No Quadro 10 estão representadas as propriedades térmicas e a espessuras das camadas utilizadas. Deve-se aqui ressaltar que o presente estudo não contempla eventuais reforços estruturais necessários para aplicação prática das variações de configurações de coberturas verdes utilizadas.

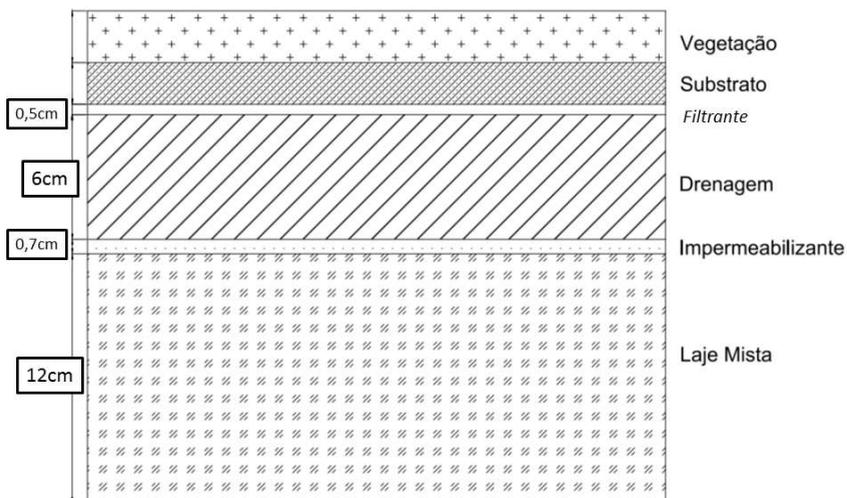


Figura 13 – Perfil da cobertura verde utilizada.

3.3. Climatologia e arquivos climáticos

Conforme observado na revisão bibliográfica, ainda não são numerosas as pesquisas de simulação tanto em climas quentes, do ponto de vista internacional, como também em cidades que representem climas específicos brasileiros. Assim, optou-se por realizar as simulações em três diferentes cidades que representassem diferentes climas do Brasil. São apresentados nesta seção, as cidades e algumas características climáticas apresentadas nos respectivos arquivos climáticos utilizados nas simulações.

Foram escolhidas: uma cidade que apresentasse um clima quente (*equatorial úmido*) o ano todo (Belém-PA), uma cidade que apresentasse sazonalidade anual, entre clima úmido e clima seco (*tropical seco e úmido*), com uma época do ano predominante quente e outra mais fria (Brasília-DF,) e a capital mais fria (*subtropical úmido*) do país (Curitiba-PR). Considerando a classificação do zoneamento bioclimático brasileiro destas cidades, Belém é pertencente à Zona 8, Brasília à Zona 4 e Curitiba à Zona 1 (Figura 14). Maiores informações sobre o

zoneamento bioclimático brasileiro podem ser encontradas na referida bibliografia (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014).

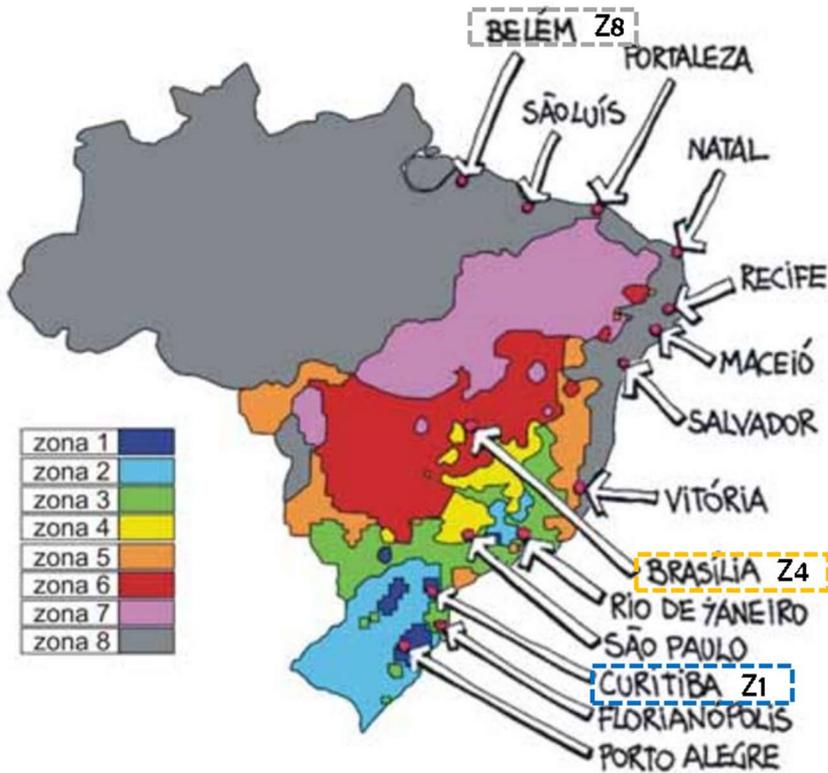


Figura 14 – Zoneamento bioclimático brasileiro com as cidades estudadas em destaque. Fonte: (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014)

Para que uma simulação computacional do *EnergyPlus* seja espacialmente localizada em uma determinada cidade, utilizam-se os chamados arquivos climáticos, que carregam as características climáticas locais. Estes arquivos consistem na organização de dados de meteorológicos e de radiação solar, registrados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o período de 2001 a 2010 (RORIZ, 2012). Os arquivos climáticos utilizados nesta pesquisa foram obtidos através da base de dados de arquivos climáticos mundiais atualizados, disponível

online a partir de “*Climate.OneBuilding.Org*”. Os arquivos climáticos brasileiros mais atualizados são os elaborados por Maurício Roriz. Em 2015 a equipe do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE – UFSC) juntamente com os pesquisadores Dru Crawley e Linda Lawrie estabeleceram correções necessárias para os climas analisados, pois era possível identificar imprecisões na irradiância global horizontal apresentada nos arquivos climáticos de 2012 (SCHELLER, MELO e LAMBERTS, 2015).

Para cada cidade os arquivos climáticos foram analisados a partir de uma simulação. Foram requeridas variáveis de saída que permitissem a observação da climatologia das cidades, conforme registradas nos arquivos climáticos. A Figura 15 apresenta a evolução das temperaturas do ar e radiação solar incidente média (média horária) em cada cidade. Na Figura 16 estão representadas as médias mensais de umidade relativa do ar e precipitação (média diária).

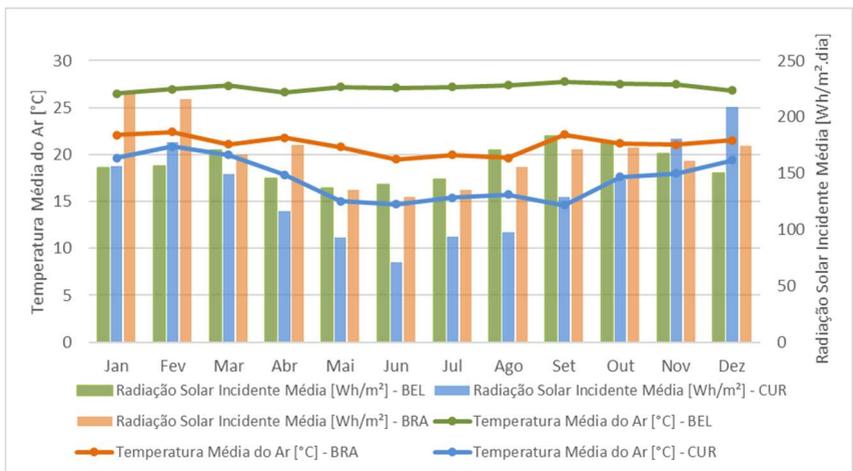


Figura 15 – Representação da evolução mensal das médias de temperaturas do ar e radiação solar incidente segundo os arquivos climáticos das três cidades.

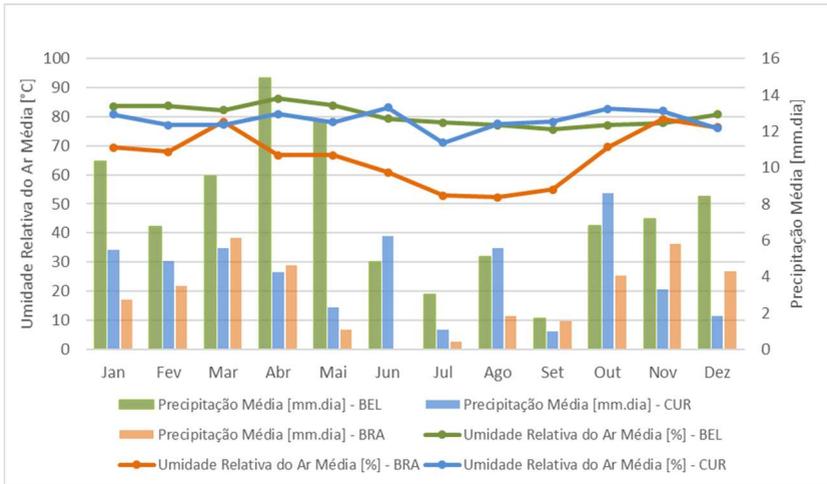


Figura 16 – Representação da evolução mensal das médias de umidade relativa do ar e precipitação segundo os arquivos climáticos das três cidades.

O Quadro 11 apresenta o resumo dos resultados de importantes elementos meteorológicos, referentes a cada cidade para o período de um ano. Pode-se observar que as maiores temperaturas foram registradas em Belém e as menores em Curitiba, entretanto os maiores índices de radiação solar incidente encontram-se em Brasília. Os índices pluviométricos de Belém são consideravelmente mais altos que os das demais cidades. As menores umidades relativas são registradas em Brasília.

Quadro 11 – Resumo estatístico obtido para os valores contidos nos arquivos climáticos.

Elementos climáticos	Belém	Brasília	Curitiba
Temperatura máxima (°C)	34,2	32,5	31,6
Temperatura média (°C)	27,2	21,1	17,4
Temperatura mínima (°C)	22,2	11,3	3,8
Umidade relativa máxima (%)	96	97	99
Umidade relativa média (%)	80	66	79
Umidade relativa mínima (%)	37	17	24
Precipitação pluviométrica (mm.ano)	2722	1093	1523
Radiação solar total incidente (kW/m ² .ano)	1385	1465	1180
Velocidade do vento média (m/s)	0,5	1,3	1,2

3.4. As simulações paramétricas

A utilização do modelo de coberturas verdes incorporado ao *EnergyPlus* (SAILOR, 2008), permite configurar uma diversidade de características e propriedades das coberturas verdes através de variados parâmetros de entrada. Estes parâmetros disponíveis para configuração estão representados na interface do programa através da classe de objetos *Material:RoofVegetation*. As definições de um objeto nesta classe incluem uma série de parâmetros relacionados às características físicas, propriedades térmicas e espessuras da camada de vegetação e do substrato utilizado. Todos estes parâmetros passíveis de configuração estão representados no Quadro 12, com seus valores-padrão e respectivas faixas de “valores típicos”, segundo as referências do próprio modelo (*Engineering Reference*). Estão grifados os parâmetros utilizados nesta etapa e que serão melhor apresentados nesta seção.

Quadro 12 – Parâmetros de entrada do modelo, seus valores-padrão, típicos e os adotados na parametrização.

Parâmetros de entrada [Class;Material:RoofVegetation]				
	Faixa possível	Valor padrão	Valores típicos	Valores adotados
Referentes à Vegetação				
Altura das plantas (m)	0,005 - 1	0,2	-	0,05 – 0,1 – 0,2 – 0,5 - 1
Índice de área foliar	0,001 - 5.0	1.0	-	0,25 - 0,5 - 1 - 2 - 5
Refletância das folhas	0,05 - 0,5	0,22	0,18 – 0,25	0,25
Emissividade das folhas	0,8 – 1	0,95	-	0,95
Resistência estomatal mínima (s/m)	50 – 300	180	-	120 – 180 - 240
Referentes ao Substrato				
Rugosidade	<i>VeryRough - VerySmooth</i>	<i>MediumRough</i>		<i>MediumRough</i>
Espessura (m)	0,05 - 0,7	0,1	0,1 – 0,25	0,05 – 0,10 – 0,15 0,25 – 0,5
Condutividade (W/m.K)	0,2 - 1,5	0,35	0,3 – 0,5	3 Tipos de Substrato [Quadro 13]
Massa específica (kg/m³)	300 - 2000	1100	400 - 1000	
Calor específico (J/kg.K)	2000 (máx)	1200	-	
Absortância térmica	0 – 1	0,9	0,9 – 0,98	0,9
Absortância solar	0,4 – 0,9	0,8	0,6 – 0,85	[Tipo de Substrato]
Absortância visível	0 – 1	0,75	-	
Conteúdo volumétrico saturado de umidade	0,1 – 0,5	0,3	-	0,3
Conteúdo volumétrico residual de umidade	0,01 - 0.1	0,01	-	0,01
Conteúdo volumétrico inicial de umidade	0,05 – 0,5	0,1	-	0,1
Método de cálculo da difusão da umidade no solo	<i>Simple / Advanced</i>	<i>Advanced</i>		<i>Advanced</i>
Fonte: EnergyPlus Engineering Reference				

Na primeira etapa de simulações desta pesquisa, oito parâmetros foram selecionados como alvo de testes com o objetivo de se obter uma melhor compreensão da sensibilidade dos principais parâmetros do modelo. Esta seleção e a posterior definição dos intervalos (*steps*) das parametrizações se deram com a coerência necessária para que duas questões fossem observadas: o potencial de variação de desempenho a partir das alterações de cada parâmetro e aspectos que caracterizem uma escolha real de configuração de cobertura verde. Foram utilizados como referência trabalhos apresentados revisão bibliográfica, como os de Capazzoli et al. (2013), Jaffal et al. (2012) e Rafahi e Talkhabi (2015).

Os oito parâmetros escolhidos foram divididos em cinco “grupos de variáveis” e submetidos as simulações paramétricas, isto é, uma nova simulação para cada valor alterado. As variações utilizadas totalizaram 1125 casos simulados, e estão representadas no fluxograma representado na Figura 17. Os oito parâmetros selecionados para as simulações paramétricas foram divididos em cinco variáveis para alteração, estas foram:

- (I) O índice de área foliar (LAI), com cinco valores utilizados, uma grandeza adimensional;
- (II) A espessura do substrato utilizado, com cinco diferentes valores, definida em metros;
- (III) A altura das plantas, com cinco valores utilizados, definida em metros;
- (IV) A resistência estomatal mínima das plantas, com três diferentes valores, definidos em s/m;
- (V) O tipo de substrato, variável que consistiu no agrupamento de quatro parâmetros (densidade, kg/m³; condutividade, W/m.K; calor específico, J/kg.K; e absorvância solar), em três variações de peso: leve, intermediário e pesado.

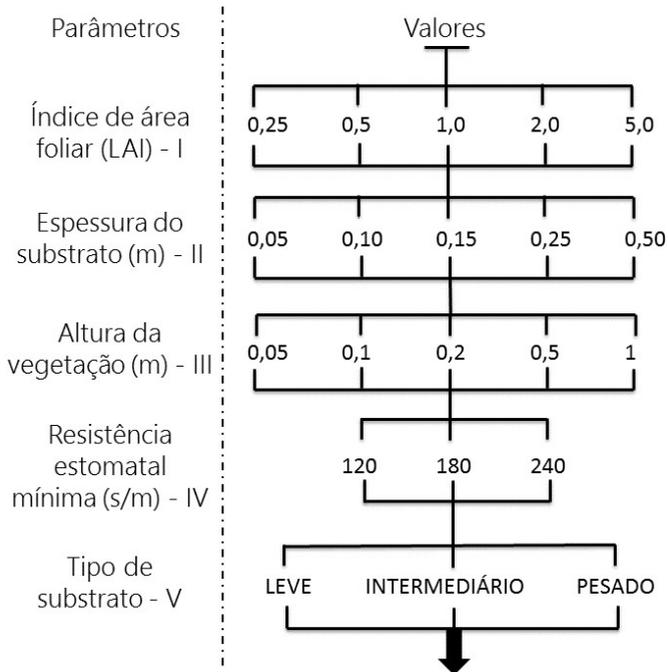


Figura 17 – Fluxograma das simulações paramétricas e parâmetros alterados (I a V).

Dentre as variáveis utilizadas relacionadas às características da vegetação, três foram alteradas. A primeira delas, a altura das plantas, foi selecionada devido a sua variabilidade na ocorrência real, visto que hoje, há a utilização de uma grande variedade de espécies e de diferentes técnicas de cultivo, facilitando o controle da altura da vegetação. As alturas de 5, 10, 20, 50 e 100 cm de vegetação foram adotadas.

O índice de área foliar (*Leaf Area Index* – LAI) é o principal parâmetro que representa a abundância da vegetação da cobertura. A cobertura fracional, que define as parcelas de trocas térmicas que ocorrerão entre as interfaces substrato/vegetação e o ambiente externo, é calculada diretamente a partir do índice de área foliar. Este parâmetro foi objeto de maiores análises em diversos estudos, apresentados na revisão. Capazolli et al. (2013) concluiu que o LAI exerce uma grande influência no desempenho térmico, entretanto os estudos de Jaffal et al.

(2012) demonstraram variações pequenas nos resultados a partir das alterações destes parâmetros. Essa aparente contradição conduziu à escolha deste parâmetro. Os cinco valores utilizados nas parametrizações foram 0,25, 0,5, 1,0, 2,0 e 5.

A refletância é a fração refletida da radiação solar incidente pela vegetação. Os valores típicos apresentados experimentalmente são da ordem de 0,2 (*Engineering Reference – EnergyPlus*). Neste trabalho, foi utilizado o valor de 0,25, de forma a uniformizar os valores de absorvância utilizados ao longo de todo o trabalho. A emissividade é um parâmetro que não foi variado pelo fato desta não demonstrar uma grande variância experimental. O valor utilizado foi 0,9.

A resistência estomatal mínima, conforme descrito na seção 2.5.1 se expressa na resistência das plantas ao transporte de umidade através de sua superfície. Experimentalmente este valor apresenta considerável variabilidade (SCURCLOC; ASNER; GOWER, 2001). Nas simulações paramétricas os valores de 120, 180 e 240 foram utilizados com a finalidade de analisar a sensibilidade deste parâmetro.

Dentre os parâmetros relacionados às características do substrato, cinco serão os alterados na etapa de simulações. Os parágrafos a seguir definem cada parâmetro referente às configurações do substrato e os valores utilizados nesta etapa do trabalho.

A rugosidade da camada de substrato influencia as trocas térmicas por convecção com o ambiente externo. Este parâmetro será mantido em sua configuração padrão: *MediumRough*. Conforme concluído a partir da bibliografia estudada, a espessura do substrato possui influência significativa no desempenho térmico da cobertura, motivo pelo qual este foi um dos parâmetros selecionados como alvo de alterações nas simulações paramétricas. Cinco valores de espessura do substrato foram utilizados, sendo eles: 5, 10, 15, 25 e 50 cm.

A absorvância solar, condutividade térmica, densidade e calor específico são características que podem ser determinadas pelo tipo de mistura em que se constitui o substrato utilizado. Por exemplo, substratos com maiores quantidades de matéria orgânica apresentam maior condutividade, enquanto aqueles com predominância de materiais sintéticos leves tendem a apresentar menores valores de condutividade e massa específica. A absorvância solar também varia com os diferentes

tipos de substrato, pois está relacionada à tonalidade de cor do mesmo. Um substrato com grande parte de sua composição sendo areia é razoavelmente mais claro, possuindo menor absorvência que um solo rico em matéria orgânica, por sua vez mais escuro. Estes quatro parâmetros foram agrupados e variados nesta etapa de simulações como três tipos de solo: leve, intermediário e pesado.

A composição percentual e os valores dos quatro parâmetros correspondentes, para cada tipo de substrato utilizado estão especificados no Quadro 13. Os valores adotados são provenientes dos estudos de Sailor (2008), de onde foram selecionados três, entre os oito tipos de substratos analisados experimentalmente. Foram escolhidas as opções: mais leve, mais pesado e a configuração mais próxima das médias entre os valores.

Quadro 13 – Os três tipos de substratos utilizados. Fonte: Adaptado de Sailor (2008).

Tipo	Composição (%)			
	Grânulos de pedrapomes	Mineral expandido	Composto orgânico	Areia
Leve	75	0	10	15
Intermediário	50	0	10	40
Pesado	0	50	0	50
	Massa específica (kg/m ³)	Condutividade (W/m. K)	Calor específico (J/kg.K)	Absortância solar
Leve	760	0,14	1251	0,61
Intermediário	1020	0,17	1093	0,72
Pesado	1400	0,21	890	0,81

Os conteúdos volumétricos de umidade saturado, residual e inicial utilizados foram 0,3 (30%), 0,01 (1%) e 0,1 (10%), respectivamente. O balanço hídrico da cobertura estará assim predominantemente sujeito à precipitação local introduzida pelos arquivos climáticos, com a saturação volumétrica de umidade sendo 30%. Com o conteúdo volumétrico de umidade residual

definido em 1%, o substrato em nenhum momento da simulação encontra-se completamente seco, o que eliminaria por completo os efeitos de evapotranspiração exercidos pelo solo e pela vegetação.

Como opção para o método de cálculo da difusão da umidade no solo, foi utilizada a opção *Advanced*, que foi incorporado ao modelo a partir de estudos posteriores aos de Sailor (DOE, 2016; SCHAAP; GENUCHTEN, 2006). Este método considera de forma mais aprimorada as trocas térmicas latentes e a inércia térmica do substrato, dividindo o substrato em nós e calculando a distribuição da umidade por um método de diferenças finitas.

Para os demais parâmetros do modelo, que não foram alvo da análise paramétrica, um valor próximo do padrão foi utilizado. Os valores adotados estão especificados no Quadro 12.

A cidade utilizada nesta etapa será Belém – PA, por ser esta a representante do clima mais quente entre os apresentados na seção 3.2. Esta etapa limitou-se ao estudo do desempenho da cobertura neste clima para se analisar a sensibilidade das configurações de cobertura verde quando utilizadas em situações de necessidade de resfriamento, comum a maior parte do país.

Estas simulações, foram realizadas no *EnergyPlus*, porém através da ferramenta auxiliar para simulações paramétricas complexas, o *JEPlus* (ZHANG; KOROLIJA, 2010). Esta ferramenta permite que sejam montadas árvores de parametrizações, a partir de grupos de entrada de parâmetros ou diferentes arquivos, e com a possibilidade de extração posterior das variáveis de saída agrupadas.

3.4.1. Análise dos resultados

Para os 1125 casos simulados avaliou-se o desempenho térmico anual de cada configuração testada. Para isso, foi solicitada como variável de saída através dos arquivos de entrada as cargas térmicas ideais totais, o que nesta etapa devido ao clima da cidade, corresponde somente às cargas térmicas de resfriamento. O nome correspondente da variável selecionada no programa é “*Ideal Loads Zone Total Cooling Energy*”, que corresponde à carga térmica necessária para

resfriar o ambiente mantendo-o na faixa de temperatura escolhida (22 – 24°C).

Duas foram as fases que compuseram esta análise. Primeiramente, os resultados dos valores de demanda de carga térmica de resfriamento integrados no período simulado foram apresentados, comparados e discutidos. Posteriormente realizou-se a interpretação e a análise em separado de cada parâmetro variado e sua influência sobre os resultados, através de análises gráficas.

3.5. Simulações em diferentes climas

Esta etapa teve o objetivo de analisar em maiores detalhes as variações do comportamento térmico das coberturas verdes e sua eficiência e desempenho térmico quando associado à diferentes climas.

Foram realizadas simulações em três diferentes cidades, apresentadas na seção 3.2. As cidades foram escolhidas de forma a representar climas distintos. Uma cidade de clima tropical úmido, Belém-PA; a capital estadual com o clima mais frio do país, Curitiba-PR; e um clima do interior que apresente as estações bem definidas (meio seco, meio úmido), para qual foi escolhida a capital, Brasília-DF. A representatividade dos climas nas simulações ocorre através da utilização dos arquivos climáticos. Estes arquivos possuem em seu conteúdo, um ano meteorológico com comportamento baseado em observações reais, que correspondem aos meses-padrão e índices de precipitação das cidades. As simulações, assim como na primeira etapa foram realizadas para o período de um ano.

Uma configuração de cobertura verde foi definida como caso base. Esta configuração foi idealizada como algo próximo do padrão adaptado a partir de configurações utilizadas em simulações por Zinzi e Agnoli (2012), Sailor (2008), Cappazolli (2013), e outros estudos apresentados na revisão bibliográfica. A Figura 18 apresenta a representação gráfica em 3D do modelo de cobertura verde. No Quadro 14 são apresentados especificamente os parâmetros de entrada utilizados.

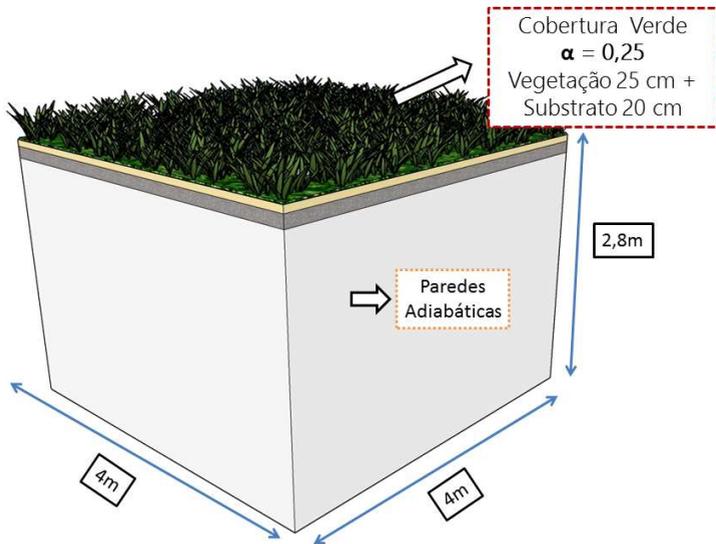


Figura 18 – Representação gráfica em 3D do modelo de cobertura verde.

Quadro 14 – Configuração da cobertura verde utilizada na 2ª etapa de simulações.

<i>[Class;Material:RoofVegetation]</i>	
Parâmetro de entrada	Valor utilizado
Referentes à Vegetação	
Altura das plantas (m)	0,25
Índice de área foliar	1,5
Refletância das folhas	0,25
Emissividade das folhas	0,9
Resistência estomatal mínima (s/m)	120
Referentes ao Substrato	
Rugosidade	<i>MediumRough</i>
Espessura (m)	0,2
Condutividade térmica (W/m.K)	0,2
Massa específica (kg/m ³)	1020
Calor específico (J/kg.K)	1100
Absortância térmica	0,9
Absortância solar	0,75
Absortância visível	0,75
Conteúdo volumétrico saturado de umidade (m ³ /m ³)	0,3
Conteúdo volumétrico residual de umidade (m ³ /m ³)	0,01
Conteúdo volumétrico inicial de umidade (m ³ /m ³)	0,15
Método de cálculo da difusão da umidade no substrato	<i>Advanced</i>

Assim como na primeira etapa de simulações, o balanço hídrico da cobertura verde esteve sujeito somente à precipitação apresentada pelos arquivos climáticos. Optou-se pela ausência de irrigação, pois esta escolha resultaria em uma maior influência

do fator climático sobre o desempenho da cobertura, abordagem semelhante foi realizada por Zinzi e Agnoli (2012) em seus estudos.

Com a finalidade de prover uma análise comparativa com outros tipos de coberturas, foi simulado também para cada cidade uma configuração de cobertura convencional e uma fria, com telha de fibrocimento, conforme as configurações apresentadas na seção 3.2 do método. Nas Figuras 17 e 18 estão representados graficamente os modelos das coberturas convencional e fria utilizadas.

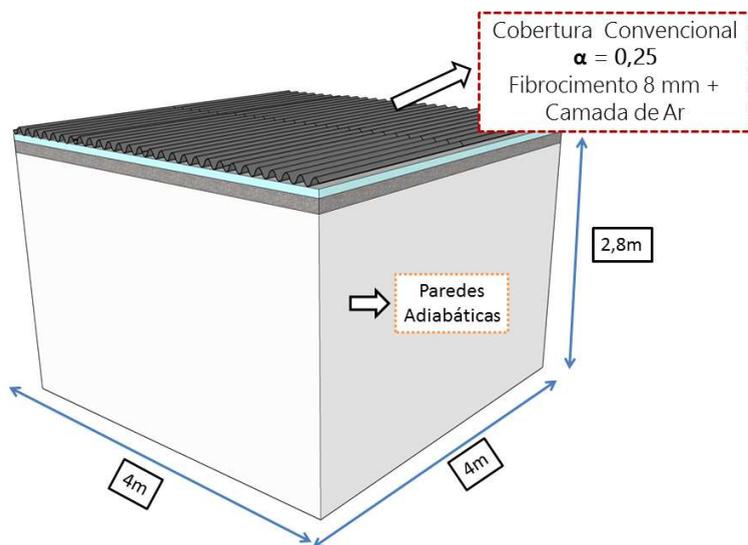


Figura 19 – Representação gráfica em 3D do modelo de cobertura convencional.

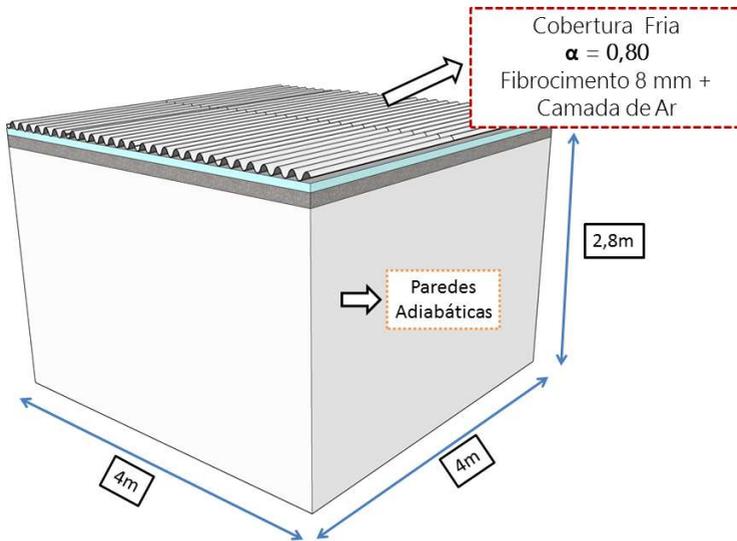


Figura 20 – Representação gráfica em 3D do modelo de cobertura fria

3.5.1. Análise dos resultados

Nesta fase de análise dos resultados, buscou-se alcançar uma melhor compreensão dos efeitos que o clima exerce sobre o desempenho térmico das coberturas verdes e o funcionamento do modelo.

Os resultados das simulações foram obtidos através da solicitação das variáveis de saída desejadas, referentes aos processos de transferência de calor e massa e o desempenho térmico para cada cidade. Os resultados obtidos com a cobertura verde foram analisados, e comparados ao desempenho e funcionamento das coberturas convencional e fria. Temperaturas superficiais externas e internas, cargas térmicas ideais e os fluxos de calor e as respectivas parcelas do balanço térmico foram analisadas. De forma análoga às análises realizadas na primeira etapa de simulações, as análises dos resultados foram baseadas em *outputs* de cargas térmicas para a demanda de aquecimento e resfriamento para cada cidade. Nesta etapa, foi

acrescentada a análise do balanço térmico da superfície da cobertura.

As Figuras 21 e 22 representam as variáveis que compõem o balanço térmico das coberturas verde e convencional / fria, respectivamente. Associa-se as referidas parcelas do balanço térmico no Quadro 15, que apresenta a listagem da denominação destes outputs no programa *EnergyPlus* que foram usados para o cálculo do balanço térmico. Nesta etapa, também foram analisados os resultados de outras variáveis de saída que não estão diretamente explícitas no balanço térmico, como as variáveis de temperatura de superfícies externa e interna das coberturas. As demais variáveis que foram utilizadas em algum momento da pesquisa, como as meteorológicas: temperatura do ar, umidade relativa do ar, temperatura do céu, radiação infravermelha incidente e velocidade do vento foram consideradas triviais para serem obtidas, e por isso, não foram listadas nem exemplificadas graficamente.

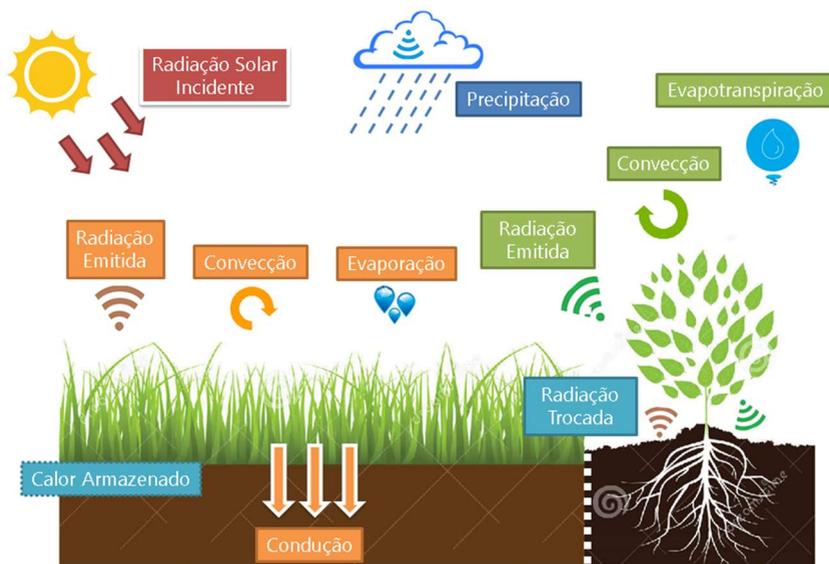


Figura 21 – Esquemática do balanço térmico analisado na cobertura verde.

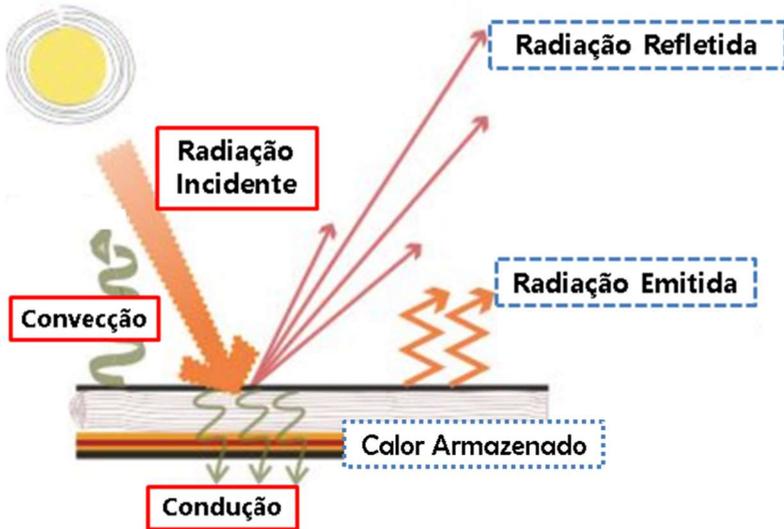


Figura 22 - Esquematização do balanço térmico analisado nas coberturas convencional e fria.

Quadro 15 – Variáveis analisadas e respectivas variáveis de saída (outputs) solicitadas

Balço térmico da Cobertura Verde	Variável Correspondente (EnergyPlus Output)
Radiação Solar Incidente	<i>Surface Outside Face Incident Solar Radiation</i>
Radiação Emitida (Substrato)	* Não Disponível (Cálculo Analítico) – Apêndice I
Radiação Emitida (Vegetação)	* Não Disponível (Cálculo Analítico) – Apêndice I
Radiação Trocada (Substrato / Vegetação)	* Não Disponível (Cálculo Analítico) – Apêndice I
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>
Balço térmico das Coberturas Convencional e Fria	Variável Correspondente (EnergyPlus Output)
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 da Face Interna da Laje	<i>Surface Inside Face Temperature</i>
Cargas Térmicas Ideais a Partir de Cargas Fixas	Variável Correspondente (EnergyPlus Output)
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>

Após a realização das simulações, durante a análise de resultados constatou-se um obstáculo ao fechamento adequado do balanço térmico. A variável de saída que o modelo gera como “troca de calor sensível”, não inclui as trocas sensíveis por radiação. O modelo não apresenta entre suas variáveis de saída disponíveis, uma que corresponda às trocas térmicas por radiação, tanto a realizadas pelo substrato e a vegetação, quanto a uma taxa líquida de trocas com o ambiente externo. Para que fossem obtidas estas variáveis de saída, realizou-se o cálculo analítico das mesmas, utilizando-se de outras variáveis disponibilizadas pelo programa aplicadas nas parcelas das equações do modelo correspondente a estas trocas. Este procedimento está descrito no Apêndice I do trabalho.

Com a finalidade de examinar o comportamento da cobertura em determinadas situações, foram observados separadamente os resultados ao longo de alguns dias específicos para cada cidade. Como referência analisaram-se os dias de maior demanda de cargas térmicas resultante da simulação em que foi utilizada a cobertura convencional. Portanto, para Belém-PA se analisou o dia de maior carga

térmica de resfriamento (24 de outubro). Para a cidade de Curitiba-PR o dia de maior carga térmica de aquecimento (24 de junho). Ressalta-se aqui, que os resultados do o dia de maior demanda carga térmica registrado para a cidade de Brasília, apresentaram comportamentos semelhantes ao de Belém-PA. Assim esta análise em particular foi subtraída da pesquisa. Entretanto, incluiu-se no método a análise dos dois períodos de cinco dias mais quentes do ano (3 a 7 de fevereiro e 09 a 13 de setembro) que ocorreram em diferentes épocas do ano (úmida e seca).

Na terceira etapa, foram realizadas simulações com a finalidade de investigar a influência de uma camada de isolamento sob os modelos de coberturas utilizados. A camada da espessura utilizada foi de 15 cm e o material escolhido foi poliestireno expandido (Quadro 10). Nesta etapa as análises foram realizadas em função do desempenho térmico integrado anual. Também se comparou os resultados do desempenho das coberturas convencional e fria com isolamento com os resultados da cobertura verde sem isolamento.

3.6. Resumo do método

O método apresentado pode ser resumido como a realização de simulações computacionais em três diferentes cidades e análises estatísticas, utilizando-se de diferentes configurações de coberturas verde, uma convencional e uma fria. A ferramenta escolhida foi o programa *Energy Plus*, onde 1125 simulações foram realizadas em uma primeira etapa fundamentalmente analítica. Na segunda etapa nove foram os casos simulados e, nesta etapa, os dados foram analisados de forma mais detalhada. Em uma terceira etapa foram mais nove casos simulados, porém com uma análise única e objetiva. As análises consistiram no processamento, interpretação e apresentação de variáveis de saída oferecidas pelo programa (e calculadas as restantes). Os dados gerados, processados e analisados dentre os resultados serviram de base para o conteúdo e discussões apresentadas no próximo capítulo.

4. RESULTADOS

Os resultados das simulações do método da pesquisa e suas respectivas análises são apresentados neste capítulo. Na primeira seção apresentam-se as análises da primeira etapa, que consistiu dos 1125 casos das simulações paramétricas explorando diferentes configurações de coberturas verdes permitidas pelo modelo. A segunda seção apresenta a análise dos nove casos de simulação que compuseram a segunda etapa, onde os resultados foram alvo de análises a respeito do desempenho térmico e fluxos de calor resultantes das diferentes configurações de cobertura utilizadas nas diferentes cidades. Foram comparados os desempenhos das coberturas verdes com os encontrados utilizando-se as configurações convencional e fria. Estas análises transcorrem até a sétima seção onde são apresentados os resultados da terceira etapa. A última seção do capítulo apresenta uma síntese conclusiva e considerações finais a respeito dos resultados.

4.1. Análise das simulações paramétricas

Nesta etapa, 1125 casos foram simulados e, foram solicitados os resultados de cargas térmicas de resfriamento agrupados, a partir do *JEPPlus*. O Quadro 16, apresenta em maiores detalhes a configuração e resultados dos casos representados no gráfico. Os valores são correspondentes ao conjunto de 225 casos simulados para cada parâmetro (cinco variações), exceto a resistência estomatal e os tipos de substrato (três variações), que somam 375 casos para cada valor de entrada.

Quadro 16 – Resultados e configurações de casos extremos dentre os valores testados na 1ª etapa.

Parâmetro Analisado	Resultado / Configuração		LAI (Índice de Área Foliar)	Espessura do Substrato (cm)	Altura das Plantas (cm)	Resistência Estomatal (s/m)	Carga Térmica (kWh / m ² .ano)	Amplitude dos Resultados
Análise do LAI	Menor valor	0,25						
	Menor resultado	16,34	0,25	50	50	240	16,34	33,19
	Maior resultado	49,53	0,25	5	100	120	49,53	
	Maior valor	5,00						
	Menor resultado	11,00	5	50	5	120	11,00	23,54
	Maior resultado	34,54	5	5	100	240	34,54	
Análise da Espessura	Menor valor	5,00						
	Menor resultado	17,90	1	5	5	120	17,90	31,63
	Maior resultado	49,53	0,25	5	100	120	49,53	
	Maior valor	50,00						
	Menor resultado	11,00	5	50	5	120	11,00	33,41
	Maior resultado	44,41	0,5	50	100	240	44,41	
Análise da Altura	Menor valor	5,00						
	Menor resultado	11,00	5	50	5	120	11,00	36,61
	Maior resultado	47,61	0,25	5	5	120	47,61	
	Maior valor	100,00						
	Menor resultado	13,56	5	50	100	120	13,56	35,97
	Maior resultado	49,53	0,25	5	100	120	49,53	
Análise da Resistência	Menor valor	120,00						
	Menor resultado	11,00	5	50	5	120	11,00	38,53
	Maior resultado	49,53	0,25	5	100	120	49,53	
	Maior valor	240,00						
	Menor resultado	11,28	5	50	5	240	11,28	38,07
	Maior resultado	49,35	0,25	5	100	240	49,35	
Análise por Substrato	Leve							
	Menor resultado	11,00	5	50	5	120	11,00	34,85
	Maior resultado	45,84	0,25	5	100	120	45,84	
	Intermediario							
	Menor resultado	11,21	5	50	5	120	11,21	36,63
	Maior resultado	47,84	0,25	5	100	120	47,84	
	Pesado							
	Menor resultado	11,40	5	50	5	120	11,40	38,13
Maior resultado	49,53	0,25	5	100	120	49,53		

De maneira geral, observando-se a faixas de valores obtidos e os parâmetros alterados, é possível observar que as variações dos parâmetros: índice de área foliar e espessura do solo resultaram em diferenças significativas de desempenho. Isto, quando analisada a diferença entre o uso dos valores

máximos e mínimos testados (amplitude). Os tipos de substrato demonstram uma gradual melhoria de desempenho entre os tipos leve, intermediário e pesado. A partir desta análise, as demais variáveis foram observadas em maiores detalhes.

A média resultante para os 255 casos simulados utilizando-se o menor valor de *Índice de Área Foliar* (0,25) foi de 32,94 kWh/m². Para o maior valor (5) utilizado, a média resultante foi de 22,77 kWh/m², o que comparativamente representa uma redução média de 30% do total de cargas térmicas necessárias (10,17 kWh/m²), um valor significativo. Dentre todos os parâmetros testados este foi o que demonstrou maior variação na amplitude dos resultados. Houve variação de 33,19 para 23,54 kWh/m² na amplitude dos resultados, uma redução de 29%, resultando em 9,65 kWh/m² de diferença de amplitude entre as configurações utilizadas. Isso indica que o aumento do índice de área foliar é um parâmetro que possui forte influência sobre o desempenho das coberturas verde, podendo ser um fator limitante do consumo. Este resultado está de acordo com o comportamento esperado segundo Capazzolli et al. (2013).

Para os resultados obtidos a partir das variações da *Espessura do solo*, a média dos valores resultantes de cargas térmicas totais anuais utilizando-se o menor valor (5 cm) foi de 33,71 kWh/m². Este valor, comparado à média obtida a partir do maior valor utilizado (50cm), que foi 27,70 kWh/m², representa uma redução média de 17% nas cargas térmicas totais necessárias. Este valor é menor que o resultante do aumento do índice de área foliar analisado anteriormente, porém representa um valor considerável. A amplitude entre os resultados foi bem menor neste caso, 1,78 kWh/m². Isto é um indicativo de que a espessura do solo apresenta um potencial grande de impactar positivamente o desempenho térmico das coberturas verdes, porém esta melhora irá depender fortemente das demais configurações utilizadas.

Para as variações utilizadas no parâmetro *Altura da vegetação* (5 – 100 cm), uma pequena variação entre as médias resultantes de cargas térmicas necessárias é percebida (2,25 kWh/m²), representando uma redução de 7%. Neste caso, o melhor desempenho foi registrado com o menor valor testado, no caso a espessura mais fina da camada de vegetação. Os valores utilizados na *Resistência estomatal mínima* das plantas levaram a uma diferença insignificante de 0,05 kWh/m² (0,002%) entre as

médias de cargas térmicas totais a partir das configurações testadas. Estes resultados demonstram que a altura da vegetação é um valor influente em pequena escala dentro das configurações do modelo enquanto a resistência estomatal mostrou-se um fator desprezível dentro da faixa de valores testados (120 - 240 s/m).

Analisando-se os resultados obtidos para os três *Tipos de substrato* utilizados, conclui-se que não houve influência significativa no desempenho térmico. O solo mais pesado apresentou o pior desempenho com uma média de 30,47 kWh/m². O solo de peso intermediário obteve a média de 29,53 kWh/m². O solo mais leve apresentou o melhor desempenho, com uma média de cargas térmicas totais de 28,42 kWh/m², o que representa uma redução de somente 6% (2,05 kWh/m²) comparado ao substrato pesado. A diferença de desempenho poderia ser maior, visto que se optou por utilizar uma diferença de absortância solar entre os substratos (de 0,61 para o solo leve, e 0,81 para o pesado), o que, por si só, seria suficiente para a diferenciação de desempenho entre os substratos. Em termos de influência sobre os demais parâmetros variados nas configurações das simulações paramétricas, pode ser destacado que as mesmas configurações apresentaram o pior e o melhor desempenho para os três substratos utilizados, conforme apresentado no Quadro 16.

Para se compreender de forma mais significativa a influência da variação dos parâmetros de entrada sobre os resultados, foi realizada, para cada parâmetro, uma análise de distribuição de frequência em quartis. Estes resultados são apresentados em “*boxplots*” nas figuras apresentadas nos próximos parágrafos.

O resultado da análise do índice de área foliar está representado na Figura 23. Esta figura apresenta a distribuição dos valores centrais (50%) para os cinco valores utilizados. Pode-se perceber uma tendência a redução da média de cargas térmicas totais necessárias com o aumento do parâmetro. A utilização de um alto Índice de área foliar levou a uma concentração de 50% dos valores resultantes na faixa entre 16-24 kWh/m². O que representa uma melhora considerável no desempenho quando comparado à faixa obtida para os valores de 0,25 e 0,5 (24-35 kWh/m²).

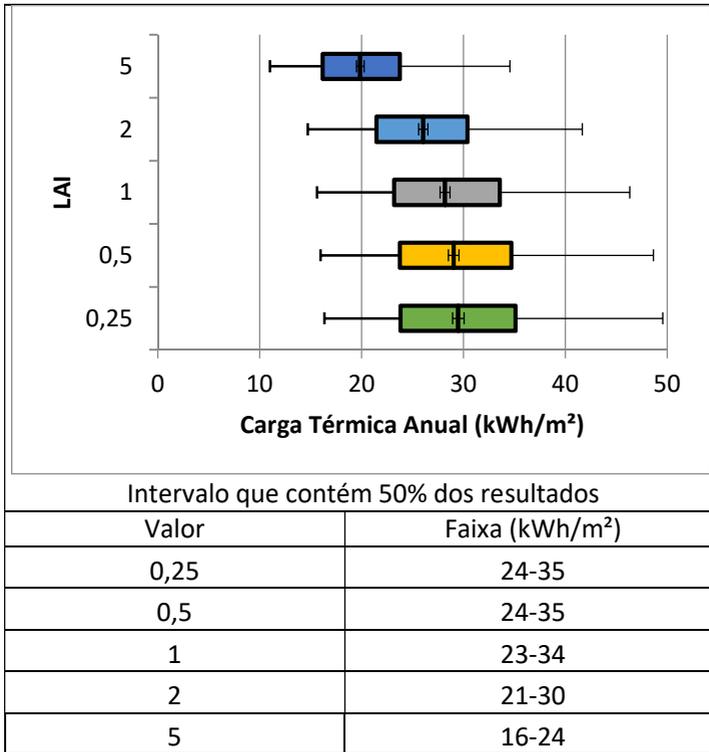


Figura 23 – Análise dos resultados variando o Índice de área foliar, distribuídos em quartis. A tabela abaixo apresenta os intervalos destacados.

A espessura do substrato foi o segundo parâmetro analisado. A Figura 24 apresenta a distribuição dos valores centrais para os cinco valores utilizados. É nitidamente perceptível o deslocamento da média de cargas térmicas totais necessárias com o incremento do parâmetro. Apesar de existirem resultados em uma larga faixa para os valores utilizados de 5 e 50 cm (conforme a análise citada anteriormente), a espessura do substrato prova-se aqui o parâmetro de maior influência segundo os resultados. Percebe-se pela evolução das faixas que concentram 50% dos resultados para cada valor utilizado, conforme apresentado na tabela que acompanha

Figura 24. A utilização de maiores espessuras de substrato levou a reduções expressivas de cargas térmicas de resfriamento, como se pode observar na figura. Utilizando-se 5 cm de solo, obteve-se como faixa dos resultados centrais 37-45 kWh/m². Acompanhou-se uma redução progressiva, não linear, para 15-16 kWh/m², quando utilizados 50 cm. Isso demonstra que quanto maior for a espessura do solo, menores serão as cargas térmicas totais necessárias para o clima e condições testadas. A utilização de uma maior espessura do solo tornou o resultado menos dependente dos demais parâmetros das configurações de cobertura verde utilizadas nos casos simulados.

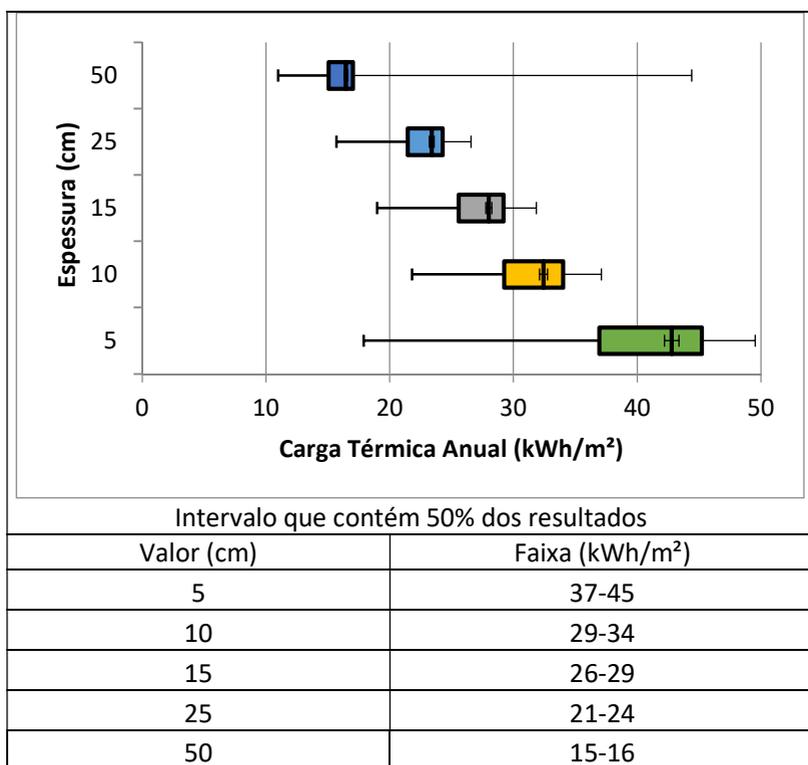


Figura 24 - Análise dos resultados variando a Espessura do substrato, distribuídos em quartis. A tabela mostra os intervalos destacados.

A altura da vegetação, conforme previamente comentado, demonstrou pouca sensibilidade no modelo quanto ao deslocamento da média das cargas térmicas totais necessárias (Figura 25). As faixas em que se concentram os 50% dos valores encontram-se muito próximas. Pode-se notar que somente o aumento da altura da vegetação de 50 cm para 100 cm de vegetação, impactou negativamente o desempenho. Uma possibilidade é pela limitação das trocas térmicas pela camada de ar aprisionada na camada de vegetação, pois a altura da vegetação atua como obstáculo às trocas de calor por convecção. De 5 cm a 20 cm praticamente não há variação dos resultados.

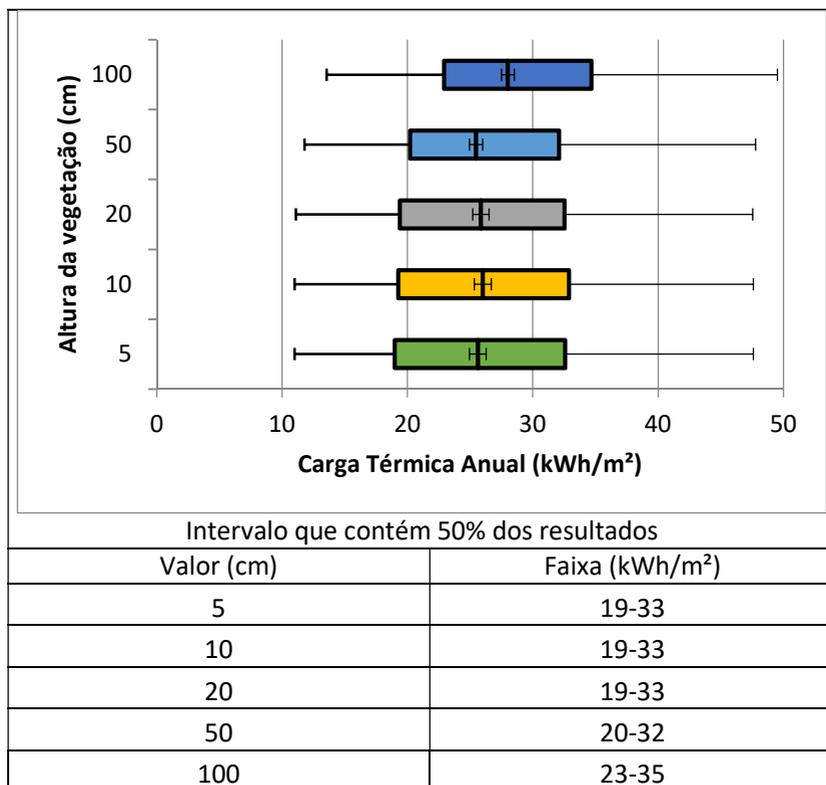


Figura 25 - Análise dos resultados variando a Altura da vegetação, distribuídos em quartis. A tabela apresenta os intervalos destacados.

Ao analisarmos a influência das alterações de resistência estomatal (Figura 26), mesmo que de forma detalhada, as variações experimentadas nas simulações surtiram efeitos praticamente indetectáveis. As faixas de concentração de 50% dos valores foram praticamente idênticas.

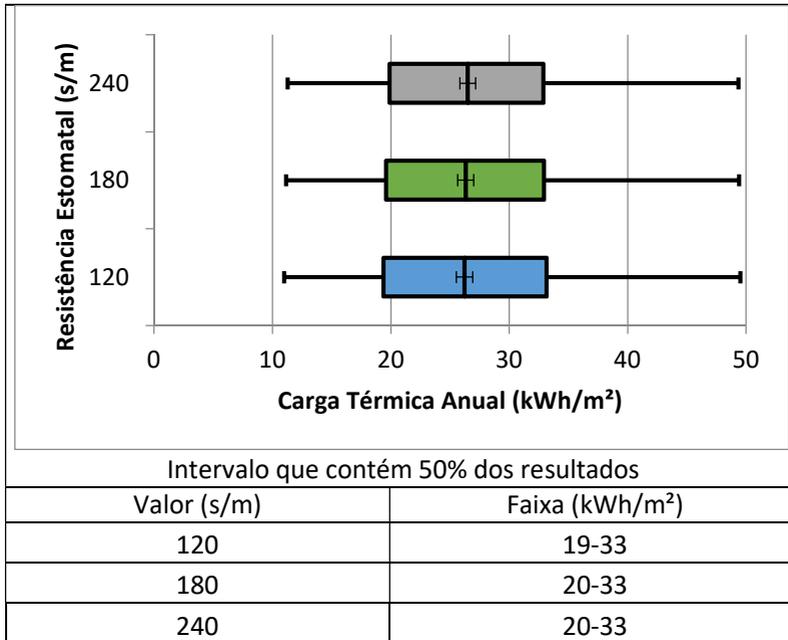


Figura 26 - Análise dos resultados variando a Resistência estomatal, distribuídos em quartis. A tabela apresenta os intervalos destacados.

Por fim, a análise dos resultados obtidos com a variação do tipo de substrato utilizado demonstra pequena variação entre a distribuição dos quartis. O solo mais pesado, apresenta conforme já esperado pela análise prévia, uma faixa de concentração de 50% dos resultados (Figura 27) que abrange valores maiores que os solos intermediário e leve, nesta ordem.

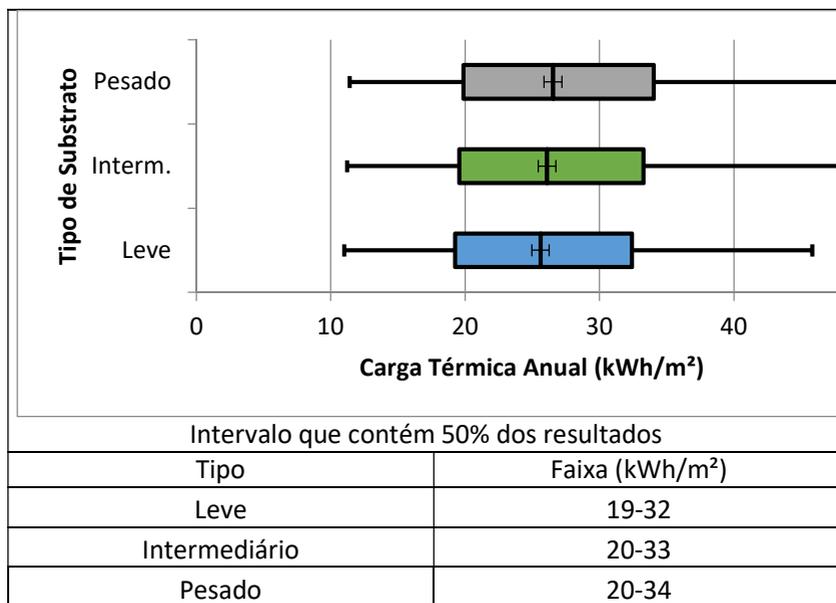


Figura 27 - Análise dos resultados variando o Tipo de substrato, distribuídos em quartis. A tabela apresenta os intervalos destacados.

4.2. Análises da 2ª etapa de simulações em três climas distintos

Primeiramente foi realizada uma análise comparativa da cobertura verde utilizada com a cobertura convencional (representada pela telha de fibrocimento sobre uma câmara de ar) e a cobertura fria ($\alpha = 0,8$), conforme apresentadas no método. Recorda-se que três coberturas testadas, foram construídas sobre a laje mista de 12 cm de espessura, que possui influência na inércia térmica de toda a estrutura analisada.

Para facilitar a análise, primeiramente os resultados foram divididos nos Quadros 17 e 18. Estão representadas as cargas térmicas totais de resfriamento e aquecimento integrados no ano de simulação para cada um dos casos simulados, referentes ao desempenho térmico da cobertura verde (CV) comparado à cobertura de fibrocimento (FC) e a cobertura fria (CF), respectivamente. Os valores obtidos correspondem às cargas

térmicas ideais de resfriamento e aquecimento acumuladas ao fim dos períodos simulados para cada cidade. A soma destes valores resulta na carga térmica total necessária. A economia foi calculada como o percentual de redução das cargas térmicas resultantes da cobertura que foi comparada à cobertura verde. O Quadro 20 apresentado ao fim da seção apresenta os resultados compilados.

Quadro 17 – Desempenho térmico da cobertura verde (CV) comparado à cobertura de fibrocimento (FC).

Desempenho Térmico - Integrado Anual (FC x CV)				
Cidade	Carga Térmica (kWh/m ²)	Resf.	Aquec.	Total
Belém	FC	122,5	0,0	122,5
	CV	20,4	0,0	20,4
	Economia	83%	0%	83%
Curitiba	FC	32,6	55,6	88,2
	CV	0,8	9,1	9,9
	Economia	98%	84%	89%
Brasília	FC	58,8	17,8	76,6
	CV	4,1	0,1	4,2
	Economia	93%	100%	95%

FC - Fibrocimento Convencional; CV - Cobertura Verde

Quadro 18 – Desempenho térmico da cobertura verde (CV) comparado à cobertura fria (CF).

Desempenho Térmico - Integrado Anual (CF x CV)				
Cidade	Carga Térmica (kWh/m ²)	Resf.	Aquec.	Total
Belém	CF	26,0	0,1	26,1
	CV	20,4	0,0	20,4
	Economia	27%	0%	28%
Curitiba	CF	0,79	95,6	96,4
	CV	0,77	9,1	9,9
	Economia	3,5%	90%	90%
Brasília	CF	2,1	42,4	44,4
	CV	4,1	0,1	4,2
	Economia	-49%	100%	91%
CF - Cobertura Fria; CV - Cobertura Verde				

Para as simulações realizadas com clima tropical úmido, na cidade de Belém-PA, foram obtidas reduções de cargas térmicas de resfriamento de 102,1 kWh/m² (83%), quando comparados o desempenho térmico com o uso da cobertura verde (20,4 kWh/m²) e o da cobertura convencional (122,5 kWh/m²), representando uma expressiva redução de 81%. Quando comparado à cobertura fria (20,6 kWh/m²), os desempenhos foram muito semelhantes, com uma pequena vantagem no desempenho da cobertura verde (redução de 5,7 kWh/m²). Isto demonstra que para o caso em questão, o desempenho térmico da cobertura verde se equiparou ao de uma cobertura de baixa absorvância ($\alpha = 0,8$). Esta comparação entre o comportamento térmico destas coberturas neste clima será discutida em maior detalhe posteriormente. O estudo de Gaffin et al. (2006) apresentou experimentalmente resultados semelhantes para o que considerou “absorvância equivalente” das coberturas verdes.

As simulações realizadas em Belém-PA exigiram funcionamento do sistema de condicionamento de ar em 100% (8760 h) das horas simuladas quando utilizada a coberturas verde, conforme relatado no Quadro 19. A cobertura convencional, assim como a fria, apresentou um percentual consideravelmente menor, onde o sistema de cargas térmicas ideais se se encontrou em funcionamento em 80% das horas para a cobertura convencional e somente 66% das horas simuladas. Isto em uma situação prática poderia ser interpretado como um benefício para o funcionamento do sistema, por existirem momentos de interrupção e conseqüente alívio e resfriamento dos aparelhos. Entretanto os valores de pico de demanda de carga térmica de resfriamento, obtidos no desempenho das coberturas (Quadro 19) demonstram que apesar de exigir funcionamento constante, a cobertura verde exigiu pico de demanda ($4,3 \text{ Wh/m}^2$) 74% menor que o exigido pela cobertura fria ($17,1 \text{ Wh/m}^2$) e 92% menor que o exigido pela cobertura convencional ($59,1 \text{ Wh/m}^2$), o que poderia resultar na necessidade de um sistema de condicionamento de ar com potência consideravelmente mais baixa.

Quadro 19 – Horas de operação e picos de demanda do sistema de cargas térmicas ideais para os casos simulados.

Resumo da Operação do Sistema de Cargas Térmicas Ideais							
BELÉM	Horas de Resfriamento	% (Horas simuladas)	Pico de Resfriamento (Wh/m ²)	Horas de Aquecimento	% (Horas simuladas)	Pico de Aquecimento (Wh/m ²)	Total % (Horas simuladas)
Cobertura Convencional	6890	79%	59,1	85	1%	3,3	80%
Cobertura Verde	8760	100%	4,3	0	0%	0,0	100%
Cobertura Fria	4824	55%	17,1	986	11%	5,7	66%
CURITIBA							
Cobertura Convencional	2732	31%	52,4	5209	59%	32,5	91%
Cobertura Verde	931	11%	2,4	5001	57%	4,7	68%
Cobertura Fria	386	4%	10,3	7666	88%	33,2	92%
BRASÍLIA							
Cobertura Convencional	4388	50%	53,9	3363	38%	19,1	88%
Cobertura Verde	4121	47%	3,7	241	3%	1,3	50%
Cobertura Fria	936	11%	10,8	6227	71%	21,4	82%

Para aprofundar a análise a respeito da comparação entre as coberturas verde e fria em Belém-PA, a Figura 28 apresenta um histograma de distribuição por frequência das faixas de operação das cargas térmicas horárias de resfriamento para os três tipos de cobertura. Observa-se que, com a cobertura verde o sistema de resfriamento se faz necessário em somente 34% de suas horas de funcionamento na faixa entre 2,5 – 5 Wh/m², sendo o restante operado na faixa de 1 – 1,25 Wh/m². Utilizando-se a cobertura fria por sua vez, em 53% das horas de funcionamento, a demanda foi superior ao pico de demanda da cobertura verde. O contraponto reside no fato de que para 44% do tempo, dispensa-se a necessidade de resfriamento. Curiosamente para a cobertura convencional, 1% das horas simuladas exigiram pequenas cargas de aquecimento para manter o ambiente estritamente dentro da faixa de temperatura programada, e a cobertura fria em 11% das horas. Destaca-se que a necessidade de aquecimento de ambientes internos nesta região é, na prática, inexistente.

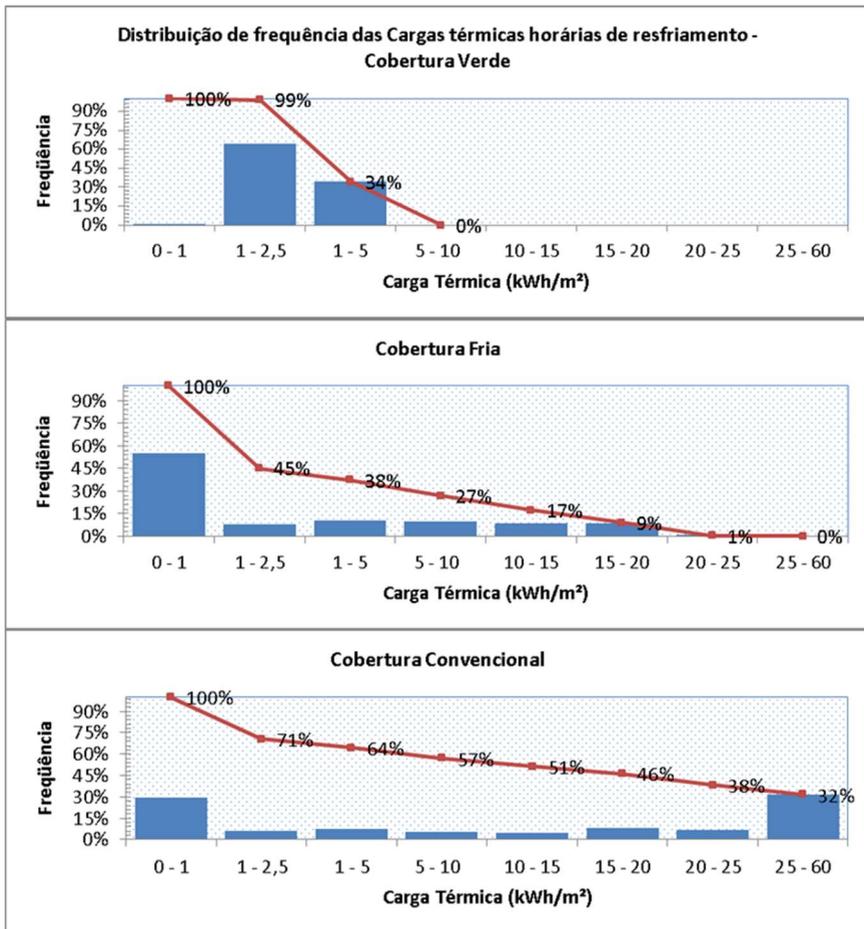


Figura 28 – Histogramas de distribuição de frequências registradas, obtidos para cada cobertura simulada para a cidade de Belém-PA

A partir dos resultados obtidos para o clima subtropical úmido, da cidade de Curitiba-PR, constata-se que a cobertura verde apresenta o melhor desempenho térmico, com cargas térmicas totais acumuladas de 9,9 kWh/m², distribuídas entre 0,8 kWh/m² (8%) utilizadas para resfriamento e 9,1 kWh/m² (92%) para aquecimento (Quadros 17 e 18). Isto representou uma redução de 89% (81,1 kWh/m²) quando comparado ao desempenho da cobertura convencional de fibrocimento (88,2

kWh/m²). A utilização da cobertura verde nesta cidade proporcionou reduções em ambas às cargas térmicas necessárias quando comparadas à cobertura convencional, que alcançou o desempenho de 32,6 kWh/m² para resfriamento (97% de redução) e de 55,6 kWh/m² para aquecimento (83% de redução).

As horas de funcionamento do sistema para aquecimento não apresentaram grande disparidade (Quadro 19), estando o sistema em operação 57% das horas simuladas para a cobertura verde e 59% para a convencional. Encontra-se, porém, uma diferença significativa no pico da demanda de carga térmica de aquecimento. Este foi 86% menor quando utilizada a cobertura verde (redução de 32,5 Wh/m² para 4,7 Wh/m²). Em relação às horas de operação do sistema de resfriamento, nota-se uma redução considerável de 31% para 11% das horas simuladas, e uma grande diferença de 50,0 Wh/m² no pico da demanda de resfriamento, representando uma redução de 95% do potencial de resfriamento necessário. Cabe aqui ressaltar que, em um eventual planejamento de uma situação real, isto poderia representar um possível descarte da necessidade do sistema de aquecimento, trazendo outras possibilidades aos projetos, ao passo que os resultados com a utilização da cobertura convencional não indicam esta possibilidade.

Devido ao fato de ser o clima mais frio entre os estudados, a cobertura fria nesta cidade, apresentou o pior desempenho térmico, exigindo do sistema elevadas cargas térmicas de aquecimento. Ainda que não tenha exibido grandes disparidades em relação ao pico de demanda, 88% das horas simuladas exigiram aquecimento. As cargas térmicas totais necessárias (96,4 kWh/m²) elevaram-se em 9,3 vezes quando comparada à cobertura verde (9,9 kWh/m²), e em 9% em relação ao desempenho da cobertura convencional (88,2 kWh/m²).

Os resultados dos casos simulados na cidade de Brasília-DF demonstram desempenhos bastante distintos entre as coberturas estudadas. O melhor desempenho térmico neste caso também foi o da utilização da cobertura verde, totalizando 4,1 kWh/m² necessários para resfriamento e desprezíveis 0,1 kWh/m² necessários para aquecimento, resultando em 4,2 kWh/m². Este valor representa reduções significativas de 95% e 90%, quando comparados os desempenhos das coberturas convencional (76,6 kWh/m²) e fria (44,4 kWh/m²),

respectivamente. Por se tratar de um clima que apresenta sazonalidade anual entre períodos de temperaturas quentes e frias, é interessante notar que a cobertura verde reduziu drasticamente as cargas necessárias para ambas as demandas, de resfriamento e aquecimento, quando comparada à cobertura convencional (Quadro 17). Entretanto, quando utilizada a cobertura fria (Quadro 18), encontrou-se como resultado a necessidade de elevadas cargas térmicas para aquecimento ($42,4 \text{ kWh/m}^2$). Isto se deu devido às grandes perdas de calor favorecidas, principalmente, pelo chamado resfriamento radiante noturno e as menores taxas de radiação absorvida devido à alta refletância solar do material ($\alpha = 0,8$ [CF]; $\alpha = 0,25$ [CV]). Este fato foi melhor investigado posteriormente no balanço térmico e em períodos menores analisados.

Analisando-se as horas de funcionamento do sistema de cargas térmicas ideais para a cobertura verde (Quadro 19), foram necessárias poucas horas de aquecimento (3%) e comparativamente menos horas de resfriamento do que a cobertura convencional (47% para 50%). Para a cobertura verde, os picos de demanda de cargas térmicas ideais se mantiveram bem baixos quando comparada aos outros tipos de cobertura, com $3,7 \text{ Wh/m}^2$ para resfriamento e $1,3 \text{ Wh/m}^2$ para aquecimento. A cobertura convencional apresentou valores elevados, $53,9 \text{ Wh/m}^2$ e $19,1 \text{ Wh/m}^2$ para resfriamento e aquecimento, respectivamente. Estes incrementos correspondem a 14,5 e 14,6 vezes os valores resultantes da utilização da cobertura verde. Este valor de pico de demanda de resfriamento é comparável ao encontrado para Belém-PA ($59,1 \text{ Wh/m}^2$), que apresentou a maior carga térmica horária necessária dentre todos os casos simulados. A cobertura fria apresentou a necessidade de resfriamento em somente 11% das horas simuladas, porém curiosamente apresentou pico de demanda de resfriamento de $10,8 \text{ Wh/m}^2$ (65% maior que com a utilização da cobertura verde). O pico de demanda para aquecimento foi de $21,4 \text{ Wh/m}^2$, o mais alto entre as três coberturas. O resumo geral dos resultados de desempenho encontram-se compilados no Quadro 20.

Quadro 20 - Resultados compilados para o desempenho térmico das três coberturas simuladas nos três diferentes climas.

Desempenho Térmico - Integrado Anual (FC x CV X CF)					Economia em relação ao (FC)
Cidade	Carga Térmica (kWh/m ²)	Resf.	Aquec.	Total	
Belém	FC	122,5	0,0	122,5	0%
	CV	20,4	0,0	20,4	83%
	CF	26,0	1,0	26,1	79%
Curitiba	FC	32,6	55,6	88,2	0%
	CV	0,8	9,1	9,9	89%
	CF	0,8	95,6	96,4	-9%
Brasília	FC	58,8	17,8	76,6	0%
	CV	4,1	0,1	4,2	95%
	CF	2,1	42,4	44,4	42%

FC - Fibrocimento Convencional; CV - Cobertura Verde; CF - Cobertura Fria

4.3. Análises do balanço térmico nos três climas distintos

Após a análise dos resultados de cargas térmicas ideais integradas no período anual, nesta etapa, foram analisadas os resultados através das variáveis de saída correspondentes aos elementos do balanço térmico e os fluxos que ocorrem na superfície externa e na interface entre a cobertura e o interior da zona, conforme representado nas Figuras 21 e 22. Os resultados apresentados nesta etapa são referentes às investigações dos fluxos de calor através da cobertura, que colaboram na determinação do desempenho térmico da estrutura. Entretanto, também foram contabilizadas as parcelas de cada uma das interações que ocorrem na interface externa.

4.3.1. Análise do balanço térmico de Belém – PA

Estão apresentados no Quadro 21 os resultados da utilização de cada cobertura na cidade de Belém – PA. A Figura 29 apresentada em seguida, é uma representação gráfica em colunas dos mesmos resultados. Os valores se referem ao total integrado no ano de simulação. Este é o padrão de apresentação de resultados que se seguirá, onde as colunas em azul estão representando as perdas de calor da cobertura para o ambiente externo, em vermelho são as resultantes de ganhos de calor para a estrutura da cobertura, e no caso da condução, para o ambiente interno.

Quadro 21 – Resultados encontrados para os componentes que compõem o balanço térmico para a cidade de Belém – PA

Belém /PA - Balanço de Calor Anual - Interface Externa e Fluxo Através da Cobertura								
Parcelas do Balanço de Calor	Interface	Cobertura Verde (GR)			Fibrocimento (FC)		Cobertura Fria (CR)	
		kWh/m2.ano	Total	Total (%)	kWh/m2.ano	Total (%)	kWh/m2.ano	Total (%)
Radiação Solar Absorvida	Externa	1039	-	100%	1039	100%	277	100%
Trocas por Radiação	(Solo)	-155	-337	-15%	-631	-61%	-273	-99%
	(Veg)	-247	-	-24%	-	-	-	-
Reflexões Múltiplas	(S;V)	65	-	6%	-	-	-	-
	(S)	-69	-56	-7%	-286	-28%	21	8%
Trocas Sensíveis	(V)	13	-	1%	-	-	-	-
	(S)	-327	-891	-31%	-	-	-	-
Trocas Latentes	(V)	-564	-	-54%	-	-	-	-
	Condução	Zona	20	-	2%	122	12%	25
Fluxo Resultante	-	-1108	-	-107%	-1039	-100%	-276	-100%
Incorporado ao Balanço*	Externa	69	-	7%	-	-	-	-
CT de Resfriamento	Zona	20		2%	122	12%	26	9%
CT de Aquecimento	Zona	0		0%	0	0%	1	0%

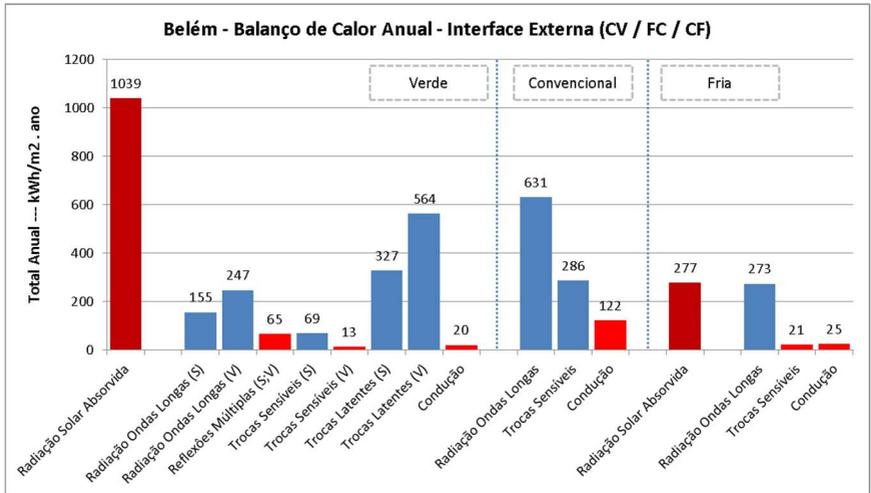


Figura 29 - Resultados encontrados para os componentes que compõem o balanço térmico para a cidade de Belém – PA

Ao se analisarem as trocas térmicas por radiação e assumindo-se o fato de que todas as coberturas possuem a mesma emissividade, observa-se que o total líquido anual de radiação trocada com o céu pela cobertura verde é de 337 kWh/m², representando uma perda de 33% do calor total absorvido por radiação pela superfície (1039 kWh/m²). A magnitude das trocas de calor por radiação realizada pela superfície da vegetação é maior devido a sua maior exposição à radiação solar e também devido à ausência da inércia térmica que a massa de substrato possui. A inércia térmica da laje e o sombreamento proporcionado pela vegetação permitem que o solo se mantenha mais frio, ainda que exista na vegetação o efeito de resfriamento proporcionado pela evapotranspiração metabólica.

Comparativamente a cobertura convencional de fibrocimento apresentou uma perda líquida por radiação de 631 kWh/m².ano, correspondendo a 61% da radiação solar absorvida no período. Esta diferença é explicada pelo fato de que a cobertura convencional atinge temperaturas de superfície externa mais altas que aquelas alcançadas pelas camadas externas da cobertura verde. Esta ocorrência pode ser explicada por diversos fatores, incluindo a maior massa da camada de substrato e a

umidade nela presente, como também os processos físicos de evapotranspiração, que proporcionam perdas através de trocas de calor latente. Estas trocas que envolvem também o transporte de massa, somaram 891 kWh/m².ano, totalizando 85% da quantidade de radiação solar absorvida, sendo 327 kWh/m².ano (31%) referentes à evaporação da água contida no substrato e 564 kWh/m².ano (54%) devido a evapotranspiração realizada pelo metabolismo das plantas.

As trocas de calor por convecção se resumem a perdas ao fim do período, e representam 6% (56 kWh/m².ano) na cobertura verde e 28% (286 kWh/m².ano) na cobertura convencional. As parcelas referentes às trocas de calor por convecção também são maiores na cobertura de fibrocimento. Isto pode ser explicado devido às altas temperaturas superficiais atingidas, aumentando o diferencial em relação à temperatura ambiente, como também a maior exposição às trocas por convecção pela menor rugosidade da superfície. Isto ocorre também pela existência da camada de “aprisionamento de ar” no interior da vegetação da cobertura verde, o que lhe confere um menor coeficiente de convecção.

Conforme descrito na seção 4.2.1, as coberturas verde e fria possuem desempenho térmico semelhante, porém com comportamentos dos balanços térmicos bem distintos. Percebe-se na Figura 29 a semelhança entre os valores do calor transmitido por condução para o ambiente interno. Entretanto pode-se também notar a grande diferença entre as outras duas formas de trocas térmicas: por radiação, com perdas de 273 kWh/m².ano, correspondendo a 99% do calor absorvido por radiação, e por convecção com ganhos de 21 kWh/m².ano (8%). Este fato pode ser explicado pelas situações aquelas onde as temperaturas superficiais externas atingidas no período noturno são consideravelmente mais baixas, favorecidas pelo resfriamento radiante. Entretanto, atribui-se ao mesmo fato os ganhos de calor por convecção devido às altas temperaturas registradas no ambiente externo nesta cidade mesmo no período noturno. Posteriormente neste trabalho, a seção 4.2.4 descreve uma situação semelhante analisada no período de um dia específico.

Observando-se a linha “Fluxo Resultante” do Quadro 21, nota-se que, para as coberturas convencional e fria, o balanço térmico, como esperado, resulta em 100% da radiação solar

absorvida. No caso da cobertura verde, este balanço não é regular (122%) devido à contribuição irregular dos efeitos da evapotranspiração que ocorrem na camada do solo e na vegetação. Esta variável foi calculada através da investigação da parcela restante para o fechamento do balanço. Neste caso, um processo simples devido a se tratar de um processo constante de retirada de calor. Portanto, do total das trocas latentes, 891 kWh/m².ano, os quais equivalem a 85% do percentual de radiação absorvida, 69 kWh/m².ano (correspondendo a 7% da radiação absorvida) são na realidade, incorporados ao balanço térmico pela umidade presente no substrato, através dos processos de evapotranspiração realizados pelo substrato e pela vegetação. Estes processos ocorrem também durante a noite, mesmo na ausência de radiação. Recorda-se que existe o percentual mínimo de saturação do substrato (1%). Assim este processo é dependente somente da umidade presente no solo e da velocidade do vento, no caso do substrato. No caso da vegetação, a resistência estomatal da planta e a temperatura e umidade relativa do ambiente são os fatores que influenciam o diferencial de pressão de vapor do ar do interior da folha para o ambiente externo possibilitando a transpiração (*ver equações do modelo*).

O resultado disto está expresso no fato de que ao longo do ano de simulações choveram 2722 mm (Quadro 22). Destes, 2172 mm foram contabilizados como *runoff* (escoamento superficial). O *runoff* ocorre quando a chuva no momento contribui com uma quantidade de água que extrapola o teor de umidade máxima do substrato (conteúdo volumétrico saturado de umidade — 30% [Quadro 12])

Neste caso, sendo este valor definido em 30%, a capacidade de suporte do solo quando já estiver seco (1% de umidade) em um evento de chuva é de 60mm (0,2 m x 30% = 60mm). Superado este valor, o substrato estará saturado e a quantidade de água que será convertida em *runoff* será o total precipitado subtraído da quantidade correspondente às perdas latentes, dentro do período analisado. Conforme apresentado na revisão, o modelo limita a entrada de água no sistema a 12,5 mm/m².h, portanto, para um clima que apresenta significativos eventos de chuva, haverá uma grande quantidade de *runoff*. De certa forma, isto limita a avaliação do desempenho térmico, visto que, caso o substrato estiver seco, este seria capaz de absorver

até 4,8 vezes o valor horário máximo para um evento horário máximo de chuva ou irrigação.

Portanto, dos 1336 mm registrados como volume de água liberada para o ambiente através da evapotranspiração, a chuva contribuiu com 600 mm e 761 mm foram incorporados ao substrato pela manutenção do teor mínimo de umidade no substrato através do parâmetro selecionado no modelo (conteúdo volumétrico residual de umidade — 1% [Quadro 12])

Quadro 22 – Resultados de precipitação, *runoff* e evapotranspiração em metros, para o ano de simulação em Belém – PA.

[CV] Precipitação Acumulada [m]	[CV] Runoff Acumulado [m]	[CV] Evapotranspiração Acumulada [m]
2,772	2,172	1,336

4.3.2. Análise do balanço térmico de Curitiba – PR

O Quadro 23 apresenta os dados resultantes referentes às investigações das parcelas do balanço térmico integrado no período anual das simulações da cidade de Curitiba - PR. A Figura 30 representa graficamente em colunas os mesmos resultados.

Quadro 23 – Resultados encontrados para os componentes que compõem o balanço térmico para a cidade de Curitiba – PR

Curitiba/PR - Balanço de Calor Anual - Interface Externa e Fluxo Através da Cobertura								
		Cobertura Verde (CV)			Fibrocimento (FC)		Cobertura Fria (CF)	
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	884	-	100%	884	100%	236	100%
Trocas por Radiação	(Solo)	-178	-415	-34%	-615	-70%	-355	-151%
Reflexões Múltiplas	(Veg)	-298	-	-20%				
	(S;V)	61	-	7%				
Trocas Sensíveis	(Solo)	-93	-148	-11%	-286	-32%	41	17%
	(Veg)	-55	-	-6%				
Trocas Latentes	(Solo)	-167	-520	-19%				
	(Veg)	-354	-	-40%				
Condução	Zona	-8	-	-1%	-16	-2%	-78	-33%
Fluxo Resultante*	-	-1091	-	-123%	-881	-100%	-157	-100%
Incorporado ao Balanço (H ₂ O)	Externa	-207	-	-23%				
CT de Resfriamento	Zona	1		0%	20	2%	0	0%
CT de Aquecimento	Zona	9		1%	36	4%	78	33%

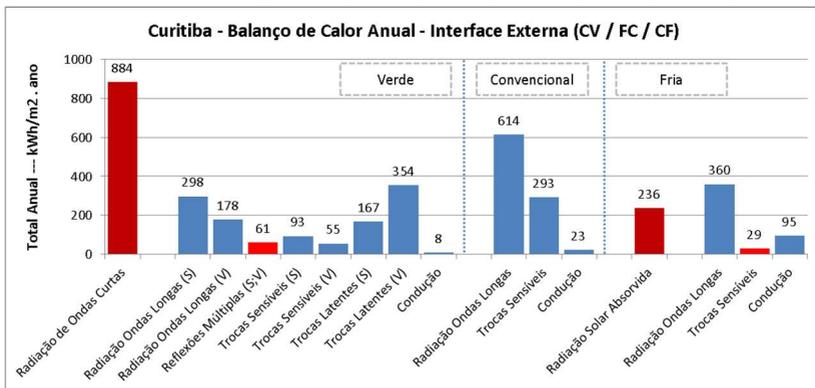


Figura 30 - Resultados encontrados para os componentes que compõem o balanço térmico para a cidade de Curitiba – PR

Observa-se que para o clima de Curitiba, o mais frio entre os três simulados, encontra-se também um valor mais baixo de radiação solar incidente absorvida ao longo do ano, 884 kWh/m². Em respeito às trocas de calor por radiação que ocorreram na cobertura, estas somaram 415 kWh/m².ano quando utilizada a cobertura verde na simulação, o que representa uma perda de calor correspondente a 61% da energia solar incidente. Comparado este valor aos encontrados na simulação com a cobertura convencional de fibrocimento (614 kWh/m².ano, totalizando 70% da radiação incidente) há uma redução de 32% nas perdas de calor (201 kWh/m².ano).

Em relação às trocas sensíveis por convecção, a cobertura verde (148 kWh/m².ano) apresentou redução de 138 kWh/m².ano nas perdas quando comparado à cobertura de fibrocimento (293 kWh/m².ano), conservando assim, no interior da edificação, o equivalente a 16% a mais do calor absorvido da radiação solar.

O equivalente a 59% da radiação absorvida (521 kWh/m².ano) foi perdido através das trocas de calor latente, sendo 354 kWh/m².ano (40%) referentes a parcela da vegetação e 167 kWh/m².ano (19%) ao substrato. Considerando-se que a carga térmica necessária para resfriamento limitou-se à 9 kWh/m².ano, entende-se que ocorre de fato um efeito de isolamento proporcionado pela camada de substrato (devido a sua relativamente baixa condutividade e grande massa térmica), evitando assim, que parte do calor transferido fosse retirado do interior da zona simulada, o que por sua vez aumentaria as cargas térmicas de aquecimento. 207 kWh/m².ano (23% do fluxo total) são incorporados ao balanço térmico pela umidade, através da evapotranspiração (sob o mesmo argumento anteriormente citado nas análises dos resultados da cidade de Belém-PA; ver seção 4.5.1).

Foram registrados 1523 mm de precipitação e 1185 mm de *runoff* (Quadro 24). Sendo assim a chuva contribuiu com 338 mm da quantidade total de água evapotranspirado durante o ano de simulação (777 mm). Portanto, 439 mm foram utilizados para a manutenção do percentual residual mínimo de umidade no substrato.

Quadro 24 – Resultados de precipitação, *runoff* e evapotranspiração em metros, para o ano de simulação em Curitiba – PR

[CV] Precipitação Acumulada [m]	[CV] Runoff Acumulado [m]	[CV] Evapotranspiração Acumulada [m]
1,523	1,185	0,777

A resultante das perdas por condução da cobertura de fibrocimento foi quase o triplo da resultante na cobertura verde (de 23 para 8 kWh/m².ano). Cabe ressaltar que estas perdas correspondem à totalidade da carga de aquecimento utilizada. É interessante outra diferença de desempenho aqui, em respeito à carga térmica de resfriamento, que foi menor que 1 kWh/m².ano na cobertura verde. Somente uma avaliação mais detalhada para cada época do ano poderia descrever melhor o que leva a este comportamento, porém pode-se especular que os processos de evapotranspiração e o isolamento proporcionado pelo substrato, aliados ao período de verão mais ameno nesta cidade, colaborem neste fato.

A utilização da cobertura fria em um clima frio, conforme já explicado anteriormente, não se reflete em uma aplicabilidade real, prática. Porém se atendo a curiosidade da análise dos resultados, cabe ressaltar que a demanda de aquecimento resultante da utilização da cobertura fria (96,4 kWh/m².ano) foi muito próximo ao desempenho da cobertura convencional (88,2 kWh/m².ano) e 9,7 vezes superior à cobertura verde (9,9 kWh/m².ano).

4.3.3. Análise do balanço térmico de Brasília – DF

O Quadro 25 apresenta os dados resultantes referentes às investigações das parcelas do balanço térmico integrados no período de simulações para a cidade de Brasília – DF. A Figura 32 a seguir representa graficamente tais resultados.

Quadro 25 – Resultados encontrados para os componentes que compõem o balanço térmico para a cidade de Brasília – DF.

Brasília /DF - Balanço de Calor Anual - Interface Externa e Fluxo Através da Cobertura								
		Cobertura Verde (GR)			Fibrocimento (FC)		Cobertura Fria (CR)	
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%	293	100%
Trocas por Radiação	(Solo)	-194	-436	-18%	-677	-62%	-367	-125%
	(Veg)	-316	-	-29%	-	-	-	-
Reflexões Múltiplas	(S;V)	74	-	7%	-	-	-	-
Trocas Sensíveis	(S)	-93	-170	-8%	-382	-35%	34	11%
	(V)	-77	-	-7%	-	-	-	-
Trocas Latentes	(S)	-251	-741	-23%	-	-	-	-
	(V)	-490	-	-45%	-	-	-	-
Condução	Zona	4	-	0%	41	4%	-40	-14%
Fluxo Resultante	-	-1343	-	-122%	-1100	100%	-293	100%
Incorporado ao Balanço*	Externa	244	-	22%	-	-	-	-
CT de Resfriamento	Zona	4		0%	59	5%	2	1%
CT de Aquecimento	Zona	0		0%	18	2%	42	14%

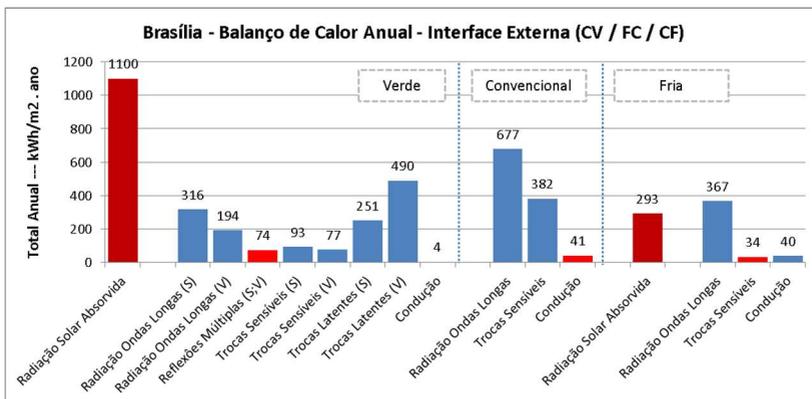


Figura 31 - Resultados encontrados para os componentes que compõem o balanço térmico para a cidade de Brasília – DF

Brasília possui o maior índice de radiação solar incidente absorvida dentre as três cidades examinadas (1100 kWh/m².ano, 0,05% maior que Belém – PA e 19% maior que Curitiba – PR). Com a utilização da cobertura verde, 40% da radiação incidente são perdidos através de trocas por radiação de ondas longas, totalizando 436 kWh/m².ano. Novamente esclarece-se que este processo é regido pelas temperaturas superficiais externas. Na cobertura de fibrocimento estas trocas foram mais altas, totalizando 677 kWh/m².ano de perdas, correspondendo a 61% da radiação absorvida.

Ao longo do período simulado, a cobertura fria obteve perdas de 367 kWh/m².ano por radiação, o que é 25% superior a radiação incidente absorvida pela cobertura, o que resultou na retirada de calor por condução (40 kWh/m².ano) através da laje. Este fato explica a necessidade de cargas térmicas de aquecimento para o ambiente interno. Este é um resultado indesejado, em particular comparando-se este resultado a “não necessidade” de cargas térmicas de aquecimento proporcionada pela utilização da cobertura verde.

Em relação às trocas convectivas, estas foram novamente menores na cobertura verde quando comparadas à cobertura convencional. Acredita-se que este comportamento ocorreu pelos mesmos motivos apresentados para a análise de Belém – PA. Os valores obtidos foram de 170 kWh/m².ano e 382 kWh/m².ano para as coberturas verde e convencional, respectivamente. Estes valores corresponderam a 15% e 34% do total absorvido por radiação solar.

O total das trocas latentes na cobertura verde foi de 741 kWh/m².ano, o equivalente a 68% da radiação absorvida. Para o fechamento do balanço térmico, que excede em 22% a radiação absorvida pelo sistema, observa-se que 244 kWh/m².ano foram na realidade incorporados ao balanço térmico através dos processos de evapotranspiração realizados pelo solo e pela vegetação. Entende-se que, Brasília apresenta um clima consideravelmente mais seco que o de Belém. Este fato torna maior a capacidade de transferência de umidade do estômato da planta para o ar do ambiente externo, facilitando a retirada de calor do sistema pela evapotranspiração. A baixa umidade relativa do ar também aumenta as taxas de evaporação da umidade contida no substrato. Ainda que, em termos de magnitude, as trocas latentes apresentadas em Belém (879

kWh/m².ano) sejam maiores, proporcionalmente à radiação solar incidente, há maior retirada de calor devido a este processo em Brasília (o calor incorporado ao balanço térmico pela umidade presente nas trocas latentes).

Foram registrados no período 1093 mm de precipitação (Quadro 26). Destes, 747 mm resultaram em *runoff*. Portanto, as chuvas contribuíram com somente 346 mm do total de 1107 mm de água evapotranspirados. Sendo os 761 mm restantes, atribuídos a manutenção do percentual mínimo de umidade do substrato (1%).

Quadro 26 – Resultados de precipitação, *runoff* e evapotranspiração em metros, para o ano de simulação em Brasília – DF

[GR] Precipitation Depth [m]	[GR] Precipitation Runoff Depth [m]	[GR] Evapotranspiration Depth [m]
1,093	0,747	1,107

A Figura 32 apresenta a esquematização resumida das parcelas do balanço térmico com seus respectivos valores associados para os três climas. Para a comparação da precipitação, lê-se “EVT” na coluna que corresponde ao total evapotranspirado.

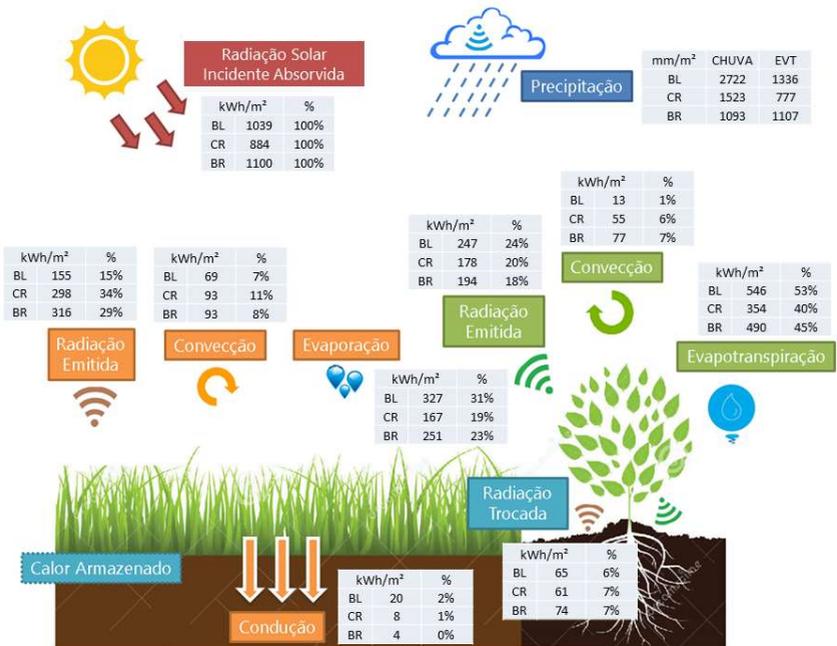


Figura 32 – Resumo do balanço térmico anual com seus respectivos valores sobre as representações gráficas, para os três climas.

4.4. Análises do balanço térmico em dias específicos

As análises até agora realizadas serviram de subsídio para um melhor entendimento do comportamento térmico das coberturas de maneira geral, através de variáveis integradas no ano. A presente etapa de análises teve como finalidade observar o comportamento dos fluxos de calor em períodos de dias específicos selecionados.

Da simulação realizada em Belém – PA optou-se por avaliar o dia de maior demanda de cargas térmicas registrado utilizando-se a cobertura de fibrocimento (24 de outubro). Esta escolha teve a finalidade de investigar os processos de transferência de calor que levaram a melhora do desempenho térmico de resfriamento registrado utilizando-se as outras duas coberturas.

Em Curitiba – PR a escolha do dia 24 de junho baseou-se no critério de que este foi o dia de maior carga térmica necessária para aquecimento com a utilização da cobertura de fibrocimento. Assim pode-se avaliar como ocorreu o processo de manutenção do calor dentro da sala de testes, que resultou na melhora do desempenho térmico quando utilizada a cobertura verde.

Para a cidade de Brasília foi realizada uma análise de dois períodos de cinco dias, ao longo de duas semanas com temperaturas similares, porém em épocas diferentes. Esta escolha permitiu que se avaliasse o efeito parcial da umidade presente no substrato e a umidade relativa do ar, em períodos de altas temperaturas.

4.4.1. Dia de maior carga térmica de resfriamento; Belém – PA

O dia 24/10 foi o dia que registrou as maiores cargas térmicas necessárias para resfriamento entre todos os dias da simulação para a cidade de Belém – PA. O Quadro 27 apresenta os dados climatológicos registrados no dia, e o Quadro 28 o resumo dos dados horários de temperaturas de superfície registrados neste dia da simulação.

Quadro 27 – Dados meteorológicos do dia em questão e resultados de desempenho térmico em Belém – PA

Cidade	Belém	
Data	24/10	
Temperatura do Ar Máx [°C]	33,3	
Temperatura do Ar Média [°C]	28,6	
Temperatura do Ar Mín [°C]	25,0	
Umidade Relativa Máx [%]	91,5	
Umidade Relativa Média [%]	74,2	
Umidade Relativa Mín [%]	51,5	
Velocidade do Vento Máx (m/s)	1,4	
Velocidade do Vento Média (m/s)	0,7	
Velocidade do Vento Min (m/s)	0,1	
Precipitação [m]	0,0	
Radiação Solar Incidente [W/m ²]	5273	
Carga Térmica Ideal [Wh/m²] Cobertura Convencional	503,15	%
Carga Térmica Ideal [Wh/m²] Cobertura Verde	88,29	18%
Carga Térmica Ideal [Wh/m²] Cobertura Fria	144,64	29%

Quadro 28 – Registros de máximas, médias e mínimas das temperaturas de superfícies, fluxos e calor acumulado (24/10, Belém – PA)

Variável Analisada	Máximo	Média	Mínima
Temperatura do Ar Externo [°C]	33,26	28,64	25,05
[CV] Temperatura da Vegetação [°C]	41,24	30,13	24,15
[CV] Temperatura do Substrato [°C]	50,99	34,29	26,70
[CF] Temperatura Superficial Externa [°C]	37,56	27,75	21,54
[CV] Temperatura Superficial Interna [°C]	25,19	25,15	25,11
[CF] Temperatura Superficial Interna [°C]	26,82	25,32	23,89
[CV] Carga Térmica de Resfriamento [Wh/m ²]	3,83	3,68	3,52
[CF] Carga Térmica de Resfriamento [Wh/m ²]	10,87	4,72	0,00
[CV] Calor Armazenado [W/m ²]	78,53	2,71	-37,91
[CF] Calor Armazenado [W/m ²]	97,96	1,38	-47,66

A Figura 33 representa a evolução ao longo do dia da temperatura do ar externo e das temperaturas superficiais externas. É interessante notar que as temperaturas máximas atingidas pelo substrato são consideravelmente menores que as atingidas na cobertura de fibrocimento (50,9°C para 70,8°C), em todo período de radiação incidente, em especialmente nos momentos de pico. A vegetação, apesar de mais exposta à radiação solar do que o substrato, apresentou menores temperaturas máximas (41,2°C). Entende-se que este efeito se dá pelo resfriamento proporcionado pela evapotranspiração. No período noturno, o substrato manteve-se mais quente devido a sua grande massa e a inércia térmica da laje, “liberando” o calor acumulado para o substrato. As temperaturas da cobertura fria

estiveram abaixo da temperatura externa no período noturno, facilitando as perdas de calor durante o período, e se mantiveram abaixo da temperatura atingida pela vegetação nos momentos de incidência de radiação solar, minimizando os processos de transferência de calor. As diferenças entre as médias das temperaturas superficiais máximas atingidas pela cobertura convencional foram de 1,4°C com relação à cobertura verde, e de 8,2°C para à cobertura fria.

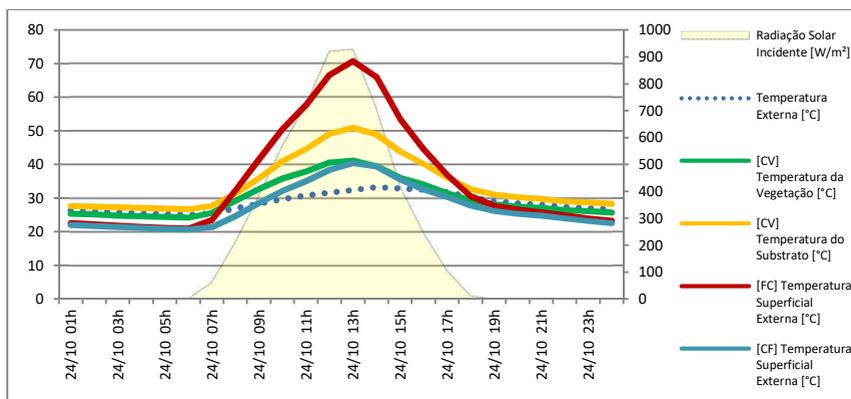


Figura 33 – Perfis de temperaturas superficiais externas apresentados para o dia 24/10, Belém – PA

A temperatura da face interna da cobertura verde (Figura 34) apresentou perfil constante o dia todo em torno da média de 25,1°C. Para a cobertura fria, o perfil oscilou na faixa de 22,4°C a 28,1°C, com média muito próxima à da cobertura verde (diferença de 0,21°C). As temperaturas da superfície interna da cobertura convencional se elevaram à mais de 35°C. Esta alta temperatura da face interna da cobertura, favorece a transferência de calor por convecção e radiação para o interior da zona, o que por sua vez gera maior demanda de cargas térmicas de resfriamento.

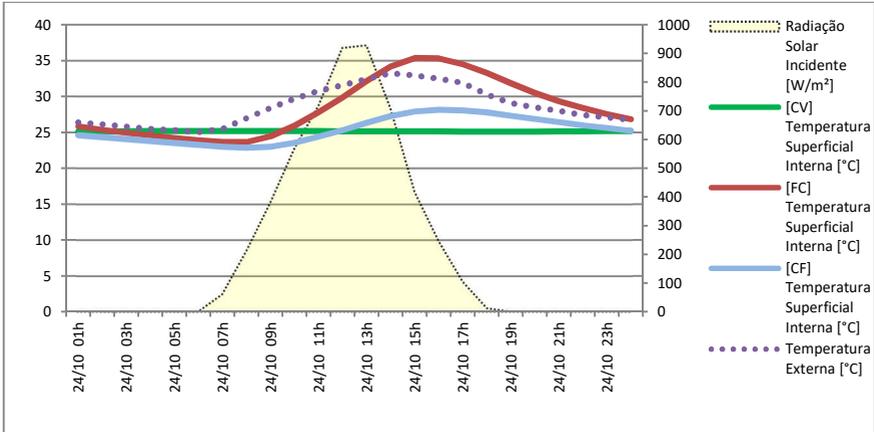


Figura 34 - Perfis de temperaturas da superfície interna da cobertura apresentados para o dia 24/10, Belém – PA

A representação gráfica dos perfis do fluxo por condução através da cobertura (Figura 35) mostra que durante todo o dia o fluxo se manteve constante na cobertura verde. A média horária registrada foi de $3,7 \text{ W/m}^2$. A cobertura fria novamente oscila entre valores menores e maiores (antes e depois do momento de picos da radiação) da cobertura verde, porém mantendo uma média superior ao fim do dia ($6,0 \text{ W/m}^2$). A cobertura convencional apresentou um perfil de ganhos de calor significativos, que inclusive continuam elevados, tanto no início da madrugada como ao final do dia analisado, indicando que o período noturno não proporcionou a retirada de calor do ambiente. O fluxo se igualou e, inclusive foi um pouco menor, que o da cobertura verde durante curtíssimo período do dia (7h – 11h), para então se elevar ao longo de toda a tarde e alcançar $58,0 \text{ W/m}^2$ às 18h.

Cabe aqui ressaltar que esta situação analisada é diferente de situações onde existem ganhos de calor no interior das zonas e edificações, o que poderia se dar através de janelas ou ganhos internos de operação de equipamentos eletrônicos ou a presença de pessoas. Nestas situações a cobertura verde, poderia proporcionar a retirada de calor do interior da edificação, através da inversão do fluxo que se dá nos momentos de radiação incidente, pelos efeitos da evapotranspiração (PARIZOTTO e

LAMBERTS, 2010). No caso desta pesquisa, como se trata de uma zona adiabática (com a exceção da cobertura) artificialmente condicionada, o “melhor” desempenho seria aquele que “isolasse por completo” a zona, ou seja, anulando completamente o ganho de calor através da cobertura.

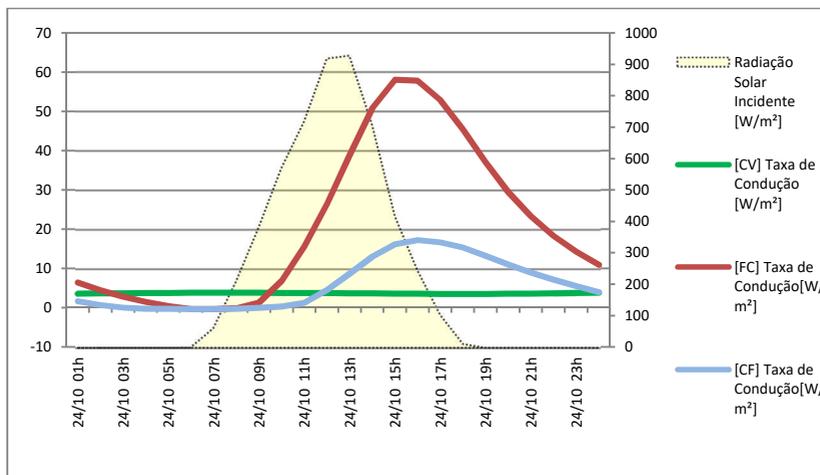


Figura 35 – Perfil do comportamento dos fluxos de calor por condução através da cobertura, para o dia 24/10, Belém – PA

É possível concluir a partir da Figura 36, que as coberturas verde e fria quando comparadas apresentaram comportamentos semelhantes quanto ao acúmulo de energia ao longo do dia. Apesar disto já se discutiu como se comportaram de forma diferente na retransmissão posterior desse calor acumulado. A cobertura convencional, como já demonstrado nas altas temperaturas atingidas, acumulou uma enorme quantidade de calor (até as 12h). Isto é devido à massa térmica da laje de concreto que acumula o calor transmitido através da câmara de ar e se aquece. O atraso térmico resultante, por sua vez, resultou no grande fluxo de calor transmitido posteriormente por condução para superfície interna, que por sua vez transmite o calor para o interior da zona (Figura 35).

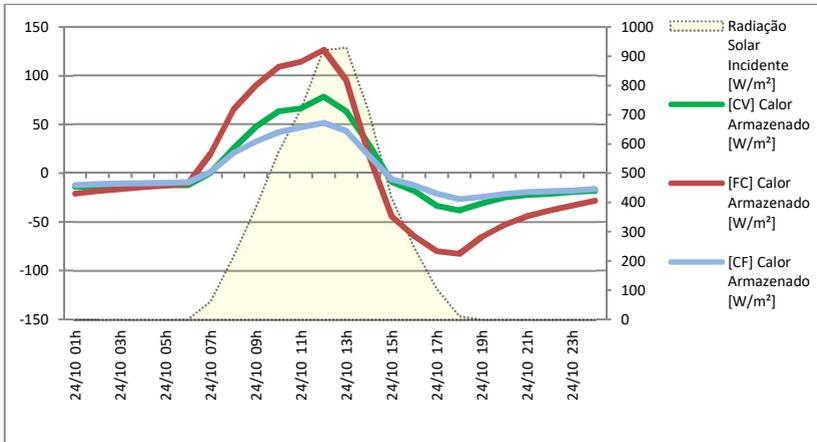


Figura 36 - Perfil do comportamento das taxas de acúmulo de calor na cobertura, para o dia 24/10, Belém – PA

O balanço térmico contabilizado para as três coberturas ao longo do dia em questão está representado na Figura 37. Os valores de cada parcela são correspondentes aos 24 valores horários integrados. As colunas vermelhas representam ganhos de calor e as azuis, perdas. Observa-se que a cobertura de fibrocimento apresenta elevadas perdas por radiação (2188 W/m^2) e convecção (1246 W/m^2), porém, ainda resta quantidade significativa de energia transmitida para o interior por condução (503 W/m^2). Comparando-se o desempenho entre a cobertura verde e a cobertura fria, percebe-se que a cobertura verde “compensa” a maior quantidade de calor absorvida (2900 W/m^2 a mais) através de elevadas quantidades de calor retiradas do sistema através da evapotranspiração. Estas transferências de calor se dão por parte do substrato (765 W/m^2), e em ainda maior parte, da vegetação (2088 W/m^2). As perdas por convecção também são elevadas na cobertura verde (750 W/m^2), porém quase nulas na cobertura fria (13 W/m^2). O perfil de variação da temperatura superficial externa e a superfície lisa favorecem perdas por convecção a noite que acabam por anular os ganhos obtidos durante o dia. As perdas por radiação são consideravelmente diferentes entre a cobertura fria e a verde (501 W/m^2 maiores na fria). Isto novamente reflete o perfil de temperaturas externas, já apresentado na Figura 33, e nos permite concluir que a evapotranspiração é o processo que

favorece o desempenho da cobertura verde perante o da cobertura fria.

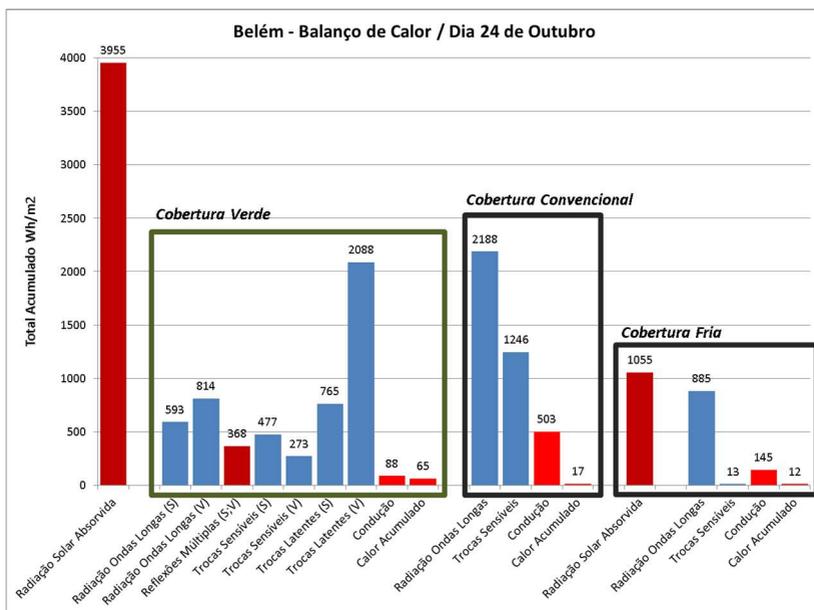


Figura 37 – Balanço térmico para os registros acumulados durante o período analisado, para o dia 24/10, Belém – PA

4.4.2. Dia de maior carga térmica de aquecimento; Curitiba – PR

O dia 24/06 foi o dia que registrou a maior carga térmica necessária para aquecimento entre todos os dias da simulação para a cidade de Curitiba – PR. O Quadro 29 apresenta os dados climatológicos registrados no dia, e o Quadro 30 o resumo dos dados de temperaturas de superfície, fluxos e cargas térmicas analisadas.

Quadro 29 – Dados meteorológicos do dia em questão e resultados de desempenho térmico em Curitiba – PR

Cidade	Curitiba	
Data	24/06	
Temperatura do Ar Máx [°C]	12,3	
Temperatura do Ar Média [°C]	10,5	
Temperatura do Ar Mín [°C]	9,2	
Umidade Relativa Máx [%]	97,0	
Umidade Relativa Média [%]	89,8	
Umidade Relativa Mín [%]	81,5	
Velocidade do Vento Máx (m/s)	1,5	
Velocidade do Vento Média (m/s)	0,8	
Velocidade do Vento Min (m/s)	0,2	
Precipitação [m]	0,0	
Radiação Solar Incidente [W/m2]	918	
Carga Térmica Ideal [Wh/m²] Cobertura Convencional	508,20	%
Carga Térmica Ideal [Wh/m²] Cobertura Verde	66,48	13%
Carga Térmica Ideal [Wh/m²] Cobertura Fria	597,79	118%

Quadro 30 – Registros de máximas, médias e mínimas das temperaturas de superfícies, fluxos e calor acumulado (24/06, Curitiba – PR)

Superfície Analisada	Máximo	Média	Mínima
Temperatura do Ar Externo [°C]	12,30	10,47	9,15
[CV] Temperatura da Vegetação [°C]	13,50	9,76	7,57
[CV] Temperatura do Substrato [°C]	15,37	11,57	9,40
[FC] Temperatura Superficial Externa [°C]	17,83	10,62	7,17
[CF] Temperatura Superficial Externa [°C]	11,81	8,80	7,01
[CV] Temperatura Superficial Interna [°C]	20,92	20,88	20,83
[FC] Temperatura Superficial Interna [°C]	19,33	17,81	16,79
[CF] Temperatura Superficial Interna [°C]	17,82	17,20	16,71
[CV] Carga Térmica de Aquecimento [Wh/m ²]	4,39	4,16	3,97
[FC] Carga Térmica de Aquecimento [Wh/m ²]	27,44	21,18	12,17
[CF] Carga Térmica de Aquecimento [Wh/m ²]	27,97	24,91	21,04
[CV] Calor Armazenado [W/m ²]	16,13	-0,79	-9,98
[FC] Calor Armazenado [W/m ²]	32,94	-0,17	-21,40
[CF] Calor Armazenado [W/m ²]	12,43	-0,02	-8,03

Analisando-se a Figura 38 que apresenta os perfis de temperaturas apresentados ao longo do dia podem-se observar alguns aspectos. Observa-se que durante o período noturno, tanto antes quanto após o cessar da incidência de radiação solar, as temperaturas do substrato se aproximaram das temperaturas externas do ar. Inclusive a temperatura externa mínima registrada foi 0,35°C inferior a mínima do substrato. As temperaturas do substrato também se mantiveram maiores do que as temperaturas da vegetação durante todo o período. Observa-se que durante o período noturno as temperaturas da vegetação encontram-se cerca de 2°C abaixo da temperatura externa, e, durante o período de radiação incidente ela se encontra acima da mesma. Constata-se neste comportamento o efeito de manutenção do calor dentro da zona (isolante) proporcionado pela camada de substrato devido a sua massa térmica, pois o mesmo efeito não ocorre com a cobertura convencional, ainda que sobrepostos à mesma laje.

No gráfico da Figura 38 também se percebem evidências do porque as coberturas convencional e fria apresentarem os piores desempenhos térmicos neste clima. As temperaturas superficiais externas encontram-se abaixo da temperatura

externa durante todo o período de ausência de radiação solar, favorecendo assim a retirada de calor do ambiente condicionado. As análises da cobertura fria foram subtraídas do restante das análises desta seção, pois não há sentido lógico na aplicação da cobertura fria para climas com maior demanda de aquecimento.

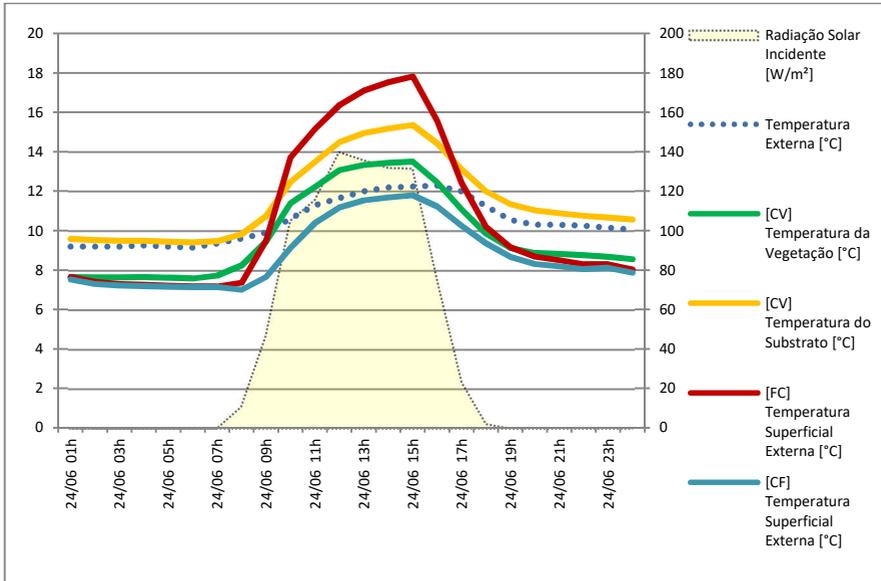


Figura 38 - Perfis de temperaturas da superfície externa apresentados para o dia 24/06, Curitiba – PR

Observando-se os perfis de temperaturas da superfície interna das coberturas (Figura 39), percebe-se o comportamento que reforça a constatação feita anteriormente. As temperaturas registradas pela cobertura verde são praticamente constantes (média de 20,8°C) e, superiores, as registradas pela cobertura convencional durante todo o dia (média de 17,8°C). Ambas se encontram bem acima das temperaturas externas ao longo do dia, porém em nenhum momento chegam a se igualar ao *setpoint* definido para a temperatura mínima do ar interior (22°C), logo, ambas as coberturas necessitaram de aquecimento durante todo o período.

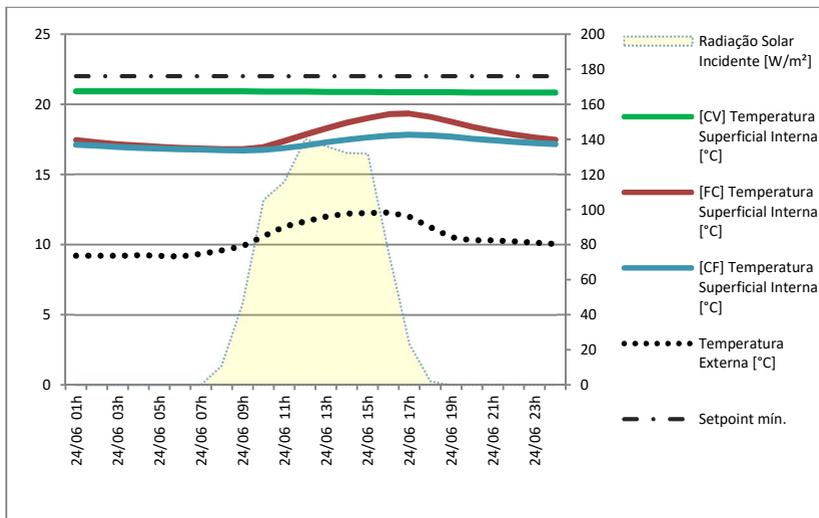


Figura 39 - Perfis de temperaturas da superfície interna da cobertura apresentados para o dia 24/06, Curitiba – PR

A Figura 41 apresenta a representação gráfica dos perfis registrados de fluxo por condução através da cobertura. Nota-se que, assim como na situação de demanda de resfriamento anteriormente analisada (Belém – PA) o fluxo se manteve constante na cobertura verde durante todo o dia. As transferências de calor por condução através da cobertura verde resultaram numa média de $4,2 \text{ W/m}^2$ de perda. A cobertura de convencional de fibrocimento apresentou um perfil variado oscilando entre perdas ($21,2 \text{ W/m}^2$ em média) que se mantiveram acima do dobro das perdas registradas na cobertura verde durante todo o dia analisado. Estas perdas se intensificaram até o já referido horário de 11h, quando as temperaturas das superfícies externas já se encontram mais quentes em função da radiação solar absorvida, atenuando o fluxo de retirada de calor do ambiente interno.

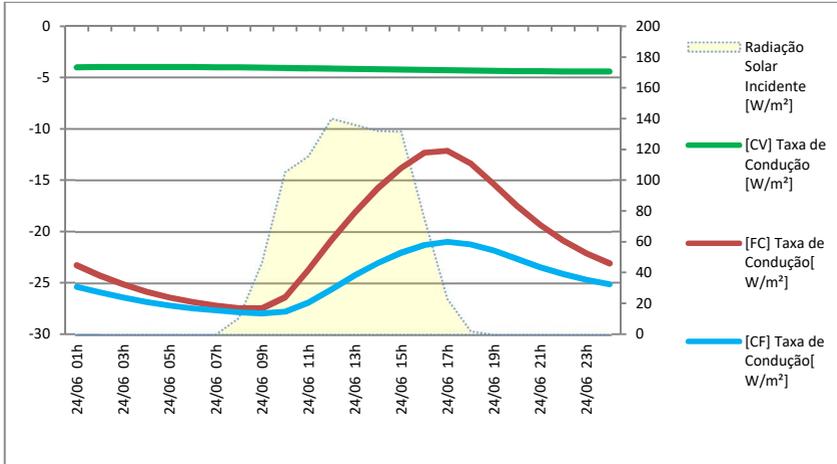


Figura 40 - Perfil do comportamento dos fluxos de calor por condução através da cobertura, para o dia 24/06, Curitiba – PR

Pode-se perceber na representação gráfica das taxas de acúmulo de calor registrado para as diferentes coberturas (Figura 41) que a amplitude alcançada pelo comportamento da cobertura de fibrocimento é maior. Nesta cobertura, apesar de acumular maiores quantidades de calor durante a exposição à radiação solar, a liberação do calor a partir da laje, não se dá para o interior da zona, e sim de volta para o ambiente externo. Por fim, isto acaba por favorecer as perdas de calor do ambiente interno. Quando comparado este comportamento ao da cobertura verde, por possuir maior massa e também devido aos processos de evapotranspiração, esta acumula menos calor.

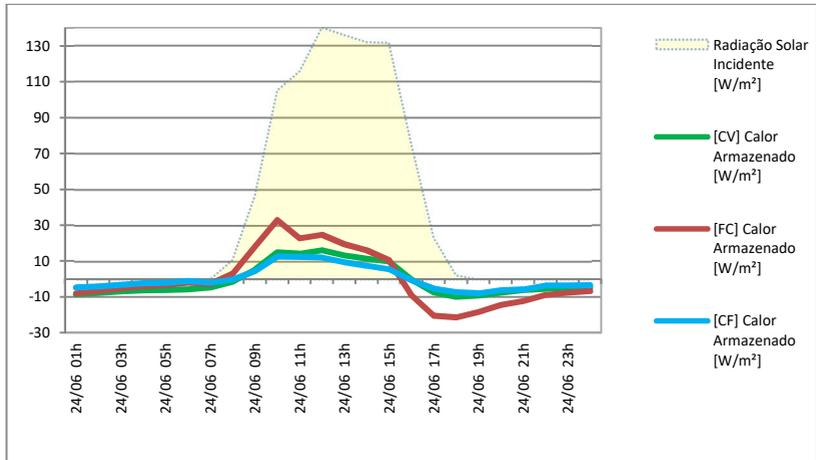


Figura 41 - Perfil do comportamento das taxas de acúmulo de calor na cobertura, para o dia 24/06, Curitiba – PR

O balanço térmico registrado para as três coberturas ao longo do dia em questão está representado graficamente na Figura 42. Pode-se observar que há uma menor magnitude das trocas térmicas realizadas na cobertura verde. A cobertura convencional apresentou resultantes de perdas por radiação (1134 W/m^2) próximos, porém maiores, que a cobertura verde (1020 W/m^2). Esta proximidade explica-se na diferença entre as médias de temperaturas superficiais externas atingidas, de somente $0,4^\circ\text{C}$ (quando consideradas as médias entre a temperatura do substrato e a vegetação, que juntas representam a mesma área da cobertura convencional). A vegetação apresenta maiores perdas por radiação pelo fato de apresentar média de temperaturas mais baixas que o substrato (diferença de $1,8^\circ\text{C}$).

A cobertura verde apresentou balanço positivo de trocas de calor por convecção (74 W/m^2). Isto ocorreu devido ao fato já apresentado de que as temperaturas superficiais da vegetação (Figura 38) encontram-se a maior parte do tempo bem abaixo da temperatura externa favorecendo os ganhos de calor por convecção nesta interface (257 W/m^2). A situação do substrato é diferente, pois este se encontra mais quente durante a maior parte do tempo, o que favorece as perdas por convecção (183 W/m^2). Na cobertura convencional estas perdas resultaram em

25 W/m². As transferências de calor latente totalizaram 311 W/m². Somando-se este fato ao fator isolamento proporcionado pela camada de substrato, o resultado foi de uma menor retirada de calor do ambiente interno por condução (100 W/m²) quando comparada à retirada de calor que ocorreu na cobertura convencional (509 W/m²).

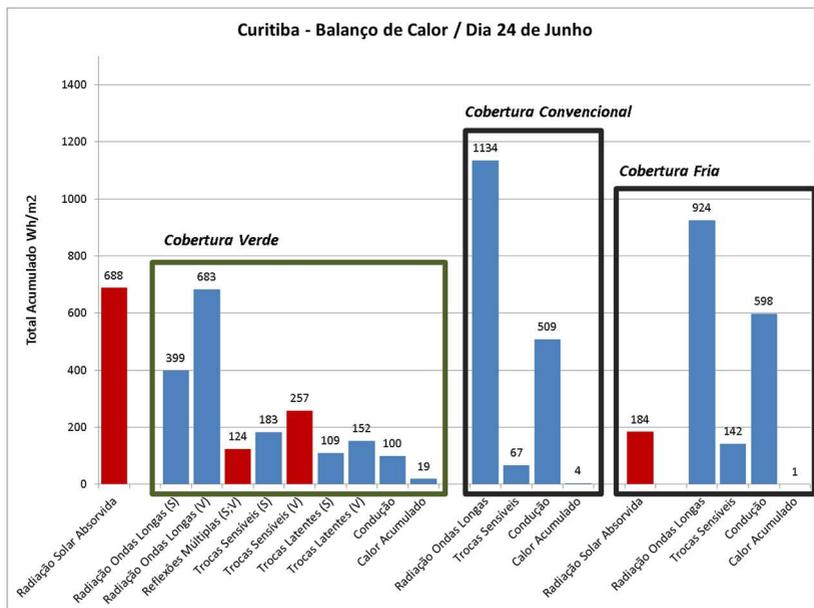


Figura 42 - Balanço térmico para os registros acumulados durante o período analisado, para o dia 24/06, Curitiba – PR

4.4.3. Períodos analisados para Brasília – DF

Uma análise similar também foi realizada para o dia de maior carga térmica de resfriamento para Brasília (06/02). Os resultados encontrados para o comportamento das temperaturas superficiais e dos fluxos de calor no dia de maior consumo foram muito similares a aqueles do dia de maiores cargas térmicas de resfriamento analisado em Belém-PA. Para evitar a redundância no trabalho, esta análise esta análise foi suprimida.

Durante o levantamento dos dias de maiores cargas de aquecimento para esta cidade, constatou-se fato interessante: os dois períodos de cinco dias mais quentes do ano (um em fevereiro, outro em setembro), apresentavam médias de temperatura próximas, porém com índices de umidade relativa do ar, precipitação e radiação solar incidente, diferenciados. Com a finalidade de se observar o comportamento das coberturas sob estas diferentes condições, apesar da semelhança entre as temperaturas externas registradas, foi realizada uma análise comparativa entre estes dois períodos na cidade de Brasília.

O Quadro 31 a seguir apresenta quais são os dois períodos selecionados e suas características climatológicas registradas. Sequencialmente, o Quadro 32 contém os resultados de desempenho térmico decorrentes do período analisado para as três coberturas. Observa-se que as cargas térmicas necessárias se limitaram ao resfriamento para a cobertura verde, diferentemente das coberturas convencional e fria que resultaram também em demanda de aquecimento para os dois períodos analisados.

Quadro 31 – Dados meteorológicos representados nos dois períodos de simulação selecionados para análise em Brasília – DF

Cidade	Brasília	Brasília
Data	03 - 07 / Fev	09 - 13 / Set
Temperatura do Ar Máx [°C]	30,6	32,5
Temperatura do Ar Média [°C]	24,3	25,1
Temperatura do Ar Mín [°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 Média (m/s)	1,2	0,9
Velocidade do Vento Min (m/s)	0,2	0,0
Precipitação [m]	0,004	0,000
Radiação Solar Incidente [W/m2]	29706	21316

Quadro 32 – Desempenho térmico das três coberturas e comparações percentuais de redução (convencional) e acréscimo (fria) para os dois períodos analisados

Período Analisado	Carga Térmica (Wh/m ²)				
	Cobertura Verde (Resfriamento)	Cobertura Convencional (Resfriamento)	Cobertura Convencional (Aquecimento)	Cobertura Convencional (Total)	Economia Verde x Convencional
03 - 07 / Fev	175	1939	33	1972	91%
09 - 13 / Set	357	1343	62	1406	75%
Período Analisado	Cobertura Verde (Resfriamento)	Cobertura Fria (Resfriamento)	Cobertura Fria (Aquecimento)	Cobertura Fria (Total)	Economia Verde x Fria
03 - 07 / Fev	175	264	171	435	60%
09 - 13 / Set	357	138	215	353	-1%

Observa-se que o período analisado no mês de fevereiro, apresentou como resultado valores menores e por consequência menor amplitude, das temperaturas máxima e mínima, e também uma média resultante menor que a do período analisado no mês de setembro (24,3°C para 25,1°C). O período do mês de fevereiro apresentou índices de radiação incidente significativamente mais altos (2800 W/m².dia a mais) e índice médio de umidade relativa do ar 19% maior (59% – 40%). Registrou-se 4mm de precipitação no período de fevereiro. Estes resultados estão de acordo com os esperados por se tratarem de um período que se encontra em uma época úmida de verão (fevereiro), com chuvas melhor distribuídas, e um período numa das épocas mais secas do ano, quando, portanto, não houve precipitação. Destaca-se aqui que esta quantidade de chuva que precipitou durante o período foi toda durante a última noite (07/02) e pouco influenciou os processos de transferência de calor. O fato interessante é que, durante os dois dias que antecedem o período de fevereiro (01 e 02/02), foram registrados 180 mm de precipitação (com 110 mm de *runoff*). Com isto, reforça-se o diferencial de comparação entre uma situação onde a cobertura verde esteve exposta a altos teores de umidade no

substrato e na atmosfera, com uma situação de uma época de baixa umidade relativa do ar e sem chuvas.

Em respeito às cargas térmicas totais registradas durante os dois períodos analisados nota-se que a cobertura convencional apresentou demanda elevada de cargas térmicas nos dois períodos. O desempenho térmico foi melhor no período mais seco (1406 kWh/m²), o que representou 71% das cargas térmicas totais registradas durante o período mais úmido (1972 kWh/m²). Este comportamento foi bem diferente e particularmente inverso do apresentado pela cobertura verde. No período mais úmido, o desempenho da cobertura verde foi consideravelmente menor (175 kWh/m²). As cargas térmicas totais registradas pela cobertura verde neste período foram somente 49% daquelas necessárias no período mais seco (357 kWh/m²).

Comparando-se as duas coberturas (verde e convencional), no período úmido (fevereiro) obteve-se com a utilização da cobertura verde uma expressiva redução de 91% (1797 kWh/m²) das cargas térmicas totais quando utilizada a cobertura convencional. Entretanto, esta redução foi de 1049 kWh/m² durante o período mais seco (setembro), representando uma redução 25% menor (66% de redução) com a utilização da cobertura verde. Atribuiu-se a este resultado a influência dos fatores: umidade contida no substrato e umidade relativa do ar, sobre o desempenho térmico das coberturas verdes. Entretanto, não se pode afirmar este fato em sua totalidade, pois, decorre que, os índices de radiação solar por serem menores no período seco, também resultariam em menores trocas térmicas nos processos de evapotranspiração.

Para a cobertura fria, o desempenho térmico (435 kWh/m²) foi cerca de 60% pior que o da cobertura verde no período de verão, e, no período seco, foram registrados valores muito próximos (357 e 353 kWh/m²). Tais resultados foram alcançados, porém, devido ao comportamento muito diferenciado da cobertura verde nos dois períodos. Em ambos os períodos, a utilização da cobertura fria resultou não só na necessidade de períodos de resfriamento como também em demandas de cargas térmicas de aquecimento (45 kWh/m² em fevereiro, 67 kWh/m² em setembro). Este resultado é interessante, pois em uma suposta situação real, a utilização de uma ou outro tipo de cobertura poderia definir o sistema de condicionamento de ar

necessário. A cobertura verde, sob estas condições controladas, permitiria a utilização de um sistema que operasse exclusivamente com resfriamento.

O Quadro 33 apresenta os resultados das variáveis que foram analisadas para os dois períodos. Observando-se novamente a comparação entre os desempenhos térmicos das coberturas verde e fria, nota-se que a cobertura fria exigiu demandas energéticas máximas mais elevadas que a cobertura verde, tanto para resfriamento ($10,78 \text{ Wh/m}^2$ no período do verão) quanto para aquecimento ($12,0 \text{ Wh/m}^2$ no período de inverno). Apesar disto as médias são consideravelmente mais baixas com diferenças de $0,74 \text{ Wh/m}^2$ e $1,18 \text{ Wh/m}^2$ em relação à cobertura verde para os períodos – úmido e seco – analisados, respectivamente.

Quadro 33 – Registros de máximas, médias e mínimas das temperaturas de superfícies, cargas térmicas e calor acumulado para os períodos analisados (Brasília – DF).

Variável Analisada	03 - 07 / Fev			09 - 13 / Set		
	Máximo	Média	Mínima	Máximo	Média	Mínima
Temperatura do Ar Externo [°C]	30,65	24,28	18,55	32,45	25,07	17,15
[CV] Temperatura da Vegetação [°C]	39,02	25,18	17,06	56,03	29,46	15,30
[CV] Temperatura do Substrato [°C]	50,68	29,29	18,66	55,31	30,64	17,23
[FC] Temperatura Superficial Externa [°C]	66,40	32,37	15,43	62,61	29,38	13,16
[CF] Temperatura Superficial Externa [°C]	36,72	23,70	15,04	35,45	22,56	12,73
[CV] Temperatura Superficial Interna [°C]	24,89	24,53	24,15	25,15	24,96	24,79
[FC] Temperatura Superficial Interna [°C]	34,74	26,95	20,91	32,81	25,87	20,05
[CF] Temperatura Superficial Interna [°C]	26,85	23,33	20,15	26,36	22,84	19,33
[CV] Carga Térmica de Resfriamento [Wh/m ²]	2,70	1,46	0,30	3,67	2,97	2,33
[FC] Carga Térmica de Resfriamento [Wh/m ²]	53,86	16,16	0,00	42,34	11,19	0,00
[CV] Carga Térmica de Aquecimento [Wh/m ²]	3,88	0,27	0,00	8,06	0,52	0,00
[CF] Carga Térmica de Resfriamento [Wh/m ²]	10,78	2,20	0,00	8,55	1,15	0,00
[CF] Carga Térmica de Aquecimento [Wh/m ²]	7,61	1,43	0,00	12,00	1,79	0,00
[CV] Calor Armazenado [W/m ²]	95,55	2,74	-73,30	113,32	-0,59	-49,78
[FC] Calor Armazenado [W/m ²]	141,80	0,28	-94,26	133,46	-0,29	-71,69
[CF] Calor Armazenado [W/m ²]	52,69	0,38	-37,40	53,15	-0,21	-25,77

A análise dos perfis de temperatura para os dois períodos (Figuras 45 e 46) evidencia a influência da umidade sobre a diferença no desempenho. Para o período mais úmido o comportamento é semelhante ao do dia analisado em Belém-PA (Figura 33). As temperaturas atingidas pela cobertura de

fibrocimento atingem picos elevados e são, em média, $3,1^{\circ}\text{C}$ menores que a do substrato e $7,2^{\circ}\text{C}$ menores que as atingidas pela vegetação (Figura 43). Neste período a temperatura da vegetação encontra-se bem abaixo da temperatura do substrato, durante o período do dia, onde há radiação solar incidente, e, praticamente igual durante o restante do tempo. Este comportamento é decorrente dos efeitos de resfriamento evaporativo que ocorrem através da transpiração realizada pela vegetação em condições de alta radiação solar incidente e umidade disponível no substrato. Isto resultou em uma diferença entre as médias das temperaturas do solo e vegetação de $4,1^{\circ}\text{C}$.

Durante o período seco, a diferença entre as médias das temperaturas superficiais do substrato e da vegetação foi somente de $1,2^{\circ}\text{C}$. Na Figura 44 pode-se observar que com a baixa umidade presente no substrato, as temperaturas atingidas pelo solo e pela vegetação estão sempre muito próximas daquelas atingidas pela superfície da cobertura convencional. Neste caso o melhor desempenho da cobertura verde justifica-se somente pela atuação do sistema “inerte” da cobertura verde, onde há o fator sombreamento, exercido pela vegetação, e o fator isolamento, proporcionado, pela camada de substrato. A cobertura fria por sua vez, apresenta temperaturas superficiais que, durante a maior parte do tempo, estão mais baixas que a temperatura ambiente. Estas somente ultrapassam a temperatura ambiente em curtos períodos, todos os dias, no período úmido. Este fato também ocorreu, porém de forma quase desprezível, no período mais seco.

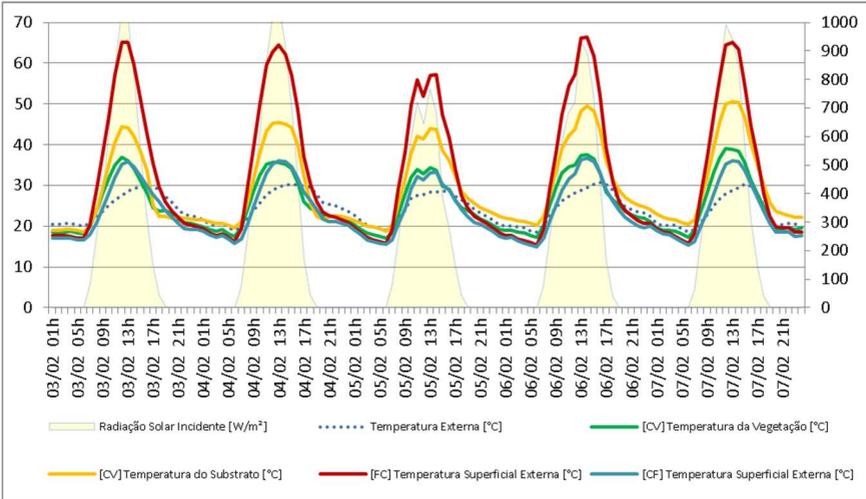


Figura 43 - Perfis de temperaturas da superfície externa apresentados para o período de 03–07 de fev. para Brasília – DF

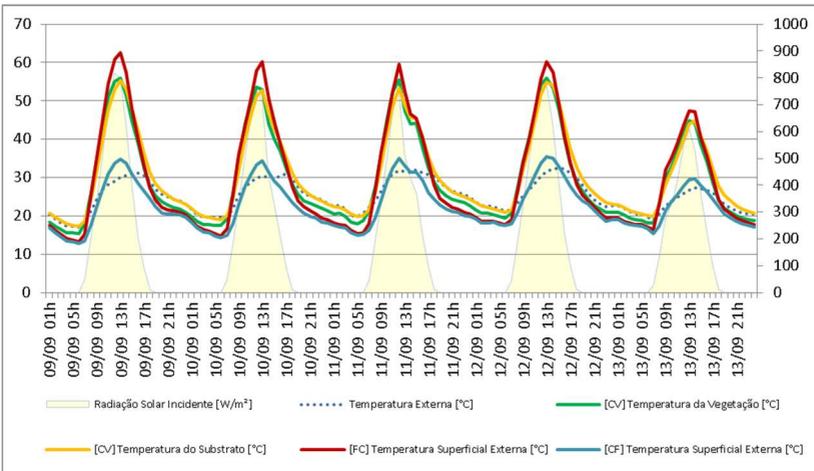


Figura 44 - Perfis de temperaturas da superfície externa apresentados para o período de 09–13 de set. para Brasília – DF

As Figuras 47 e 48 apresentam os perfis de temperatura da superfície interna da cobertura para os dois períodos analisados. Observa-se a constância dos resultados em ambos os períodos para a cobertura verde (24,5 e 25°C). Há uma quase imperceptível elevação no período úmido, enquanto no período

seco os valores foram visualmente estáveis (oscilaram $0,36^{\circ}\text{C}$). A cobertura convencional apresenta um comportamento de variação ao longo do dia, mas que se repete em períodos diários. As temperaturas neste caso chegaram a $34,7^{\circ}\text{C}$ no período úmido, inclusive, superando diariamente a temperatura externa. No período seco este fato ocorreu somente no último dia. A cobertura fria por sua vez oscila com menor amplitude e atinge temperaturas abaixo e acima dos *setpoints* de condicionamento da zona.

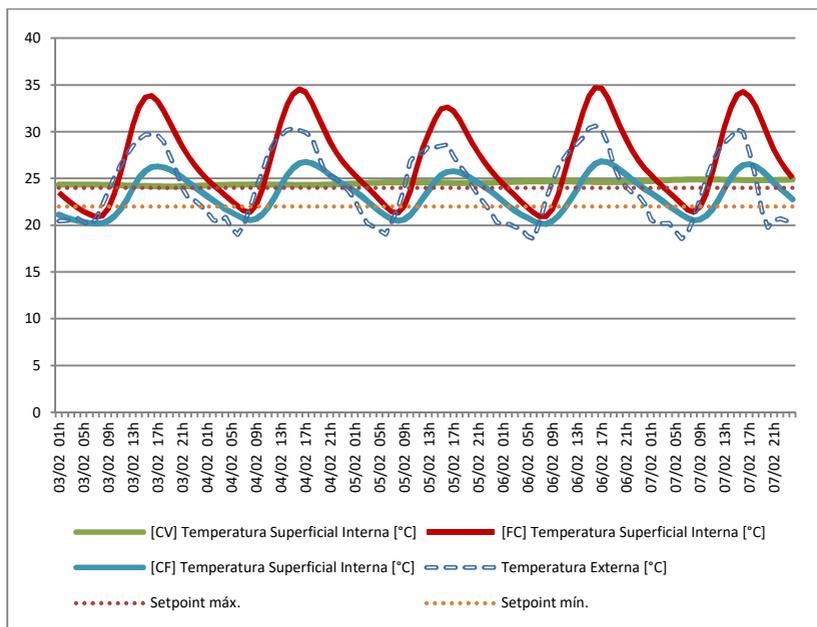


Figura 45 - Perfis de temperaturas da superfície interna da cobertura apresentados para o período de 03–07 de fev. para Brasília – DF

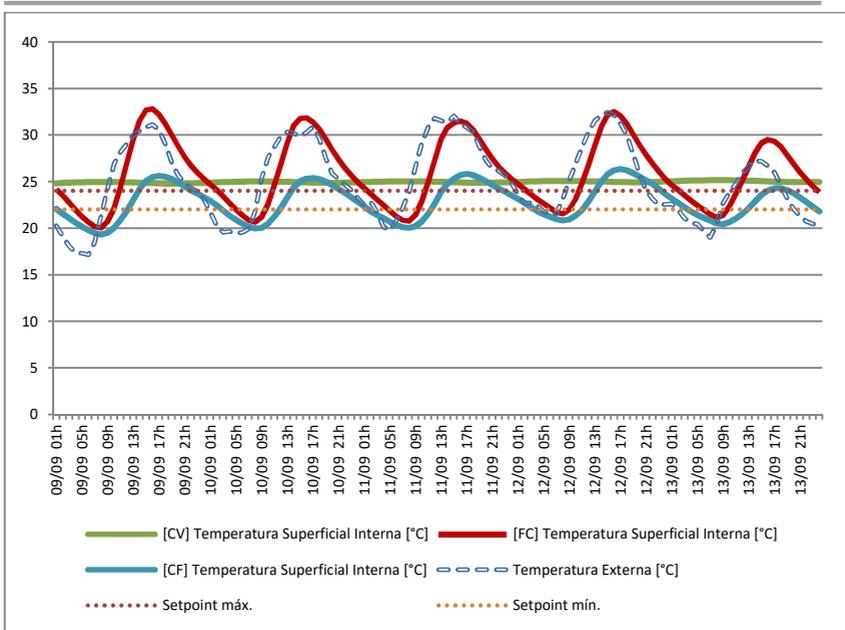


Figura 46 - Perfis de temperaturas da superfície interna da cobertura apresentados para o período de 09–13 de set. para Brasília – DF

A partir do entendimento do comportamento das temperaturas de superfície externas e internas fica mais fácil entender a dinâmica dos fluxos de calor por condução através da cobertura para os períodos analisados, apresentados nas Figuras 48 e 49.

Observa-se que o fluxo de calor através da cobertura verde, é sempre positivo em ambos os períodos. Entretanto assim como ocorreu no comportamento das temperaturas superficiais internas, aqui se pode notar uma elevação muito pequena e constate do fluxo durante o período úmido (de $0,3 \text{ W/m}^2$ para $2,7 \text{ W/m}^2$), e uma regularidade bem definida no período seco, onde para uma média de $3,0 \text{ W/m}^2$ registrada, a oscilação máxima foi de somente de $1,3 \text{ W/m}^2$. Este comportamento resultou em uma demanda ininterrupta de resfriamento para a zona durante ambos os períodos. Entretanto, devido aos efeitos da evapotranspiração que atenuam os fluxos

de calor para o interior da zona, o desempenho foi comparativamente melhor no período úmido.

A cobertura convencional, conforme já evidenciado pelas altas temperaturas da superfície interna, também apresentou elevados fluxos de calor conduzidos para a superfície interna da zona, que chegaram a $53,9 \text{ Wh/m}^2$ no período de verão. Assim, apesar de curtos momentos de interrupção da demanda de resfriamento, os valores das médias horárias de fluxo resultante também foram elevados: $16,2 \text{ Wh/m}^2$ e $11,2 \text{ Wh/m}^2$ para os períodos úmido e seco respectivamente. Consta-se novamente que não houve grande diferenciação de comportamento entre as situações.

Observando-se o comportamento da cobertura fria, devido ao fato de atingir temperaturas mais baixas no período noturno (favorecendo a perda de calor), diariamente foram registradas perdas de calor nessa parte do dia. O resultado foi a demanda de cargas térmicas de aquecimento, que só ocorreram com a utilização das coberturas convencional e fria. Observa-se que em nenhum momento houve retirada de calor do ambiente interno com a utilização da cobertura verde.

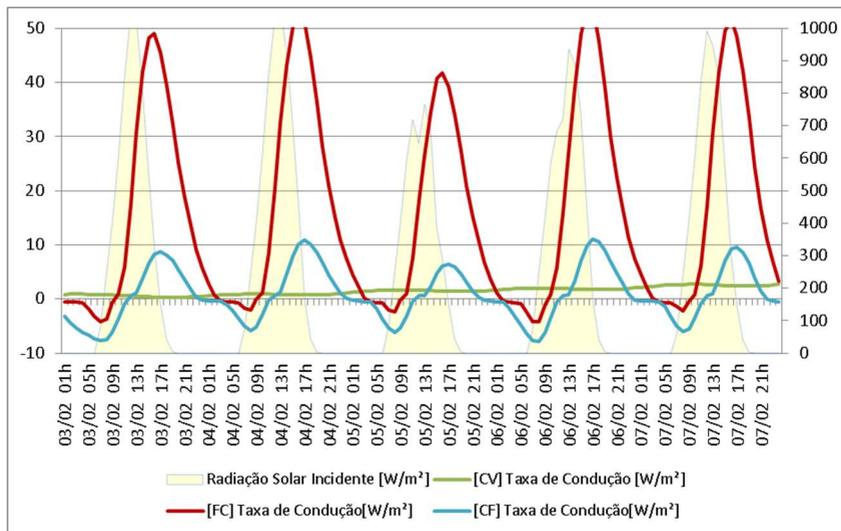


Figura 47 - Comportamento dos fluxos de calor por condução através da cobertura para o período de 03–07 de fev. para Brasília – DF

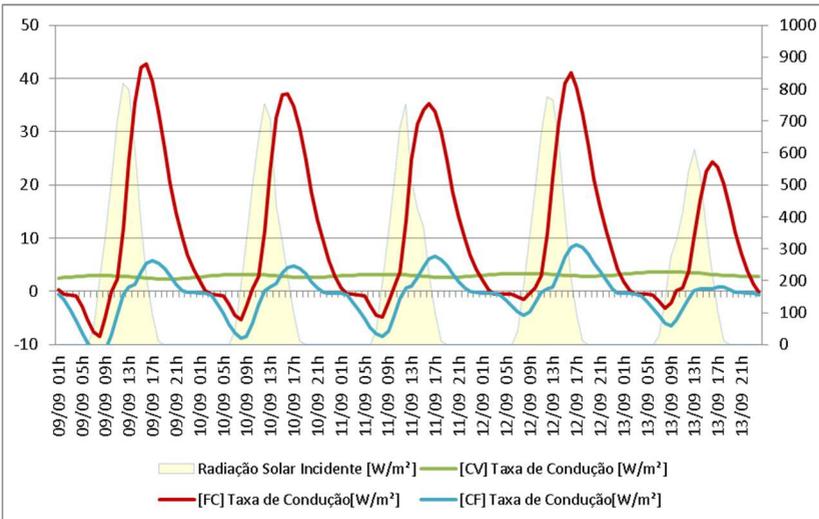


Figura 48 – Comportamento dos fluxos de calor por condução através da cobertura para o período de 09–13 de set. para Brasília – DF

As Figuras 50 e 51 apresentam graficamente a evolução das taxas de acúmulo de calor nas coberturas durante os períodos analisados. Observa-se novamente a semelhança entre o comportamento das coberturas verde e fria no período úmido apesar da grande diferença de radiação solar absorvida e os diferentes comportamentos térmicos. No período seco, a cobertura verde apresenta comportamento de acúmulo de calor semelhante a cobertura convencional. Este calor acumulado é liberado de forma diferente entre os tipos de cobertura como pode-se evidenciar a partir da análise do balanço térmico nos períodos.

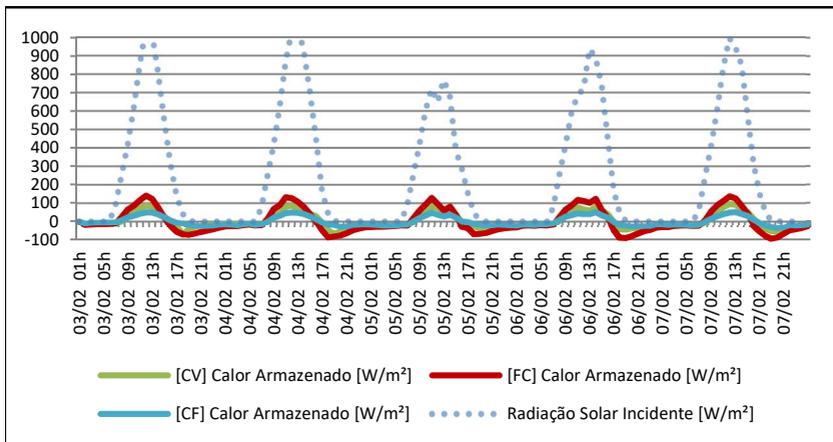


Figura 49 - Comportamento do acúmulo de calor na cobertura para o período de 03–07 de fev. para Brasília – DF

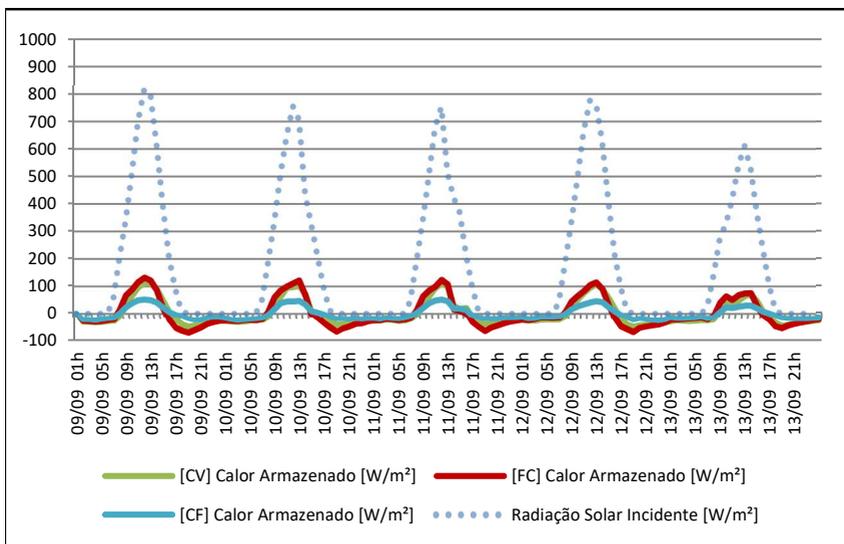


Figura 50 - Comportamento do acúmulo de calor na cobertura para o período de 09–13 de set. para Brasília – DF

Por fim, foram analisados os balanços térmicos para as três coberturas nos períodos selecionados (Figuras 52 e 53). Constatam-se no balanço da cobertura verde alguns fatores que são determinantes no desempenho diferenciado entre os dois períodos analisados. Para o período de verão, mais úmido, existem grandes parcelas do fluxo de calor que são correspondentes às trocas térmicas latentes, totalizando 18757 W/m^2 , equivalentes à 84% da radiação absorvida. Recorda-se que ocorreu precipitação nos dois dias antecedentes ao início do período analisando, aumentando os índices de umidade presente no substrato. Este comportamento foi diferente daquele resultante do balanço térmico do período seco analisado. As trocas de calor latente são praticamente inexistentes, somando-se ao fim do período somente 64 W/m^2 (entende-se após análise dos resultados hora a hora, que estes valores só não são “zerados” devido à configuração do modelo de um percentual mínimo de umidade no solo de 1%). A “ausência” dos efeitos da evapotranspiração no período seco foi o diferencial que resultou nas elevações de temperaturas de superfície observada anteriormente (Figura 44). Por consequência, elevou-se o fluxo transmitido por condução para o interior da zona (de 175 W/m^2 para 357 W/m^2), piorando o desempenho térmico da estrutura em uma escala superior à das coberturas convencional e fria.

Com índices menores de radiação, o período mais seco resultou em maiores quantidades de calor transferidas para o interior da zona. Neste caso, ainda que o substrato seco represente uma menor condutividade elétrica do mesmo, isto não foi um fator suficiente para melhorar o desempenho, pois as perdas através da evapotranspiração compensam com larga vantagem o eventual aumento da condutividade com o substrato molhado. A maior quantidade de água em todo o sistema da cobertura também pode ser um fator que contribua para a diferença de calor acumulado ao fim dos períodos analisados (de 329 W/m^2 para 71 W/m^2). A água confere maior massa térmica ao substrato.

Estas maiores temperaturas de superfícies externas registradas do período seco, em termos de fluxos de calor, acarretaram em maiores quantidades de calor trocado (perdas) por radiação (de 6527 W/m^2 para 9748 W/m^2). Pelo mesmo motivo, também foram apresentados resultados de trocas por convecção muito superiores no período seco (de 1832 W/m^2 para

7146 W/m²). Esta enorme diferença pode ser explicada não só pelas temperaturas mais altas atingidas, mas também pelo fato de que o modelo contabiliza o efeito de resfriamento da camada de ar adjacente à cobertura verde, devido aos processos de evapotranspiração.

É interessante notar que a cobertura fria, devido aos menores índices de radiação absorvida, apresentou, durante o período mais seco, perdas por radiação (5179 W/m²) superiores ao total de radiação solar absorvida (4263 W/m²), o que colaborou na maior necessidade de aquecimento neste período. As baixas temperaturas superficiais registradas (Figura 44) à noite no período resultaram em ganhos por convecção no balanço final da cobertura fria (813 W/m²).

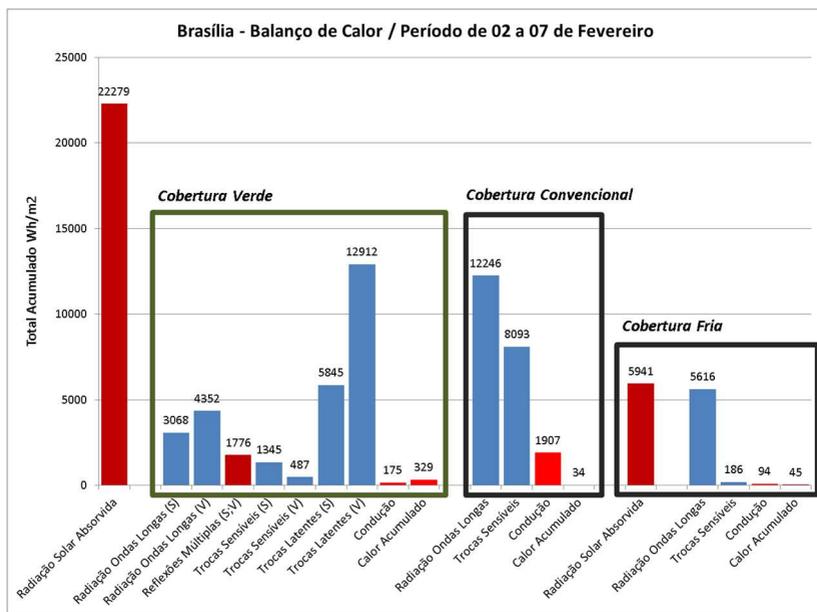


Figura 51 - Resultados das parcelas que compõem o balanço térmico para a cidade de Brasília – DF durante o período de 03–07 de fev.

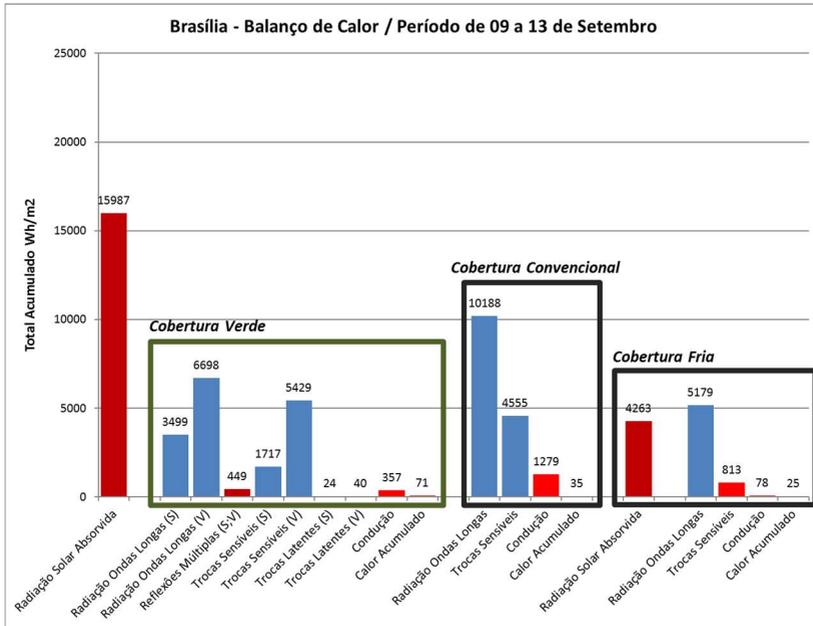


Figura 52 - Resultados das parcelas que compõem o balanço térmico para a cidade de Brasília – DF durante o período de 09–13 de set.

4.5. Análise do desempenho térmico com isolamento

O acréscimo de uma camada isolante (Isopor - Quadro 10) ao modelo de testes resultou em diferenças nas relações comparativas de desempenho térmico entre as coberturas. O Quadro 34 apresenta estes resultados. A utilização da camada isolante para este modelo de testes deve ser interpretada com muita cautela, visto que não existem ganhos por outras superfícies da envoltória ou ganhos internos. Portanto, não ocorre a situação em que o isolante poderia limitar as retiradas de calor do ambiente interno, especialmente no clima quente. A utilização desta camada somente diminui a intensidade dos fluxos de entrada e saída através da cobertura.

Quadro 34 – Resultados compilados para o desempenho térmico das três coberturas simuladas com camada de isolamento.

Desempenho Térmico com Isolamento na cobertura - Integrado Anual (FC GR x CR)					Economia em relação ao (FC)	Redução (Modelo sem isolamento)
Cidade	Carga Térmica (kWh/m ²)	Resf.	Aquec.	Total		
Belém	FC	15,9	0,0	15,9	0%	87%
	CV	7,8	0,0	7,8	51%	62%
	CF	2,4	0,0	2,4	85%	91%
Curitiba	FC	5,8	1,6	7,3	0%	92%
	CV	0,2	3,3	3,5	52%	65%
	CF	0,0	13,8	13,8	-89%	86%
Brasília	FC	4,3	0,2	4,5	0%	94%
	CV	1,4	0,1	1,5	66%	64%
	CF	0,0	5,6	5,6	-25%	87%

FC - Fibrocimento Convencional; CV - Cobertura Verde; CF - Cobertura Fria

Nota-se que para o clima frio de Curitiba o melhor desempenho continuou sendo o da cobertura verde (3,5 kWh/m².ano). A demanda de cargas térmicas foi 52% menor que da cobertura convencional. O isolamento permitiu que a cobertura fria (13,8 kWh/m².ano) reduzisse sua desvantagem de desempenho em relação ao fibrocimento (7,3 kWh/m².ano). Isto ocorreu devido às limitações dos fluxos de retirada de calor através da cobertura. Assim, foram mantidas por mais tempo as cargas térmicas de aquecimento dentro da zona. As cargas térmicas necessárias foram reduzidas em relação aos casos sem isolamento em 92%, 65% e 86%, para as coberturas convencional, verde e fria respectivamente.

Pode-se perceber que para a cidade de Belém, houve melhora de 59% no desempenho da cobertura fria (2,4 kWh/m².ano), quando comparada à cobertura verde (7,8 kWh/m².ano). Sem isolamento, estas coberturas apresentaram desempenho semelhante, com vantagem para a cobertura verde. Isto foi proporcionado devido ao fato de que a camada isolante reduz os fluxos de entrada de calor para dentro da zona. Devido à absorvância mais baixa, menor quantidade de calor é absorvida

pela cobertura fria. Como resultado, menor quantidade é transmitida para a zona interna. Em uma situação em que se deseja retirar o calor do ambiente interno, oriundo de outras fontes que não sejam a cobertura, poderia ocorrer até mesmo prejuízo em relação ao desempenho térmico sem isolamento. As cargas térmicas totais foram reduzidas em relação aos casos sem isolamento em 87%, 62% e 91%, para as coberturas convencional, verde e fria, respectivamente. Para a cobertura convencional este valor foi significativo (106,6 kWh/m².ano de redução) diminuindo consideravelmente a grande diferença de desempenho registrada com as coberturas sem isolamento.

Para o clima de Brasília, houve 64% de melhora no desempenho da cobertura verde (5,4 kWh/m².ano), o que a manteve com o melhor desempenho térmico entre as três coberturas. O desempenho das coberturas convencional (4,5 kWh/m².ano) e fria (5,6 kWh/m².ano), tiveram reduções de cargas térmicas totais de 94% e 87% respectivamente. Apesar da semelhança entre os resultados, o comportamento registrado foi diferente. Assim como nos casos sem isolamento, a baixa absorvância modificou o comportamento de forma que a cobertura fria necessitou apenas de aquecimento. A cobertura de fibrocimento manteve a necessidade de cargas térmicas de resfriamento e quase anulou por completo a necessidade de cargas térmicas de aquecimento (0,2 kWh/m²).

Segundo alguns autores as coberturas verdes, por vezes, são capazes de proporcionar efeito semelhante ao da utilização de camadas de isolamento. Com a finalidade de investigar esta condição, foi feita a comparação da cobertura verde sem isolamento com as demais coberturas com a adição de uma camada de isolamento. O Quadro 35 apresenta os resultados desta análise.

Quadro 35 – Resultados do desempenho térmico da cobertura verde sem isolamento comparada às demais coberturas acrescidas da camada de isolamento

Desempenho Térmico - Integrado Anual (CV s/iso x FC c/iso x CF c/iso)				Total	Economia em relação a CV sem isolamento
Cidade	Carga Térmica (kWh/m ²)	Resf.	Aquec.		
Belém	CV (s/ iso)	20,4	0,0	20,4	0%
	FC (c/ iso)	15,9	0,0	15,9	22%
	CF (c/ iso)	2,4	0,0	2,4	88%
Curitiba	CV (s/ iso)	0,8	9,1	9,9	0%
	FC (c/ iso)	5,8	1,6	7,3	26%
	CF (c/ iso)	0,0	13,8	13,8	-40%
Brasília	CV (s/ iso)	4,1	0,1	4,2	0%
	FC (c/ iso)	4,3	0,2	4,5	-7%
	CF (c/ iso)	0,0	5,6	5,6	-35%
FC - Fibrocimento Convencional; CV - Cobertura Verde; CF - Cobertura Fria					

Nota-se que mesmo sendo utilizada uma espessa camada de material isolante (15 cm), o desempenho térmico da cobertura verde na cidade de Curitiba foi 40% superior ao desempenho térmico alcançado pela cobertura fria. A cobertura convencional apresentou uma vantagem de 26% com relação as cargas térmicas necessárias pela cobertura verde sem isolamento. Em Curitiba, a cobertura convencional exigiu menor carga térmica de aquecimento que a verde (de 9,1 para 1,6 kWh/m²). Portanto sob as condições simuladas, a cobertura verde não foi capaz de prover um efeito de isolamento que correspondesse à camada de isolamento que foi acrescida a cobertura convencional.

Em Brasília, o desempenho da cobertura verde foi superior a ambas as coberturas comparadas, porém por motivos diferentes. Em relação à cobertura convencional, as cargas térmicas de resfriamento foram menores na cobertura verde sem isolamento, apesar dos valores serem bem próximos (7% de diferença). No caso da cobertura fria, a redução da carga térmica de aquecimento que resultou do acréscimo da camada isolante, não foi suficiente para equiparar ao desempenho da cobertura verde, em cargas térmicas totais. Em ambos os casos, pode-se concluir que a provável causa que do melhor desempenho da cobertura verde, seja a homogeneidade do comportamento apresentado pelas temperaturas superficiais internas (ex: Figura 39, Figura 45 e Figura 46).

Em Belém, a utilização da camada de isolamento, proporcionou melhoras de desempenho para as coberturas convencional (22% redução) e fria (88% de redução), em relação à cobertura verde sem isolamento. Recorda-se que neste clima, a cobertura verde obteve 100% de horas de funcionamento do sistema de cargas térmicas ideais (Quadro 19). Portanto, a utilização da camada de isolamento nas coberturas convencional e fria, permitiu a redução dos ganhos de calor em momentos de pico de radiação. A sua menor massa térmica também facilita as perdas de calor por radiação no período noturno. A cobertura fria apresentou fluxo resultante por convecção positivo (entrada de calor na zona) na situação sem isolamento, portanto, devido a sua baixa absorvância, a adição da camada de isolamento reduz muito a quantidade de calor possível de ser transmitida através do sistema da cobertura.

Deve-se interpretar estes resultados com cautela, porém a adição de uma camada isolante nas coberturas convencional e fria, mostrou vantagens significativas perante a utilização da cobertura verde no clima de Belém. O mesmo se observou para a cobertura convencional em Curitiba. Para Brasília, a adição do material isolante apresentou desvantagens para ambos os tipos de cobertura comparados à verde.

4.6. Considerações finais sobre os resultados

Neste capítulo, o modelo para coberturas verdes do *EnergyPlus* foi explorado de forma a prover melhores

entendimentos do funcionamento do mesmo. Foram exploradas variáveis de entrada e saída que permitiram a compreensão do comportamento térmico das coberturas verdes em diferentes climas. Os dados foram comparados ao de uma cobertura convencional, utilizada como referência. Analisou-se também o desempenho térmico de uma cobertura fria. Algumas conclusões podem ser feitas a partir das análises feitas:

- Sensibilidade do modelo de cobertura verde em simulações paramétricas:
 - Para os 1125 casos simulados (no clima quente e úmido), os resultados variaram amplamente, de 11 kWh/m² a 49,5 kWh/m². Isto demonstra a importância da configuração adequada para o bom desempenho térmico da cobertura, segundo o modelo.
 - O aumento do índice de área foliar permitiu o melhor desempenho entre os parâmetros de entrada testados.
 - A espessura do substrato é um fator limitante, de forma que foi o mais influente dos parâmetros testados. Resultados concentraram-se em pequenas faixas, independente das variações de outros parâmetros.
 - As variações testadas quanto aos tipos de substrato e altura das plantas pouco influenciaram o desempenho térmico.
 - O impacto de alterar a resistência estomatal mínima da vegetação dentro dos valores testados foi “imperceptível”.
- Desempenho térmico da cobertura verde:
 - Favorável quando comparado a cobertura convencional em todas as três cidades simuladas, com reduções de cargas térmicas sempre acima de 80% no período anual.
 - Apresentou melhor desempenho tanto para situações de maior demanda de resfriamento (83% de redução - Belém), quanto de aquecimento (89% de redução - Curitiba).
 - Apresentou melhor desempenho e zerou a demanda de aquecimento no clima de maior variação sazonal (95% de redução - Brasília).
 - Grande homogeneidade do comportamento de temperaturas e fluxos, contrastantes com a grande variabilidade

e altos picos atingidos com a utilização das coberturas convencional e fria.

- Não houve necessidade de irrigação para a cobertura verde alcançar nível satisfatório de desempenho térmico anual, entretanto constatou-se: (a) a diminuição dos benefícios em situações de baixo teor de umidade do substrato e atmosférica, e (b) a necessidade de adição de umidade por parte do modelo para os três climas.

- Comparação com a cobertura fria:

- A cobertura verde foi amplamente favorável a fria sobre o clima de Brasília (91% de redução de cargas térmicas).

- O resfriamento radiativo na cobertura fria foi superior à radiação solar incidente em Brasília.

- A cobertura fria exigiu cargas térmicas de aquecimento que não se fizeram necessárias com a utilização da cobertura verde.

- Nos períodos mais quentes analisados isoladamente, a cobertura fria obteve pior desempenho (carga térmica 60% maior) no período úmido. No período seco o desempenho foi “igual”.

- Esta diferença foi significativa no período seco do clima de Brasília (116% a mais de carga térmica necessária), portanto, ainda que o desempenho da cobertura verde seja melhor que o da cobertura convencional, a cobertura fria mostrou excelente capacidade de melhorar o desempenho em situações quentes.

- No clima quente (Belém) o desempenho térmico anual foi semelhante (20,4 kWh/m² [CV] e 26,0 kWh/m² [CF]).

- Nesse clima, a cobertura fria necessitou menos horas de funcionamento, apesar de maiores picos de demanda de resfriamento.

- O balanço térmico das coberturas verdes e frias:

- A cobertura verde apresenta como causa de sua melhoria de desempenho, principalmente, os aspectos voltados às trocas de calor latente.

- A evapotranspiração das plantas potencializa significativamente os possíveis efeitos sobre o desempenho em climas quentes.
 - Na ausência de umidade adequada, a cobertura verde age como simples camada “isolante” por ser dotada de grande massa térmica.
 - Com a diminuição da evapotranspiração, o aumento de temperaturas das superfícies resulta em uma maior transferência de calor por condução através da cobertura para o interior da zona.
 - A irrigação regular deve melhorar o desempenho, pois a maior parte dos eventos de chuva é convertida em *runoff*, em parte, devido às limitações do modelo.
- Mas afinal, verde ou fria no clima quente?
 - Segundo os testes que foram conduzidos, não há como afirmar qualquer melhora significativa de desempenho de uma sobre a outra.
 - Porém, é interessante que a cobertura verde obteve desempenho superior ao de uma cobertura de alta refletância.
 - Coberturas frias são alternativas práticas eficientes e de baixo custo, por isso, a partir dos resultados, entende-se que devem ser recomendadas e melhor estudadas nestas situações.
 - Coberturas verdes provêm outros elementos benéficos para as edificações e o entorno em que estão inseridas, portanto, é de grande valia mais uma constatação de seus potenciais de melhora do desempenho térmico.
 - Análise da adição de uma camada de material isolante à cobertura:
 - A cobertura verde apresentou melhor desempenho térmico que as demais coberturas em Curitiba e Brasília (Onde o mesmo também foi registrado mesmo se considerada a comparação com a cobertura verde sem isolamento).
 - Em Belém, o uso do isolante na cobertura convencional resultou em desempenho (15,92 kWh/m².ano; 22% de redução) semelhante ao da cobertura verde sem isolamento (20,4 kWh/m².ano).

- A cobertura fria com isolamento, apresentou desempenho térmico (2,4 kWh/m².ano; 88% de redução) superior ao da cobertura verde mesmo com isolamento (7,8 kWh/m².ano) em Belém.
- A adição da camada de isolamento na cobertura convencional, resultou em um melhor desempenho térmico (7,3 kWh/m², 26% de redução) que o da cobertura verde sem isolamento (20,4 kWh/m²).

5. CONCLUSÃO

Neste último capítulo da dissertação são apresentadas as conclusões a respeito da pesquisa, as limitações do estudo e recomendações para trabalhos futuros.

O ambiente o qual se inserem os habitantes de uma cidade são extremamente dinâmicos, e variam entre regiões. Entretanto enfrentam-se algumas preocupações que são inerentes à maioria das sociedades. O crescimento do consumo energético é uma delas. O presente trabalho motivou-se sob esse ponto de vista para explorar um tipo de cobertura que representa uma tecnologia disponível, e, que está inserida em diversos aspectos do funcionamento ideal das edificações e suas relações com o entorno.

Neste trabalho buscou-se uma melhor compreensão do desempenho térmico das coberturas verdes através de simulações realizadas em três cidades brasileiras. O trabalho apresenta um método onde foram isolados os componentes da cobertura, anulando a interação dos outros componentes da envoltória com os elementos climáticos. Os resultados tornaram possível compreender um pouco melhor uma das formas de se buscar a eficiência energética de edificações de forma comparativa, através da utilização de três diferentes tipos de cobertura: verde, convencional e fria.

As coberturas verdes possuem inúmeras configurações possíveis, porém se aproximam de um padrão quando busca-se obter um determinado benefício. A exploração de um modelo matemático para simulações computacionais, já validado, indica que existem situações as quais as coberturas verdes podem ser

de grande valia, devendo-se atentar-se as características de espessura do substrato e abundância da vegetação.

O balanço térmico das coberturas verdes é bastante diferenciado das coberturas convencionais. Evidencia-se nas análises de balanço térmico deste trabalho que a evapotranspiração é o fator responsável pelo aumento significativo da capacidade de evitar ganhos de calor com a utilização das coberturas verdes. A retirada de calor do ambiente interno não pode ser evidenciada devido ao método utilizado, porém com a presença da laje sob a cobertura, demonstrou-se que há retirada de calor acumulado na estrutura.

Dos climas brasileiros, os temperados são os mais frios, sendo o restante, predominantemente quentes, com grandes demandas de resfriamento. Assim o potencial de obtenção de benefícios a partir da utilização de coberturas verdes é grande. Nesta pesquisa, o desempenho térmico da cobertura verde foi superior ao das coberturas referência nos três climas distintos, que por sua vez englobam grande parte da variabilidade das condições meteorológicas registradas no país.

As coberturas frias são amplamente discutidas e cada dia mais aplicadas, não só com objetivos práticos, mas também como parte de políticas governamentais. No presente trabalho, esta cobertura se mostrou uma forma valiosa para ajudar a reduzir os ganhos de calor pela cobertura e também facilitar a retirada de calor da edificação. Foram obtidas reduções expressivas de cargas térmicas transmitidas para o interior da sala de testes simulada somente com a alteração do albedo da superfície. O fibrocimento, que neste trabalho foi utilizado como cobertura referência, mostrou-se um material cujas propriedades não são favoráveis a um bom desempenho térmico, apesar de ser amplamente utilizado em edificações (especialmente de baixa renda). O efeito resultante da redução da absorvância (possivelmente a simples aplicação de uma pintura de cor branca) mostrou-se uma forma prática de aperfeiçoar significativamente o desempenho térmico no caso da utilização deste material. Sendo uma técnica de aplicação e manutenção menos custosas e mais práticas quando comparadas a implantação de uma cobertura verde, este é um fato interessante, que indica que há situações em que o melhor desempenho térmico da edificação não é argumento que justifique a utilização de uma cobertura verde.

Com a adição da camada de isolamento reduziu-se consideravelmente as cargas térmicas necessárias em todos os tipos testados, entretanto as coberturas verdes demonstraram ser menos impactadas pela utilização da camada isolante. O efeito de isolamento proporcionado pela camada de substrato, pôde ser constatado através da comparação com uma camada de isolamento espessa, que apresentou resultados não muito discrepantes.

Pode-se concluir que o trabalho proporciona uma contribuição no sentido de entender melhor o desempenho térmico das coberturas verdes em diferentes climas do país, e com isso colaborar para trabalhos posteriores e também na elaboração de políticas regionais e normas e regulações que visem estimular a utilização de tipos de cobertura que busquem uma melhor eficiência energética das edificações como um todo e a sustentabilidade das regiões em que estão inseridas.

5.1. Limitações do estudo

- Primeiramente, as limitações deste estudo dizem respeito às limitações inerentes a qualquer estudo de simulação. A utilização de modelos matemáticos e computacionais geralmente traz consigo imperfeições, imprecisões e correções (aproximações) na tentativa de representar matematicamente fenômenos complexos da natureza e do ambiente construído;

- Aplica-se a este estudo também as limitações existentes no modelo para coberturas verdes utilizado. A inércia térmica do substrato, transferências de calor no plano horizontal, impossibilidades de se obter alguns parâmetros com precisão e a não adaptação a eventos de irrigação ou chuva intensa, são algumas das limitações que o modelo carrega;

- Somam-se a isso as limitações naturalmente impostas por se tentar simular um processo “vivo”, que é decorrente das funções metabólicas das plantas. Existem alguns fatores que não podem ser contabilizados simplesmente pela dificuldade de mensuração dos mesmos ou por não existirem dados a respeito;

- Modelos mais precisos já foram desenvolvidos, porém não estão disponibilizados em programas gratuitos.
- Limitações a respeito do modelo de testes simulado:
 - Uma única zona térmica, sem inércia nas paredes, que são adiabáticas. A ausência de outras fontes de ganhos de calor é um fator que ajuda a melhorar o entendimento do modelo de cobertura, porém afasta o caso simulado de uma situação real;
 - Não utilização de isolamento nos testes;
 - O contato com o solo (ignorado no presente trabalho) é um aspecto que também impacta diretamente a influência da climatologia sobre a edificação, visto que é o clima local quem rege as temperaturas e umidade do solo, que por sua vez influenciam as temperaturas ambientes e trocas de calor com a edificação;
 - Impossibilidades da devida validação dos dados;
 - A não aplicação da irrigação, essencial para análise e obtenção dos maiores benefícios possíveis de uma cobertura verde (cenário ótimo).

5.2. Recomendações para trabalhos futuros

- Utilização de rotinas de irrigação eficientes;
- Simulações em ambientes naturalmente ventilados para atestar os efeitos de retirada de calor dos ambientes;
- Simulações de edificações com ganhos de calor internos e por toda a envoltória, em que sejam utilizados os níveis recomendados de isolamento;
- Desenvolvimento de trabalhos que contemplem a reutilização da água do *runoff* como formas de irrigação;
- Melhor entendimento dos processos de evapotranspiração, se possível com validação de dados;
- Estudos experimentais que possam quantificar os efeitos de evapotranspiração;

- Novas comparações entre as coberturas frias e verdes, visto que hoje são amplamente discutidas, e o Brasil pode muito se beneficiar;
- A realização de análises sazonais voltadas somente para o verão, época que grande parte do território brasileiro aumenta a demanda energética em função de ar-condicionado;
- Análises de ciclo de vida, em universidades brasileiras, para que se possa compreender melhor os custos e benefícios de cada tipo de cobertura;
- Estudos experimentais que permitam concluir se realmente existem formas de se obter bons benefícios das coberturas não irrigadas;
- Estudos de simulação voltados a tipologias específicas.

6. REFERÊNCIAS

AKBARI, H. et al. **Aging and weathering of cool roofing membranes**. Lawrence Berkeley National Laboratory. 2008. Disponível em < <http://escholarship.org/uc/item/3qb8j3k7>>

AKBARI, H. et al. Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs. **Energy And Buildings**, v. 25, n. 2, p.117-126, 1997. DOI: 10.1016/s0378-7788(96)01001-8

AKBARI, H.; KONOPACKI, S. Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies. **Energy Policy**, v. 33, n. 6, p.721-756, 2005. DOI: 10.1016/j.enpol.2003.10.00

AKBARI, H.; ROSE, L. S. Urban Surfaces and Heat Island Mitigation Potentials. **Lawrence Berkeley National Laboratory**. 2008. Disponível em <http://escholarship.org/uc/item/1bq1r839>

AKBARI, H.; ROSE, L. S.; H.TAHA. Analyzing the land cover of an urban environment using high-resolution orthophotos. **Landscape And Urban Planning**, v. 63, n. 1, p.1-14, mar. 2003. DOI: 10.1016/s0169-2046(02)00165-2.

AKBARI, H; KONOPACKI, S; POMERANTZ, M. Cooling energy savings potential of reflective roofs for residential and commercial buildings in the United States. **Energy**, [s.l.], v. 24, n. 5, p.391-407, maio 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0360-5442\(98\)00105-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0360-5442(98)00105-4).

ALEXANDRI, E.; JONES, P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. **Building And Environment**, v. 43, n. 4, p.480-493, abr. 2008. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.10.055.

ALEXANDRI, E.; JONES, P. Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results. **Building And Environment**, [s.l.], v. 42, n. 8, p.2835-2849, ago. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.004>.

AL-SANEA, S. A. Thermal performance of building roof elements. **Building And Environment**, [s.l.], v. 37, n. 7, p.665-675, jul. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0360-1323\(01\)00077-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0360-1323(01)00077-4).

ANDRADE, N. C.; RORIZ, M. Comportamento térmico de cobertura verde utilizando a grama *brachiaria humidicola* na cidade de São Carlos, SP. **ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. 2008

BAUMANN N. Ground-nesting birds on green roofs in Switzerland: preliminary observations. **Urban Habitats**, v. 4, 37–50. 2006

BEATRICE C. C. **Avaliação do potencial de uso de três espécies vegetais como cobertura leve de telhados em edificações**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo – USP. São Carlos – SP. 2011

BELL, S. L. et al. Green space, health and wellbeing: making space for individual agency. **Health & Place**, v. 30, p.287-292, nov. 2014. DOI: 10.1016/j.healthplace.2014.10.005.

BERARDI, U. et al. Clarifying the new interpretations of the concept of sustainable building. **Sustainable Cities And Society**, v. 8, p.72-78, out. 2013. DOI: 10.1016/j.scs.2013.01.008.

BERARDI, U.; GHAFARIANHOSEINI, AH.; GHAFARIANHOSEINI, A. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. **Applied Energy**, v. 115, p.411-428, 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.10.047

BLANK, L. et al. Directions in green roof research: A bibliometric study. **Building And Environment**, v. 66, p.23-28, ago. 2013. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.04.017.

CAPOZZOLI A.; GORRINO A.; CORRADO V. Thermal characterization of green roofs through dynamic simulation 3th Conference of International Building Performance Simulation. **Proceedings...** França. 2013.

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.

CHEMISANA, D.; LAMNATOU, C. Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance. **Applied Energy**, v. 119, p.246-256, abr. 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.12.027.

COMA, J. et al. Thermal assessment of extensive green roofs as passive tool for energy savings in buildings. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 85, p.1106-1115, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.074>.

COSTANZO, V.; EVOLA, G.; MARLETTA, L. Energy savings in buildings or UHI mitigation? Comparison between green roofs and cool roofs. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 114, p.247-255, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.053>.

DICKINSON, R. E. et al. **Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR community climate model**. NCAR Technical Note. 1986.

DJEDJIG, R. et al. Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs. **International Communications In Heat And Mass Transfer**, [s.l.], v. 39, n. 6, p.752-761, jul. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.03.024>.

DUNNETT, N., KINGSBURY, N. **Planting green roofs and living walls**. Timber Press. Portland - EUA, 2008.

DVORAK, B.; VOLDER, A. Green roof vegetation for North American ecoregions: A literature review. **Landscape And Urban Planning**, v. 96, n. 4, p.197-213, jun. 2010. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2010.04.009

EIA. Energy Information Administration (EIA), US Energy Consumption by Sector. **International Energy Annual**, 2013, Disponível em: <http://www.eia.doe.gov/iea/>

FERRAZ, I. L. **O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em comparação ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica**. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 2012.

FIORETTI, R. et al. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. **Building And**

Environment, v. 45, n. 8, p.1890-1904, ago. 2010. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.03.001.

FLORIDES, G. A. et al. Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness. **Applied Energy**, v. 73, n. 3-4, p.299-328, nov. 2002. DOI: 10.1016/s0306-2619(02)00119-8.

FRANCIS, R. A.; LORIMER, J. Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 6, p.1429-1437, jun. 2011. DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.01.012.

FRANKENSTEIN S., KOENIG G. **FASST vegetation models**. Technical Report TR-04-25. US Army Enginner Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Hanover – EUA, 2004.

FREITAS, E. **Clima brasileiro**; Brasil Escola. <Disponível em <http://www.brasilecola.com/brasil/clima-brasileiro.htm>>

GAFFIN, S. et al. **Energy Balance Modeling applied to a comparison of white and green roof cooling efficiency. Green roofs in the New York Metropolitan Region Research Report**. 2006. Disponível em: <http://www.statisticstutors.com/articles/debrat-green-roofs.pdf>

GAGLIANO, A. et al. A multi-criteria methodology for comparing the energy and environmental behavior of cool, green and traditional roofs. **Building And Environment**, [s.l.], v. 90, p.71-81, ago. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.043>.

GATTO, C. M. **Coberturas Verdes: a importância da estrutura e impermeabilização utilizadas**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora – MG, 2012.

GETTER, K. L.; ROWE, D. B. The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development. **HortScience**, v. 41 (5) Ago. 2006.

GETTER, K.L.; ROWE, D.B.; ANDRESEN, J.A.; WICHMAN, I.S. Seasonal heat flux properties of an extensive green roof in a Midwestern U.S. climate. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 3548–57, 2011.

GHISI, E.; GOSCH, S.; LAMBERTS, R. Electricity end-uses in the residential sector of Brazil. **Energy Policy**, v. 35, n. 8, p. 4107-4120, 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2007.02.020>.

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.

JIM C.Y.; Effect of vegetation biomass structure on thermal performance of tropical green roof. **Landscape Ecology and Engineering**, v. 8, p 173–87 2012.

JONES B. G.. Population growth, urbanization and disaster risk and vulnerability in metropolitan areas: a conceptual framework. **Environmental Management and Urban Vulnerability**, World Bank Discussion Paper no. 168. 1992.

KÖHLER, M. et al. Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics – far beyond the aesthetics. **Environmental Management and Health**, v. 13, n. 4, p.382-391, out. 2002. DOI: 10.1108/09566160210439297

KÖHLER, M. **Plant survival research and biodiversity: lessons from Europe Greening Rooftops for Sustainable Communities**, pp. 313– 322. Chicago - EUA, 2003.

KOPPE C.; KOVATS S.; JENDRITZKY G.; MENNE B. Health and global environmental change; heat-waves: risks and responses. Series no. 2. **Energy, Environment and Sustainable Development**. World Health Organization. Copenhagen - Dinamarca, 2004.

KOTSIRIS, G. et al. Dynamic U-value estimation and energy simulation for green roofs. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 45, p.240-249, fev. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.005>.

KREBS, L. F. **Coberturas vivas extensivas: análise da utilização em projetos na região metropolitana de Porto Alegre e serra gaúcha**. Dissertação de Mestrado Profissional. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2005

LAAR M.; GRIMME, F. W. Thermal comfort and reduced flood risk through green roofs in the Tropics. **The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture**, Genebra - Suíça, 2006. [Online]. Disponível em: http://www.unige.ch/cuepe/html/plea2006/Vol2/PLEA2006_PAPER312.pdf

LOPES A. A. L. **Construção sustentável: Medidas construtivas sustentáveis que buscam aumentar a eficiência no uso dos recursos e minimizar os impactos ao meio ambiente**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, mar 2013.

LOPES, D. A. R. **Análise do comportamento térmico de uma cobertura verde leve (CVL) e diferentes sistemas de cobertura**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Carlos. São Carlos - SP, 2007.

MARTENS R.; BASS B.; ALCAZAR S. S. Roof-envelope ratio impact on green roof energy performance. **Urban Ecosystems**, [s.l.], v. 11, n. 4, p.399-408, 15 abr. 2008. Springer Science + Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/s11252-008-0053-z>.

MARTINS F. D. P. **Coberturas Verdes - Seu contributo para a eficiência energética e sustentabilidade**. Dissertação de Mestrado. Universidade da Beira Interior. Covilhã - Portugal, 2010.

MME - Ministério de Minas e Energia – Governo Federal. **Balço energético nacional (BEN) 2016**. 2015. Disponível em <ben.epe.gov.br/downloads/S%3%adntese%20do%20Relat%c3%b3rio%20Final_2015_Web.pdf>

NIACHOU A., et al. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. **Energy And Buildings**, v. 33, n. 7, p.719-729, set. 2001. DOI: 10.1016/s0378-7788(01)00062-7.

OBERNDORFER, E. et al. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. **Bioscience**, v. 57, n. 10, p.823-833, 2007. Oxford University Press (OUP). DOI: 10.1641/b571005.

OLIVEIRA, E. W. N. **Telhados verdes para habitações de interesse social: retenção das águas pluviais e conforto térmico**. 2009. Dissertação de Mestrado –Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2009.

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, jul. 2011. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.03.014.

PEREIRA, M. F. B. **Conteúdo energético e emissões de co2 em coberturas verdes, de telha cerâmica e de fibrocimento: estudo de caso**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2014.

PÉREZ, G. et al. Green roofs as passive system for energy savings when using rubber crumbs as drainage layer. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 30, p.452-460, 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.054>.

PHILLIPS, A. **France says new roofs must be covered in plants or solar panels**. 20 mar 2015. Disponível em: <http://thinkprogress.org/climate/2015/03/20/3636746/franch-rooftops-go-green/>

PISELLO, A. L.; COTANA, F. The thermal effect of an innovative cool roof on residential buildings in Italy: Results from two years of continuous monitoring. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 69, p.154-164, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.031>.

POOLE, A. D.; GELLER, H. **O novo mercado de serviços de eficiência energética no Brasil**. Instituto Nacional de Eficiência Energética. 1997.

PRADO, R. T. A.; FERREIRA, F. L. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 37, n. 4, p.295-300, abr. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.03.009>.

REFAHI, A. H.; TALKHABI, H. Investigating the effective factors on the reduction of energy consumption in residential buildings with green roofs. **Renewable Energy**, v. 80, p.595-603, ago. 2015. DOI: 10.1016/j.renene.2015.02.030.

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. et al. Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece. **Energy**, v. 32, n. 9, p.1781-1788, set. 2007. DOI: 10.1016/j.energy.2006.11.011.

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. DOI: 10.1016/j.solener.2012.07.003.

SANTAMOURIS, M. et al. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. **Solar Energy**, v. 70, n. 3, pp. 201–216, 2001.

SHELLER C.; MELO A. P.; LAMBERTS R. **Correções realizadas nos arquivos climáticos INMET 2012**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br>

SCHERBA, A. et al. Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment. **Building And Environment**, [s.l.], v. 46, n.

12, p.2542-2551, dez. 2011. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.012>

SCURLOCK, J. M. O.; ASNER, G. P.; GOWER, S. T. **Worldwide Historical Estimates of Leaf Area Index, 1932–2000**, Oak Ridge National Laboratory Technical Report. 2001.

SELLERS, P. J. et al. A Simple Biosphere Model (SIB) for Use within General Circulation Models. *Journal of Atmospheric Science.*, [s.l.], v. 43, n. 6, p.505-531, mar. 1986. **American Meteorological Society**. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1986\)0432.02](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1986)0432.02).

SHARIAH A. et al. Effects of absorptance of external surfaces on heating and cooling loads of residential buildings in Jordan. **Energy Conversion and Management**, Vol. 39, No. 3/4, pp. 273-284, 1998.

SHIMMY. **A brief history of roof gardens**. 2012. Disponível em: <http://www.heathershimmin.com/a-brief-history-of-roof-gardens>

SIMMONS, M.T.; GARDINER, B.; WINDHAGER, S.; TINSLEY, J. Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. **Urban Ecosystems**, v. 11, pp. 339–48, 2008.

SORGATO, M. J. **Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ventiladas Naturalmente**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis - SC, 2009.

SPROUL, J. et al. Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States. **Energy And Buildings**, v. 71, p.20-27, mar. 2014. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.11.058

STAVRAKAKIS, G.M.; ANDROUTSOPOULOS, A.M.; VYÖRYKKÄ, J. Experimental and numerical assessment of cool-roof impact on thermal and energy performance of a school building in Greece. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 130, p.64-84, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.047>.

SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; AKBARI, H. Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 39, n. 11, p.1167-1174, nov. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.004>.

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>.

TABARES-VELASCO, P. C.; SREBRIC, J. Experimental quantification of heat and mass transfer process through vegetated roof samples in a new laboratory setup. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [s.l.], v. 54, n. 25-26, p.5149-5162, dez. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.08.034>.

TAKAKURA, T; KITADE, S; GOTO, E. Cooling effect of greenery cover over a building. **Energy And Buildings**, v. 31, n. 1, p.1-6, jan. 2000. DOI: 10.1016/s0378-7788(98)00063-2.

TEEMUSK, A.; MANDER, U. Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: A case study from Estonia. **Building And Environment**, v. 44, n. 3, p.643-650, mar. 2009. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.05.011

THEODOSIOU, T. G. et al. Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. **Energy And Buildings**, v. 35, n. 9, p.909-917, out. 2003. DOI: 10.1016/s0378-7788(03)00023-9.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy Policy**, [s.l.], v. 87, p.524-541, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2015.08.041>.

UNITED NATIONS. **Revision of the World Urbanization Prospects**. UN DESA's Population Division. 2014.

VECCHIA, F. Cobertura verde leve (CVL): Ensaio experimental. **Anais ENTAC**. Maceió. 2006.

VIRK, G. et al. Microclimatic effects of green and cool roofs in London and their impacts on energy use for a typical office building. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 88, p.214-228, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.039>.

WEATHER UNDERGROUND – Disponível na internet. 2016 <<https://www.wunderground.com> e <http://www.degreedays.net/>>

WILLIAMS, N. S. G.; RAYNER, J. P.; RAYNOR, K. J. Green roofs for a wide brown land: Opportunities and barriers for rooftop greening in Australia. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 9, n. 3, p.245-251, jan. 2010. DOI: 10.1016/j.ufug.2010.01.005.

YAGHOUBIAN, N.; SREBRIC, J. Influence of plant coverage on the total green roof energy balance and building energy consumption. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 103, p.1-13, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.052>.

YANG, H. S.; KANG, J.; CHOI, M. S.. Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level. **Building And Environment**, v. 50, p.44-55, abr. 2012. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.10.004.

ZHANG, Y.; KOROLIJA, I. **Performing complex parametric simulations with jEPlus**. 9th International Conference on Sustainable Energy Technologies; Xangai, China. 2010.

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.

APÊNDICE I

Cálculo da energia trocadas pela vegetação e substrato por radiação de ondas longas

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

LAI	1,5	σf	0,67
-----	-----	----	------

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

Cobertura Fracional

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

Variáveis Necessárias	
Temperatura do Solo (K)	Green Roof Soil Temperature [C]
Temperatura da Vegetação (K)	Green Roof Vegetation Temperature [C]
Incidência Solar	Outside Face Incident Solar Radiation Rate [W/m2]
Incidência Infravermelho	Site Horizontal Infrared Radiation Rate [W/m2]

Os termos destacados correspondem ao cálculo das trocas por radiação segundo o modelo de Sailor (2008). Calcula-se a cobertura fracional correspondente ao substrato/vegetação a partir do índice de área foliar (LAI). As variáveis necessárias destacadas são obtidas através das variáveis de saída da própria simulação. As indicações à que corresponde cada parcela estão disponíveis nas explicações das equações 2 e 3, na seção 2.3.2 do trabalho.