

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

BALANÇO DE ENERGIA EM TELHADO VERDE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aline Nogueira Palmeira

Santa Maria, RS, Brasil

2016

Aline Nogueira Palmeira

BALANÇO DE ENERGIA EM TELHADO VERDE

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Ambiental**.

Orientador: Profa. Dra. Rutinéia Tassi

Santa Maria, RS
2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Nogueira Palmeira, Aline
BALANÇO DE ENERGIA EM TELHADO VERDE / Aline Nogueira
Palmeira.- 2016.
96 p.; 30 cm

Orientadora: Rutinéia Tassi
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental, RS, 2016

1. Balanço Energético 2. Telhados Verdes 3.
Comportamento Térmico I. Tassi, Rutinéia II. Título.

©2016

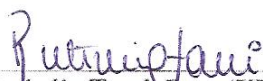
Todos os direitos autorais reservados a Aline Nogueira Palmeira. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: palmeira.aline@yahoo.com.br

Aline Nogueira Palmeira

BALANÇO DE ENERGIA EM TELHADO VERDE

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Ambiental**.



Rutinéia Tassi, Dra. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)



Débora R. Roberti, Dra. (UFSM)



Ademir Paceli Barbassa, Dr. (UFSCAR) – Videoconferência

Santa Maria, RS
2016

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha querida Mãe, Mara Songer, pelo exemplo de vida e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por ter me dado forças para enfrentar todas as adversidades que a vida impõe, e conseguir superá-las.

À minha família e amigos, por compreenderem minha ausência em alguns momentos, pelas palavras de incentivo, e por partilharem comigo esta conquista.

Aos colegas da turma do Mestrado PPGEAmb e do Grupo de Pesquisa Ecotecnologias, pela amizade e companheirismo.

À Profa. Dra. Rutinéia Tassi, pelo acompanhamento no processo de elaboração deste trabalho, pela sua ajuda, paciência, seriedade e compreensão.

À Secretária Rosa Maria Brito - pela eficiência, receptividade e atenção a mim dispensada.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE e à Profa. Dra. Débora R. Roberti, pelo empréstimo dos sensores da torre meteorológica, sem os quais este trabalho não estaria tão completo.

Aos pesquisadores Geovane Webler e Cláudio Teichrieb, pela imprescindível ajuda com os equipamentos.

À Universidade Federal de Santa Maria, pela qualidade do ensino público e gratuito e pela oportunidade de poder aumentar os meus conhecimentos.

À Coordenação e docentes do PPGEAmb, pelo estímulo à busca do conhecimento.

À CAPES, pelo auxílio financeiro durante grande parte deste trabalho;

Enfim à todos aqueles que participaram, de alguma forma, com seu apoio, carinho e atenção, transmitindo energia e confiança sem os quais a jornada seria mais difícil;

À todos, meu muito obrigada.

RESUMO

BALANÇO DE ENERGIA EM TELHADO VERDE

AUTORA: Aline Nogueira Palmeira

ORIENTADORA: Rutinéia Tassi

O conhecimento das trocas de energia entre uma superfície vegetada e a atmosfera é de grande importância para caracterizar o microclima local e identificar interações entre variáveis ambientais e a vegetação. No Brasil, as pesquisas relacionadas ao balanço de energia estão restritas a florestas e monoculturas, deixando de lado outras superfícies vegetais como é o caso dos telhados verdes (TVs). Neste sentido, o presente trabalho apresenta uma análise do balanço energético em um TV, do tipo extensivo, considerando os componentes de entrada e saída de energia neste sistema. Para alcançar este objetivo, um estudo de campo foi realizado no TV experimental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Os dados do monitoramento foram utilizados em um modelo de balanço de energia. O modelo utilizado considerou o saldo de radiação, ou energia disponível, e ainda três diferentes fluxos de calor: latente, por condução e por convecção. Estes fluxos foram determinados a partir do monitoramento das seguintes variáveis: temperatura da planta e solo, temperatura do ar, temperatura do ambiente interno do TV, radiação solar global incidente e refletida, e velocidade do vento. Estes dados foram obtidos com sensores instalados no telhado e/ou por meio da estação climatológica localizada na UFSM. Esse monitoramento foi realizado em duas etapas: de agosto de 2015 a dezembro de 2015, das 8h às 17h, contando com equipamentos manuais; e de janeiro a maio de 2016, 24h por dia, com sensores automáticos. O balanço de energia do TV e seus componentes foram determinados para o intervalo de tempo horário, e a análise foi estendida para os meses de monitoramento. Os resultados mostraram que a energia disponível utilizada nos fluxos de calor foi proveniente da radiação de onda curta, no período diurno, e de onda longa no período noturno. Essa energia líquida disponível priorizou o fluxo de calor latente (56%), principal responsável pela evapotranspiração, confirmando que esta é a forma predominante de dissipação do calor absorvido nos TVs, como citado em outros estudos. Ainda foi observado que, em média, aproximadamente 23% do saldo de radiação é destinado ao fluxo de calor por convecção, e com isso verificou-se que 79% da energia incidente e disponível retorna para a atmosfera. Quanto à energia que é transferida para o interior da edificação (fluxo de calor por condução), esta totalizou em média 1% do saldo de radiação. O restante, 20%, ficou retido no sistema de cobertura, demonstrando a eficiência dos TVs quanto ao armazenamento de energia e atenuação da temperatura. Constatou-se também que existe um desequilíbrio energético neste sistema, o qual é influenciado principalmente pelo tipo de cobertura da superfície e particularidades do experimento. Portanto, a partir do exposto, a presente pesquisa permitiu concluir que a metodologia aplicada é satisfatória para se chegar ao objetivo pretendido, e que o TV experimental, conforme o resultado total do balanço de energia, que apresentou valores positivos para os meses analisados, está ganhando e retendo mais energia do que perdendo.

Palavras-chave: Balanço Energético. Telhados Verdes. Comportamento Térmico.

ABSTRACT

DETERMINATION AND ANALYSIS OF ENERGY BALANCE IN GREEN ROOF

AUTHOR: Aline Nogueira Palmeira

ADVISER: Rutinéia Tassi

The knowledge of energy transfers between vegetated surface and the atmosphere is of great importance to characterize the local microclimate and identify interactions between environmental variables and vegetation. In Brazil, the research related to energy balance are restricted to forests and monocultures, leaving aside other vegetable surfaces as is the case of green roofs (TVs). In this sense, this paper presents an analysis of the energy balance on a TV, the extensive type, considering the input and output components of energy in this system. To achieve this objective, a field study was conducted in the experimental TV of the Federal University of Santa Maria (UFSM). The monitoring data were used in an energy balance model. The model considered the radiation balance, or power available, and even three different heat flows: latent, by conduction and convection. These flows were determined by monitoring the following variables: temperature of the plant and soil, air temperature, temperature of the internal environment of the TV, global solar radiation and reflected, and wind speed. These data were obtained from sensors installed on the roof and / or by meteorological station located at UFSM. This monitoring was carried out in two stages: August 2015 to December 2015, from 8h to 17h, with manual equipment; and from January to May 2016, 24 hours a day with automatic sensors. The energy balance of the TV and its components were determined for the time interval (hour), and the analysis was extended to the months of monitoring. The results showed that the available energy used in heat flows came from the short-wave radiation during the day, and long wave at night. This net energy available prioritized the latent heat flux (12%), mainly responsible for evapotranspiration, confirming that this is the predominant form of heat dissipation absorbed in TVs, as cited in other studies. Also, it was observed, on average, about 5% of the radiation is intended to balance heat flow by convection, and thus it was found that 17% of the incident energy available and returns to atmosphere. The energy that is transferred into the building (by conduction heat flux), this amounted on average 4% net radiation. The remaining, 79%, was retained in the cover system, showing the efficiency of the TVs as the energy storage and attenuation of temperature. It was also found that there exists an energy imbalance in this system, which is mainly influenced by the type of surface coverage and the particularities experiment. So, from the above, this study concluded that the methodology applied is satisfactory to reach the desired goal, and the experimental TV as the overall result of the energy balance, which showed positive values for the months analyzed, is gaining and retaining more energy than losing.

Keywords: Energetic Balance. Green Roofs. Thermal Behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de um telhado verde no edifício Rockefeller Center, em Nova Iorque.....	17
Figura 2 - Ilustração de telhados verdes intensivo (a) e extensivo (b).	18
Figura 3 - Ilustração tipos de sistemas de TVEs: (a) completo, (b) modular e (c) manta de vegetação pré-cultivada.	21
Figura 4 - Esquema das camadas de um telhado verde.	23
Figura 5 - Ilustração de exemplares do gênero <i>Sedum</i> (espécie <i>Sedum rupestre</i>).....	27
Figura 6 - Trocas de calor em uma cobertura.	31
Figura 7 - Ilustração dos fluxos do balanço de energia.	34
Figura 8 - Esquema do balanço de energia de um sistema vegetado, no período de um dia. ..	35
Figura 9 - Esquema dos sete fluxos de energia considerados em um modelo de balanço energético.....	37
Figura 10 - Localização do telhado verde experimental em estudo, Santa Maria - RS.....	41
Figura 11 - Ilustração do entorno do telhado verde experimental.	42
Figura 12 - Imagem demonstrativa do telhado verde experimental da UFSM (a) e respectiva cobertura vegetal (b).	43
Figura 13 - Ilustração de (a) um módulo hexagonal e (b) vista lateral do módulo preenchido a exemplo do experimento.	43
Figura 14 – Detalhe esquemático das instalações dos telhados: (a) vista lateral, e (b) vista superior.	44
Figura 15 - Estação Meteorológica do INMET, em Santa Maria, RS.....	45
Figura 16 - Equipamentos para medição de: (a) temperatura do solo, (b) temperatura da planta e (c) temperatura interna, do ar e da superfície do telhado convencional.	46
Figura 17- Estação meteorológica instalada no telhado verde experimental.	48
Figura 18 - Localização dos sensores na estação meteorológica instalada no telhado verde experimental.	50
Figura 19 - Esquema da vista lateral da estrutura do telhado e localização da instalação dos equipamentos.	51
Figura 20 -Médias mensais de: (a) Precipitação acumulada, (b) Temperatura e umidade relativa do ar para o local de estudo.	59
Figura 21 - Médias mensais de magnitude do vento para Santa Maria, RS, observadas no período estudado e as normais climatológicas definidas em BRASIL (1991).	61
Figura 22 – Média horária da temperatura interna do telhado verde, externa (ou do ar) e a temperatura superficial do telhado verde registradas no período estudado, e a diferença entre T_{AR} e T_{ITV}	63
Figura 23 – Média horária mensal da temperatura da planta e do solo durante o período estudado.	66
Figura 24 - Ilustração da mudança do aspecto da vegetação do telhado verde experimental durante o período estudado.	69
Figura 25- Comparação entre as médias mensais das temperaturas internas e superficiais dos telhados verde e convencional, e a temperatura do ar no período estudado.....	72
Figura 26 - Correlação entre os gradientes de temperatura interna, medidos e calculados, para o TV (a) e TC (b).	74
Figura 27 - Variação média horária dos componentes do balanço de radiação durante os meses estudados.	75
Figura 28 - Comparação dos albedos referentes aos telhados verde e convencional, no intervalo das 9h às 17h, de janeiro a maio de 2016.	77
Figura 29 - Balanço de energia e fluxos de calor do telhado verde em estudo.	78

Figura 30 - Correlação entre as médias horárias mensais de: (a) R_n e $Q_{convecção}$, (b) R_n e $Q_{condução}$, (c) R_n e $Q_{latente}$ e (d) R_n e $Q_{convecção} + Q_{condução} + Q_{latente}$ 81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo dos valores de temperatura média, máxima e mínima, observados (Obs.) e definidos (Nor.) para os meses de estudo em Santa Maria, RS.	60
Tabela 2 – Comparativo entre as temperaturas médias, máximas e mínimas, do ar e do telhado verde (interna e superficial).	64
Tabela 3 - Comparativo das médias mensais de temperaturas interna e superficial dos telhados verde e convencional, e da temperatura do ar externo.	71
Tabela 4- Médias mensais dos componentes R_n , $Q_{convecção}$, $Q_{condução}$, $Q_{latente}$ e do balanço de energia do telhado verde estudado.	78
Tabela 5 - Médias mensais da capacidade térmica, do balanço de energia, da taxa de variação de temperatura do telhado verde experimental, e a diferença entre os dois últimos.	82

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características dos tipos de telhado verde.....	19
Quadro 2 - Características gerais dos instrumentos utilizados no experimento.....	47
Quadro 3 - Características gerais dos instrumentos utilizados da estação meteorológica instalada no experimento.....	49
Quadro 4 - Equações adotadas para a resolução da Equação 1.....	54
Quadro 5 - Calendário de leituras no telhado verde experimental.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AV – Leitura de averiguação dos dados
BE – Balanço de energia
CT – Centro de Tecnologia
EM – Estação meteorológica
EMA - Estação meteorológica automática
EVA – Espuma vinílica acetinada
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LCD – Display de cristal líquido
LuMet – Laboratório de Micrometeorologia
M – Leitura feita de forma manual
NE – Nordeste
SE – Sudeste
TC – Telhado convencional
TV – Telhado verde
TVE – Telhado verde extensivo
UFSM – Universidade Federal de Santa Maria

LISTA DE SÍMBOLOS

\uparrow - Saída de energia ou radiação
 \downarrow - Entrada de energia ou radiação
 CT_{TV} - Capacidade térmica do telhado
 dz - Espessura da cobertura telhado
 e - Pressão de vapor d'água atual na atmosfera
 e_s - Vapor d'água do ar saturado
 H - Fluxo de calor sensível
 LE - Fluxo de calor latente
 OC - Radiação em ondas curtas
 OL - Radiação em ondas longas
 $Q_{condução}$ - Fluxo de calor por condução
 $Q_{convecção}$ - Fluxo de calor por convecção
 $Q_{latente}$ - Fluxo de calor latente
 R_n - Saldo de radiação ou energia disponível
 T_{ar} - Temperatura do ar externo
 T_{iTC} - Temperatura do ar interna do telhado convencional
 T_{iTV} - Temperatura do ar interna do telhado verde
 T_{TC} - Temperatura superficial do telhado convencional
 T_{TV} - Temperatura superficial do telhado verde
 u - Velocidade do vento
 UR - Umidade relativa do ar
 α - Albedo ou coeficiente de reflexão
 β - Razão de Bowen
 ϵ_s - Emissividade
 κ - Condutividade térmica da camada de cobertura
 σ - Constante de Stefan Boltzmann
 Υ - Constante psicrométrica
 γ - Coeficiente de convecção

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	OBJETIVO GERAL.....	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	TELHADOS VERDES	16
3.1.1	Características gerais dos telhados verdes.....	18
3.1.2	Telhados verdes extensivos	19
3.1.3	Características da vegetação utilizada em telhados verdes extensivos.....	23
3.1.4	Benefícios térmicos dos telhados verdes	27
3.2	ENERGIA TÉRMICA E TRANSFERÊNCIA DE CALOR	29
3.3	BALANÇO DE ENERGIA EM TELHADOS VERDES	32
4	MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL.....	40
4.2	DESCRIÇÃO DO TELHADO VERDE EXPERIMENTAL.....	42
4.3	MONITORAMENTO	44
4.3.1	Equipamentos	44
4.3.2	Rotina de monitoramento	50
4.3.3	Sistemas de medição e aquisição de dados.....	51
4.4	ESTIMATIVA DO BALANÇO DE ENERGIA	53
4.5	TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS.....	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
5.1	CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA.....	58
5.2	COMPORTAMENTO TÉRMICO DO TELHADO VERDE	61
5.3	BALANÇO DE ENERGIA DO TELHADO VERDE	74
6	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	84
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
	APÊNDICE A – VARIAÇÃO DIÁRIA DO ALBEDO SOBRE UM TELHADO VERDE EXPERIMENTAL EM SANTA MARIA-RS	94

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, práticas como a retirada da cobertura vegetal original, a impermeabilização dos solos, utilização de materiais construtivos inadequados, canalização de rios e córregos e emissão de poluentes para a atmosfera têm sido frequentes nas cidades. Essas ações, associadas às características naturais do ambiente, têm proporcionado a geração de ilhas de calor no meio urbano, sendo observadas ocorrências de desconforto térmico em muitas cidades onde estudos que envolvem este tema têm sido realizados (ESPÍNOLA, 2010; FERRAZ, 2012).

Para minimizar os efeitos negativos gerados pelo aumento da temperatura no meio urbano, o telhado verde, entre outras práticas, tem se destacado como uma solução eficiente, e já é utilizado em vários países, principalmente na Europa (SILVA, 2011). Além deste benefício ambiental, podem ser citados outros atribuídos aos TVs, como: a redução das superfícies impermeáveis, redução dos níveis de poluição e absorção de componentes da chuva ácida (IGRA, 2015); o controle do escoamento de águas pluviais; a purificação da água e do ar; regulação térmica através da evapotranspiração das plantas e redução das flutuações de umidade do entorno (LOPES, 2007; MARY et al., 2008).

Os benefícios dos TVs para a sociedade também merecem ser destacados (JOBIM, 2013; LEANDRO, 2011; TASSI et al., 2014), uma vez que podem ser utilizados para recreação, cultivo de alimentos e ervas medicinais (HENEINE, 2008). O efeito terapêutico da presença de superfícies verdes em meio urbano também é reconhecido, e deve ser considerado como mais um dos benefícios do uso de TVs (MARY et al., 2008). Adicionalmente, se bem instalados os TVs podem prolongar a vida útil dos telhados, melhorar o conforto térmico nas edificações, com consequente melhoramento da eficiência energética dos edifícios (LOPES, 2007; MARY et al., 2008).

Aliados a outras técnicas de construção sustentável, os telhados verdes apresentam diversos benefícios, entre eles podem ser citados também a criação de um microclima local com a mitigação dos efeitos das ilhas de calor no meio urbano. Além disso, a vegetação e o solo atenuam a transmissão de calor para o interior da edificação e protegem a cobertura contra a ação dos raios ultravioletas e extremos de temperatura (ISSA, LEITCH e CHANG, 2015; LOPES, 2007; TASSI, 2014; VECCHIA, 2005), dadas as características deste tipo de superfície.

O processo de aquecimento e as trocas de calor que ocorrem na superfície terrestre são impulsionados pela ação da radiação solar. Ela é responsável pela redistribuição da umidade e

calor no solo e atmosfera, sendo de fundamental importância o conhecimento dos mecanismos de troca para a compreensão do microclima e balanço radiativo, ou energético, de uma região ou cobertura (SILVA e ANDRADE, 2013).

O conhecimento destas trocas pode ser realizado mediante o emprego do balanço de energia na superfície, que é determinado pela energia disponível no sistema, que por sua vez é particionada entre os fluxos de calor e o armazenamento desta pelo meio (OKE, 1987). No caso de superfícies vegetadas, o balanço de energia permite avaliar as trocas de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera, através do estudo da partição do saldo de radiação nos diversos processos que ocorrem em determinada cultura (FONTANA, BERLATO e BERGAMASHI, 1991).

Neste contexto, este trabalho apresenta o resultado de um estudo no qual foi realizado o balanço de energia de um telhado verde, buscando estudar a eficiência deste sistema quanto à entrada e saída de energia e calor.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo principal estimar o balanço energético de um telhado verde experimental, e analisar o comportamento do mesmo em relação às componentes de entrada e saída de energia.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

De forma mais específica, objetivaram-se:

- comparar medições realizadas com equipamentos de alta resolução de uma estação meteorológica automática com medidas realizadas com os instrumentos de baixo custo;
- caracterizar o comportamento térmico do telhado verde em estudo;
- determinar o albedo para o telhado verde;
- quantificar o saldo de radiação, ou energia solar disponível, do telhado verde; e
- caracterizar a partição do saldo de radiação nos fluxos de calor latente, por convecção e por condução.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo está estruturado em três partes principais. A primeira parte apresenta uma caracterização geral dos telhados verdes, principalmente os extensivos, além de apresentar os benefícios térmicos promovidos por este tipo de cobertura. A segunda parte traz uma definição de energia térmica e como se dá a transferência de calor em determinados meios. E por fim é apresentado um apanhado geral sobre balanço de energia, principalmente quando relacionado à superfícies vegetadas e telhados verdes.

3.1 TELHADOS VERDES

As cidades são geradoras de um clima próprio, resultante da interferência de todos os fatores que se processam sobre a camada de limite urbano e que agem no sentido de alterar o clima em escala local. Seus efeitos mais diretos são percebidos pela população por meio de manifestações ligadas ao conforto térmico, à qualidade do ar, aos impactos pluviais e a outras respostas capazes de organizar a vida da cidade e deteriorar a qualidade de vida de seus habitantes. Neste contexto, o telhado verde se apresenta como uma alternativa para amenizar as consequências da crescente urbanização e evolução das cidades (MONTEIRO, 1976).

Telhados verdes, coberturas verdes ou jardins suspensos podem ser definidos como sistemas construtivos que consistem em uma cobertura vegetal com grama ou outra espécie adequada, podendo ser instalados em lajes planas ou sobre telhados inclinados. A utilização desta alternativa oferece diversas vantagens, entre elas maior controle do escoamento pluvial, isolamento acústico e térmico, redução de custos com energia, diferencial estético e ambiental da edificação (FERREIRA, 2008; MONTEIRO, 1976).

Conforme Heneine (2008), o crescimento de plantas nos telhados e paredes das edificações está deixando de ser um movimento ambiental alternativo, passando a encontrar rigor científico e promovendo o desenvolvimento econômico. As coberturas verdes estão começando a se difundir por muitas regiões do mundo, sendo que os fatores de motivação da implementação do sistema podem variar de acordo com clima, cultura e política, além dos tipos de incentivos para promover a sua implementação.

Recentemente, algumas cidades, a exemplo de Nova Iorque nos EUA, vêm fornecendo um incentivo financeiro à implementação de telhados verdes na cidade, por meio de um desconto oferecido no imposto urbano para quem fizer uso deste tipo de cobertura (LORENZINI NETO, 2014).

A Figura 1 mostra um exemplo de telhado verde em Nova Iorque, que apresenta grande potencial de aplicação de coberturas verdes para mitigação de problemas como alagamentos e ilha de calor, já que a área superficial da cidade é composta por cerca de 19% de telhados convencionais, os quais podem ser convertidos em telhados verdes (ROSENZWEIG, GAFFIN e PARSHALL, 2006).

No Brasil, são encontrados poucos relatos antigos sobre a utilização de telhados verdes até a década de 90, atualmente já são mais conhecidos nas regiões Sul e Sudeste do país, onde a sua execução começa a se expandir visando à gestão ambiental, contribuindo para a minimização de alagamentos e enchentes, aliados ao conforto térmico e acústico (CASTRO e GOLDENFUM, 2010; ECOTELHADO, 2015; LORENZINI NETO, 2014; MORUZZI, MOURA e BARBASSA, 2014; PIOVESAN, 2013; BRUM et al, 2014; VILELA, 2011; WILLES, 2014).

Figura 1 - Exemplo de um telhado verde no edifício Rockefeller Center, em Nova Iorque.



Fonte: Elias (2013).

3.1.1 Características gerais dos telhados verdes

As características de um telhado verde (TV) dependerão da tipologia utilizada e esta, por sua vez, dependerá do tipo de estrutura onde o TV será instalado, além do objetivo pretendido. No entanto, na maior parte dos casos, os TVs são separados em dois tipos principais: os intensivos e os extensivos, como ilustra a Figura 2.

Os intensivos são caracterizados por possuírem maior espessura de substrato e diversidade de espécies vegetais, podendo abrigar plantas de pequeno e médio porte, e devido a isso, conseguem reter maior quantidade de água e nutrientes. Os TVs intensivos normalmente exigem manutenções e irrigações regulares, além de uma estrutura de suporte mais reforçada que aquela utilizada para os TVs extensivos, pois a maior espessura de substrato implica em uma sobrecarga maior na estrutura de suporte (ZINCO, 2007 apud JOBIM, 2013).

Os TVs extensivos, ao contrário, possuem baixa espessura de substrato e, portanto, suportam apenas plantas de pequeno porte, que exigem pouca manutenção devido a sua baixa taxa de crescimento (ZINCO, 2007 apud JOBIM, 2013).

Figura 2 - Ilustração de telhados verdes intensivo (a) e extensivo (b).



Fonte: (a) Studio Cidade Jardim (2015), (b) Ecotelhado (2015).

Para a International Green Roof Association (IGRA, 2015), pode-se incluir uma terceira tipologia de TV, o semi-extensivo. Este tipo de cobertura usa substratos de pouco peso, uma moderna tecnologia de construção, e camadas ligeiramente mais profundas do que as apresentadas pelo TV extensivo, possibilitando o crescimento de uma escala mais ampla e diversificada de vegetação, tanto rasteira quanto de porte médio.

As características básicas de cada tipo de TV podem ser observadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Características dos tipos de telhado verde.

CARACTERÍSTICA	TIPO DE TELHADO VERDE		
	Extensivo	Semi-intensivo	Intensivo
Manutenção	Pouca	Periodicamente	Regularmente
Irrigação	Não	Periodicamente	Regularmente
Plantas	Gênero <i>Sedum</i> , ervas e gramíneas	Gramas, ervas e arbustos	Gramado, arbustos e árvores
Espessura do Substrato	60 – 200 mm	120 – 250 mm	150 – 400 mm
Peso	60 – 150 kg/m ²	120 – 200 kg/m ²	180 – 500 kg/m ²
Custos de implantação e manutenção	Baixo	Médio	Alto

Fonte: Traduzido e adaptado de IGRA (2015).

O sistema extensivo de TV será o foco desta revisão, pois é o tipo de telhado verde utilizado na pesquisa, portanto, no item seguinte é dado destaque à revisão deste tipo de sistema.

3.1.2 Telhados verdes extensivos

Conforme Vilela (2011), um telhado verde extensivo (TVE) pode ser construído em praticamente todos os tipos de coberturas (telhas cerâmicas, de fibrocimento, coberturas de aço e lajes). Geralmente esse tipo de telhado é aplicado onde o ambiente será visitado ou visto por pessoas, e tem sua beleza espelhada em uma área gramada.

Empresas especializadas indicam que a espessura do substrato no TVE deve ter em média de 5 a 15 cm e a vegetação de 5 a 13 cm de altura, aproximadamente, dependendo da profundidade do substrato e do tipo de sistema utilizado. A carga estrutural pode variar de 80 Kg.m⁻² a 150 Kg.m⁻² (ECOTELHADO, 2015; ECOCASA, 2015).

Vecchia (2005) afirma que o TVE tem um impacto menor de sobrecarga sobre os elementos da cobertura, dos pilares e da fundação, comparado ao sistema intensivo, que apresenta um grande peso estrutural (JOHNSTON e NEWTON, 2004). Os sistemas extensivos por serem mais leves são mais adequados para grandes áreas e telhados, com

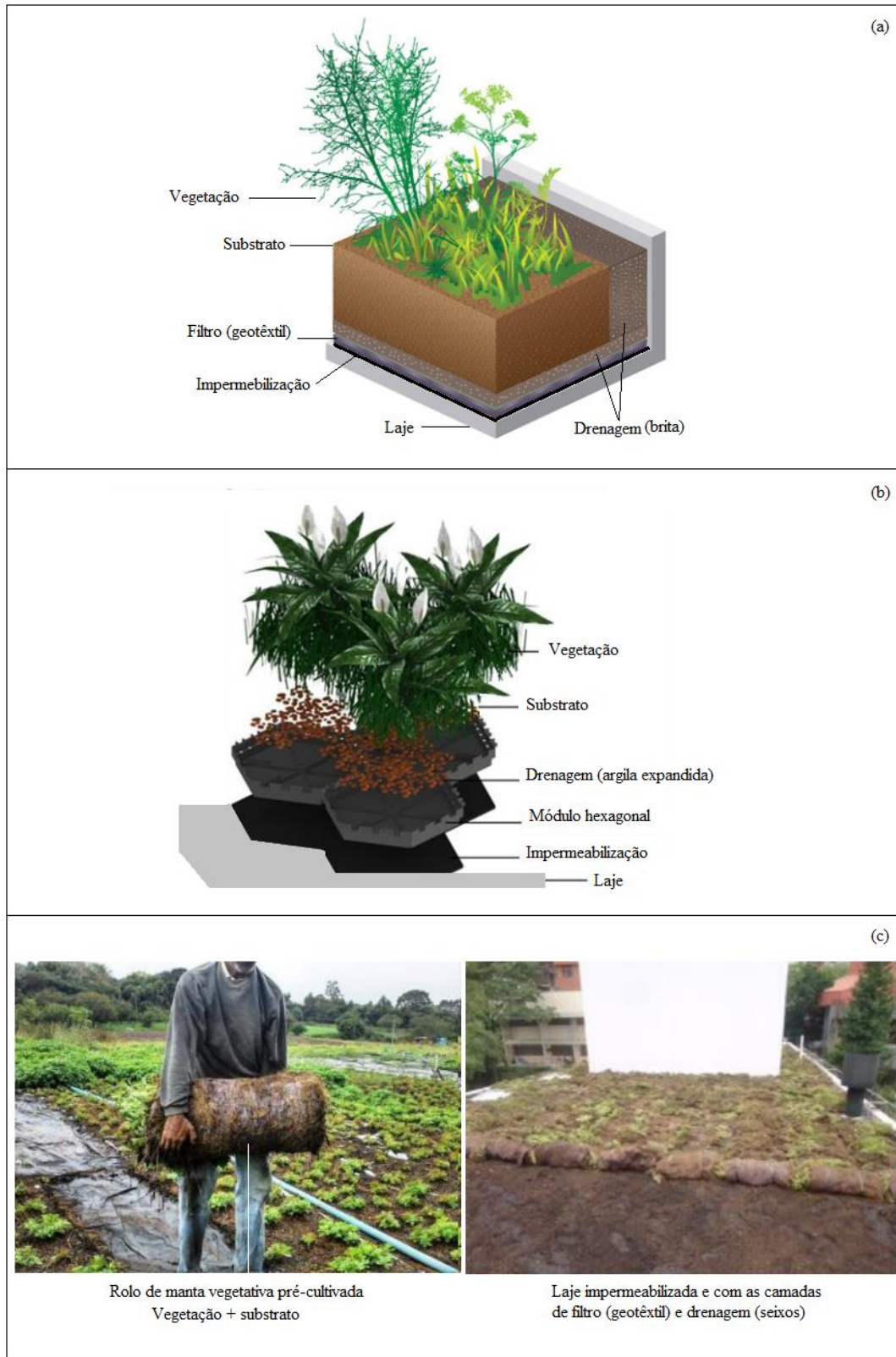
declive de até 20°. Para coberturas acima de 20° é necessária a utilização de barreiras ou outras estruturas que permitam dar capacidade de suporte para que o substrato e a vegetação não deslizem ou excedam a contenção do telhado (TOMAZ, 2005).

Neste sentido, Moruzzi, Moura e Barbassa (2014) investigaram o efeito da inclinação e umidade antecedente do solo nas parcelas escoadas, armazenadas e percoladas em TVEs, avaliando inclinações de 10, 20 e 30%. Os resultados mostraram que quanto menor a inclinação, menor o transporte de material e o coeficiente de escoamento superficial do telhado, e maior a lâmina de água armazenada.

Conforme foi apresentado no Quadro 1, o custo de implantação e manutenção de um TVE é relativamente mais baixo que o de um sistema intensivo, além de se apresentar como bom isolante térmico. Entretanto, comparativamente ao telhado verde intensivo, os TVEs podem apresentar algumas desvantagens, como o seu baixo apelo estético e a restrição de uso, dependendo das espécies e do sistema de suporte. Nesse tipo de telhado verde, em geral opta-se por vegetação composta por espécies com maior resistência à seca, como o *Sedum spp.*, além de ervas, gramíneas e musgos (GETTER e ROWE, 2006), que normalmente não produzem flores ou frutos.

Os TVEs por sua vez, podem ser separados em sistemas completos, modulares, ou manta de vegetação pré-cultivada, conforme mostra a Figura 3. Nos sistemas completos, cada componente é instalado como parte integral do telhado; nos modulares, as bandejas de vegetação cultivadas *in situ* são instaladas acima do telhado existente; e nas mantas de vegetação pré-cultivada, o substrato e as plantas, são dispostos diretamente sobre a cobertura existente, revestida pelos materiais de drenagem, e camada de impermeabilização (OBERNDORFER et al., 2007; ROLA, 2008; ROLA et al., 2013; WILLES, 2014).

Figura 3 - Ilustração tipos de sistemas de TVEs: (a) completo, (b) modular e (c) manta de vegetação pré-cultivada.



Fonte: Adaptado de: (a) Boni (2015); (b,c) Ecotelhado (2015).

Independentemente do sistema estrutural escolhido, um TVE é constituído normalmente por cinco camadas: vegetação, substrato, drenagem, filtro e uma membrana impermeável. Esta disposição pode apresentar outras variações, como mostra a Figura 4, incluindo mais camadas, como por exemplo uma manta anti-raiz.

A vegetação (pode ser utilizada uma mistura de diferentes espécies) deve ser escolhida considerando o tipo de TVE, a capacidade estrutural da cobertura, a espessura do substrato, além da preferência por espécies adaptadas ao clima do local. Portanto, o substrato deve ter uma espessura adequada à espécie selecionada, e deve possuir nutrientes necessários ao desenvolvimento da vegetação (SILVA, 2011).

A camada de drenagem tem por intuito escoar o excesso de água proveniente da precipitação. Esta camada pode ser constituída de brita, seixos, argila expandida ou outros elementos que criem espaço para o armazenamento da água drenada. Acima da camada de drenagem deve ser instalada a camada de filtragem, normalmente um geotêxtil, que tem a função de reter as partículas de solo que seriam levadas pela água. Já a camada impermeabilizante tem a função de proteger a laje ou o telhado contra infiltrações, e a membrana de proteção contra raízes, quando presente, controla o crescimento das raízes que seriam danosas para o sistema de impermeabilização (LORENZINI NETO, 2014).

Na composição dos telhados verdes, vários materiais podem ser empregados, variando de acordo com o executor, necessidades e desejos do usuário, espaço disponível, custo, tipo de cobertura da edificação e capacidade de suporte, bem como a localização da área desejada (JOBIM, 2013).

Neste sentido, várias pesquisas vêm sendo realizadas, inclusive no telhado verde objeto desta pesquisa, principalmente no que se refere à eficiência no controle quantitativo do escoamento pluvial (LORENZINI NETO, 2014; PERSCH, 2012; TASSI et al., 2014).

Entre outros estudos realizados no TV em questão, ainda pode-se citar aqueles relacionados ao comportamento de diferentes espécies, utilizadas como cobertura de TVs e sua influência no escoamento superficial (SILVA, 2010; TASSINARI et al., 2013). Além disso, atualmente ainda existem projetos em andamento referentes ao aspecto qualitativo do escoamento pluvial (PESSOA, 2016) e evapotranspiração, ainda não publicados.

Figura 4 - Esquema das camadas de um telhado verde.



Fonte: Adaptado de L2 Arquitetura (2015).

3.1.3 Características da vegetação utilizada em telhados verdes extensivos

São poucas as semelhanças entre um ambiente de telhado e um jardim ao nível do chão. O calor, a luz solar e o vento são mais intensos em um telhado, e as qualidades do solo, como conteúdos orgânicos, que são valiosos em um jardim ao nível do solo, podem ser indesejáveis em um TV, podendo, em quantidade, levar à degradação e perda do volume de cultura (WILLES, 2014).

Conforme já discutido, a seleção de plantas depende do meio crescente, bem como as condições locais, manutenção disponível, e a aparência desejada. Oberndorfer et al. (2007), afirmam que a composição e as características da vegetação impõem restrições ao uso de certas espécies como a necessidade de irrigação, de acordo com a sazonalidade dos eventos chuvosos, baixa taxa de resistência quando submetidos a temperaturas extremas e ocorrência de ventos fortes, além de dependerem de outros fatores como a altura das edificações e características do substrato.

Heneine (2008) acrescenta que a seleção de plantas também depende da manutenção disponível e da aparência desejada da futura cobertura. Características como estas restringem o número de espécies aptas a essas condições, em contrapartida, há uma quase ilimitada opção de plantas que podem ser utilizadas para coberturas de telhados verdes intensivos (HENEINE, 2008).

A escolha de espécies vegetais que se adaptem ao clima local, e que resistam a aspectos limitantes como espaço, profundidade e nutrição, favorece a otimização de suas funções ecológicas, estéticas e econômicas, tornando-se viável para a implantação em coberturas, diminuindo custos com replantio, manutenção e irrigação (DURHMAN, ROWE e RUGH, 2007).

Dentre as espécies de plantas cultivadas para jardins suspensos ou TVEs, podem-se destacar as suculentas (família *Crassulacea*), as quais compreendem um grupo variado de espécies e gêneros. De modo geral, as suculentas são plantas bastante rústicas e pouco exigentes no que diz respeito a tratamentos culturais (WILLES, 2014).

De acordo com Willes (2014), as plantas mais utilizadas em coberturas verdes na região Sul do Brasil são:

- (i) Carpete-dourado (*Sedum acre*): espécie de suculenta de baixo porte que sobrevive bem em solo raso, exige cuidados simples, aguenta períodos de seca, mas não pode ser utilizada em terraços onde ocorra pisoteio;
- (ii) Cacto-margarida (*Lampranthus productus*): planta rasteira, também da família das suculentas, floresce durante a primavera e o verão. Encara o clima frio, mas não o pisoteio. Exige água apenas nos dias mais secos e adubação semestral;
- (iii) Echevéria (*Echeveria glauca*): planta rústica, como toda a família das suculentas. Necessita de regas apenas em períodos de seca prolongada, sem exigir poda. Pede adubação semestral e não resiste a pisoteio;
- (iv) Grama-amendoim (*Arachis repens*): proporciona forração densa, com flores amarelas em boa parte do ano. É mais indicada para áreas sem pisoteio, dispensa podas regulares e suporta períodos de seca, embora sofra com geadas; e
- (v) Grama-esmeralda (*Zoysia japônica*): espécie resistente ao pisoteio, é um dos tipos mais rústicos entre as gramíneas. O plantio de grama, apesar de ser o mais praticado, não é tão recomendado, pois exigem podas frequentes e requerem muita água.

Conforme Snodgrass e Snodgrass (2006), não é estabelecido uma lista padrão de plantas recomendadas para uso em TVs, no entanto, existem indicações de espécies

potencialmente favoráveis para cada localidade, a qual possui características peculiares que devem atender à escolha mais adequada com base em observações e experiências próprias.

Durhman, Rowe e Rugh (2007) e Monterusso et al. (2005) por exemplo, em suas pesquisas, compararam taxa de crescimento, sobrevivência, cobertura e persistência e métodos de propagação, a fim de explorar o potencial de diferentes espécies para uso em coberturas extensivas. Estes autores, concluíram que plantas suculentas do gênero *Sedum* apresentam adequabilidade para aplicação em TVEs no Noroeste dos Estados Unidos, por suportar com sucesso climas de frio e calor extremo, difundindo o uso dessas espécies pelo país e pelo mundo, por meio de informativos e trabalhos científicos.

Outro fator importante é o coeficiente de reflexão da superfície vegetal (albedo), propriedade biofísica da vegetação que representa a quantidade de radiação solar refletida de volta para a atmosfera em relação à interceptada pela planta, influenciando diretamente no balanço de radiação e energia (COUTO e SILVA, 2010). Segundo o autor, a variabilidade do albedo indica a energia disponível para os diferentes processos físicos e fisiológicos que ocorrem em determinado meio, e depende principalmente do tipo de vegetal, coloração da superfície e inclinação dos raios solares.

As variações do albedo podem evidenciar as características de determinada espécie desde o período de crescimento até a senescência e a variabilidade da vegetação em análises sazonais ou na escala de longos períodos (NIACHOU et al., 2001).

A relação do albedo com a cobertura vegetal depende muito do estágio fenológico, da morfologia foliar e do tipo de vegetação. No plantio e durante grande parte do crescimento os valores de albedo são altos devido à mistura entre planta e solo exposto e, portanto, depende das características do solo, como umidade e propriedades físicas. O mesmo caso pode ser observado em períodos secos, quando o metabolismo da planta diminui e influencia na regeneração da clorofila, emergindo outros pigmentos nas folhas (Ex.: carotenóides, responsáveis pela produção de compostos amarelo, laranja e vermelhos, que compõem uma pigmentação fotoprotetora contra danos oxidantes para a absorção da luz), assim como no final da floração, onde já não se encontram flores, mas somente espaços vazios que expõem o solo a radiação (COUTO e SILVA, 2010; NIACHOU, et al., 2001; TAIZ e ZEIGER, 2004).

Em síntese, vegetação de cores claras apresentam valores de albedo mais elevados, ao contrário, aquelas mais escuras possuem valores baixos para este coeficiente. Em telhados verdes tal coeficiente interfere ainda na temperatura do ambiente interno da edificação (COUTO e SILVA, 2010; ZHAO et al., 2013).

Além disso, no que se refere à influência da planta no balanço de energia, em um solo coberto, a vegetação absorve uma grande quantidade de radiação, impedindo a incidência direta na superfície. Entre a vegetação e o solo, parte da energia é consumida na evapotranspiração de ambos, o que afeta significativamente o balanço energético (GALVÃO, 2000). Cabe ressaltar, ainda, que depois da água, o fator mais importante para a sobrevivência dos vegetais é a temperatura, seguida da radiação solar e do vento. As oscilações de temperatura afetam a atividade enzimática, que por sua vez afeta todos os demais fatores. Seus efeitos variam com a idade, conteúdo hídrico, estado nutricional, histórico de temperaturas precedentes e níveis de energia solar incidente (GONÇALVES, 2015).

Com relação ao suprimento de disponibilidade hídrica, à medida que absorvem água do solo, os vegetais perdem parte dela pelo processo fisiológico da transpiração, além disso, ocorre simultaneamente a redução da reserva hídrica presente no solo, que sofre evaporação direta sob a ação da radiação (BEATRICE, 2011).

A capacidade da planta de limitar a perda de água transpirada e a quantidade de dióxido de carbono assimilado pela fotossíntese é conhecida como eficiência no uso da água, que varia de acordo com o metabolismo da planta, o qual recebe denominação conforme a via de assimilação do CO₂. Um exemplo dos diferentes tipos de metabolismo é o chamado MAC (metabolismo ácido das crassuláceas) (TAIZ e ZEIGER, 2004).

Plantas com metabolismo MAC, nas quais também estão incluídas plantas da família *Crassulaceae*, apresentam perda de cerca de 60 a 100 gramas de água por grama de CO₂ obtido, com eficiência no uso da água superior àquela apresentada por plantas de outro tipo de metabolismo, em condições de pouca disponibilidade hídrica e em função da fixação de CO₂ durante a noite (BEATRICE, 2011). As principais variedades da família *Crassulaceae* são *Sedum*, *Sempervivum* e *Saxifraga*, todas as quais pertencem às espécies suculentas. Essas plantas estão aptas para armazenar muita água nas folhas, são resistentes ao stress e se recuperam facilmente dos períodos de seca (HENEINE, 2008).

As plantas do gênero *Sedum* spp. abrem seus estômatos para trocas gasosas durante a noite, quando a temperatura do ar é amena, mantendo-os fechados durante o dia, contrariamente ao que ocorre com a maioria de outras plantas terrestres. Plantas desse grupo captam CO₂ atmosférico e o acumulam em uma câmara celular chamada de vacúolo na forma de malato, que é degradado e utilizado na fotossíntese durante o dia em presença de luz solar, limitando dessa forma a perda de água por transpiração (BEATRICE, 2011; HENEINE, 2008).

No hemisfério Norte, a recomendação do uso de plantas suculentas do gênero *Sedum* spp., para utilização em TVEs, se tornou ideal devido ao seu metabolismo fotossintético e à capacidade de armazenar água em seus tecidos (BEATRICE, 2011).

Alguns mecanismos singulares favorecem a sobrevivência de plantas do gênero *Sedum* (Figura 5) como a capacidade de armazenar certas quantidades de água em folhas e brotos, podendo, em caso de extremo estresse hídrico, realocar esta água para tecidos deficientes ou permanecer em dormência. Além disso, plantas desse gênero possuem plasticidade fenotípica, que permitem uma alteração na sua fisiologia ou morfologia, para melhor adaptar-se às diferentes condições do ambiente a que forem expostas (TAIZ e ZEIGER, 2004). Neste contexto, Gianoli (2004) e Grace (1997) mencionam a redução da área foliar causada pela falta de disponibilidade de água no solo que por consequência diminui a perda de água pela transpiração.

Figura 5 - Ilustração de exemplares do gênero *Sedum* (espécie *Sedum rupestre*).



Fonte: Acervo próprio.

3.1.4 Benefícios térmicos dos telhados verdes

Hoje em dia, com a necessidade de recuperar e proteger o meio ambiente, muitas afirmações se tornam tendenciosas ao favorecer as construções ecológicas. Entretanto, já existem vários estudos que comprovam diversas vantagens da cobertura verde em relação às coberturas tradicionais (SILVA, 2011; VECCHIA, 2005; VILELA, 2011).

Além dos benefícios já mencionados no início deste trabalho, Minke (2004) cita também o aumento da vida útil da cobertura devido à sua proteção contra fatores desgastantes (insolação e intempéries), diminuição dos níveis de ruídos externos no interior da edificação,

proteção contra incêndio, devido ao retardamento do alastramento das chamas e ainda isolamento térmico da edificação. Diante deste último aspecto, pode-se aferir que edificações equipadas com TV apresentam melhor eficiência energética, pois com o isolamento da transferência de calor para o interior da edificação os gastos com energia e condicionamento do ar são minimizados (ECOCASA, 2015).

Pesquisas bioclimáticas evidenciam uma diminuição de até 50% do calor transferido via telhado para o interior das edificações (SILVA, 2011; VECCHIA, 2005; MARY et al., 2008).

Corroborando, Spangenberg (2004) concluiu que após a instalação de um TV em uma laje, a temperatura da superfície interna reduziu cerca de 15°C, influenciando assim no conforto térmico dos ambientes. Ainda, segundo o autor, em sua pesquisa conveniada à Universidade de São Paulo, o custo-benefício da instalação de um TV compensa, tendo em vista a economia energética.

A redução da temperatura interna nas edificações deve-se às camadas de substrato e vegetação atuarem como uma manta isolante (FERREIRA, 2008). A cobertura vegetal, utiliza parte da radiação solar incidente no processo de fotossíntese, filtra uma outra parte e reflete o restante desta radiação, o que acaba favorecendo a diminuição da temperatura na superfície das construções (ALVAREZ, 2004; ALVAREZ et al., 2010).

De acordo com Espínola (2010), o resfriamento realizado pela vegetação, em uma edificação, pode ser de duas formas:

- Direto: Pelo sombreamento redutor da conversão de energia radiante em calor sensível, que diminui a temperatura de superfície da área sombreada; e
- Indireto: Pela evapotranspiração das folhas que resfriam sua superfície e o ar adjacente, devido à troca de calor.

Segundo Ferraz (2012) a falta de vegetação e o excesso de água que não é absorvido por áreas impermeáveis, combinados com a capacidade de alguns materiais em absorver calor, resultam em edificações com temperaturas internas mais altas que as normais de conforto. Ademais, quando as temperaturas externas às edificações são mais altas que as temperaturas dos arredores das cidades, ocorre um efeito conhecido como ilha de calor urbana.

Esta ilha de calor, ou clima urbano, é caracterizada pelo aumento da temperatura, tanto superficial quanto do ar, em relação ao ambiente rural circundante. O acréscimo no gradiente de temperatura deve-se às condições particulares do meio urbano, seja por sua rugosidade,

ocupação do solo, orientação, permeabilidade e propriedades físicas dos materiais constituintes, entre outros fatores (OKE, 1987).

Em contrapartida, áreas vegetadas podem minimizar os impactos dos problemas decorrentes da variação térmica das cidades (OLIVEIRA et al., 2006). Ferraz (2012) salienta que TVs têm como principal função a de aumentar os espaços verdes, com vista a melhorar o meio ambiente diminuindo as ilhas de calor.

Neste contexto, além dos benefícios à própria edificação e moradores, a utilização em larga escala de coberturas verdes poderia reduzir em 1°C ou 2°C a temperatura nas grandes cidades (SPANGENBERG, 2004). Alguns estudos demonstram também grande eficiência no combate aos gases de efeito estufa como agente capturador de CO₂, pois o clima também é afetado pela poluição do ar que acaba bloqueando a dissipação do calor (LI, BOU-ZEID e OPPENHEIMER, 2014; PEREIRA, 2013; PEREIRA et al, 2011; SILVA, 2011).

Ferraz (2012) menciona diversos estudos que comprovam a contribuição dos telhados verdes para o bom desempenho da edificação em condições de temperatura do ar elevadas, mas salienta que faltam informações quantitativas sobre o potencial de economia de energia para climatização de ambientes quando se usa coberturas verdes, principalmente em se tratando da sua aplicação em edificações de médio e pequeno porte.

3.2 ENERGIA TÉRMICA E TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Conforme Sena (2012), o termo energia pode ser descrito como uma propriedade da matéria, que pode transformar-se e ainda ser armazenada sob a forma de energia potencial gravitacional, cinética, elástica, térmica e elétrica, entre outras.

Pode-se dizer que a designação ‘energia térmica’ faz referência àquela manifestada sob a forma de calor. Neste contexto, tal fenômeno apresenta-se como radiação térmica ou energia interna (MARTINS, 2012; SENA, 2012; SENA et al., 2011).

A energia interna corresponde à capacidade de promover mudanças diversas, associada à agitação térmica de um material, que pode ser medida por sua temperatura. A radiação térmica, por sua vez, é uma forma de transmissão de calor ou energia térmica na forma de ondas eletromagnéticas, sendo que a energia associada pode ser determinada por sua integral no tempo (SENA, 2012; SENA et al., 2011). Por exemplo, na radiação solar tal energia não apresenta qualquer meio material de suporte, já que se trata de uma radiação eletromagnética com magnitude e distribuição espectral dada basicamente em função da temperatura do corpo emissor.

O mesmo autor afirma que a energia térmica (tanto na forma de energia interna ou radiação térmica), pode ser transportada de um local para outro por três processos principais: convecção, radiação e condução. Estes processos de transferência ocorrem exclusivamente devido à diferença de temperatura entre dois sistemas até que ambos atinjam o equilíbrio térmico.

A convecção é um processo de transporte de energia pela ação combinada da condução de calor, armazenamento e movimento de massa; é considerado o mais importante mecanismo de transferência de energia entre uma superfície sólida e um líquido ou gás (SEARS et al., 2008).

Neste processo, primeiro o calor fluirá da superfície para as partículas adjacentes do fluido, e depois essa energia transferida servirá para aumentar a temperatura e a energia interna destas partículas, as quais se moverão para uma região de menor temperatura no fluido, onde elas serão misturadas e uma parte de sua energia será transferida para outras partículas (MARTINS, 2012; PERALTA, 2006).

Assim, a transmissão de calor por convecção é classificada de acordo com o modo de movimento do fluxo, em "convecção natural" (ou livre) ou ainda "convecção forçada". A primeira forma ocorre quando o movimento do fluido se dá em função exclusiva do resultado das diferenças de densidade causadas pelos gradientes de temperatura, ou seja, quando o ar entra em contato com uma superfície aquecida, se expande e sobe, e também o inverso (ao entrar em contato com uma superfície mais fria, o ar perde calor, fica mais denso e desce).

Já a convecção forçada acontece quando o movimento do fluido se dá, não somente em função do resultado de diferenças de densidade, mas sim em razão do uso de algum mecanismo qualquer que sirva para ativar a circulação do fluido (MARTINS, 2012).

Com relação à radiação, Sears et al. (2008) afirmam que o termo é geralmente aplicado para todos aqueles fenômenos de ondas eletromagnéticas. No entanto, na transmissão de calor, são de interesse apenas os fenômenos que resultam da diferença de temperatura e podem transportar energia através de um meio ou do espaço. A transmissão de calor por radiação torna-se de importância crescente quando a temperatura de um corpo aumenta. Nos problemas de engenharia, no entanto, envolvendo temperaturas que se aproximam da temperatura atmosférica, o aquecimento radiante frequentemente pode ser desprezado.

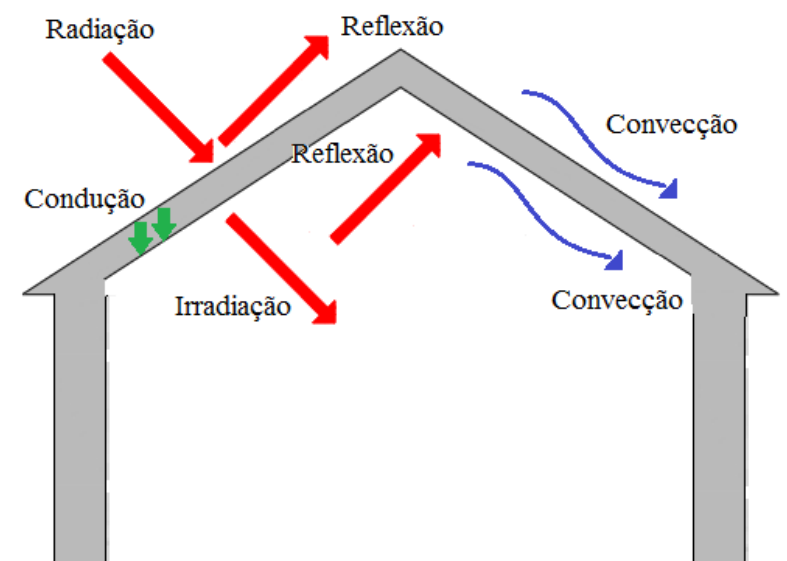
A radiação é o único processo de transferência que pode ocorrer no vácuo, porque nesse processo a energia é propagada por meio de ondas eletromagnéticas.

A condução é um processo pelo qual o calor flui de uma região de alta temperatura para outra de temperatura mais baixa, dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre

meios diferentes em contato físico direto (SILANS, MONTENY e LHOMME, 2002). As vibrações de um corpo sólido dependem de sua temperatura, de modo que se a amplitude das vibrações sofrer uma elevação devido ao aquecimento, o calor passa a ser transmitido para todo o corpo através de ressonância - movimento molecular dos mesmos, sem que se verifiquem deslocamentos materiais no corpo ou sistema considerado (COSTA, 2000).

Na cobertura de uma edificação, as trocas de calor entre o ambiente externo e interno ocorrem conforme ilustrado na Figura 6. Ao projetista da edificação, cabe reduzir estas trocas térmicas atuando sobre os elementos e componentes da vedação. Sua possibilidade de ação sobre as parcelas convectivas, em geral é limitada, pois esta depende fortemente da incidência dos ventos, restando como alternativa a atuação sobre as componentes condutiva e radiante (LOPES, 2007).

Figura 6 - Trocas de calor em uma cobertura.



Fonte: Adaptado de Lopes (2007).

Em coberturas vegetadas, devido à presença do substrato, o fenômeno da condução é, geralmente, o processo mais importante de transferência nos solos (SILANS, MONTENY e LHOMME, 2002). A condução é governada pelas propriedades térmicas do solo, que por sua vez são altamente dependentes da sua umidade. Por exemplo, quando se trata de solos úmidos, Martins (2012) afirma que a forma de transmissão de calor mais relevante passa a ser a convecção, que ocorre pelos fluidos em movimento (fluxo de massa). Assim, normalmente

no solo há uma combinação de processos de transferência de calor por condução e convecção e somente em alguns casos, a irradiação e convecção estão combinadas (SEARS et al., 2008).

De forma mais resumida, sobre uma superfície vegetal, a radiação solar incidente pode ser transferida na forma de energia entre os organismos e seu ambiente, e atuar de três formas (GONÇALVES, 2015):

i) pelo aumento da vibração das moléculas (consequentemente aumentando a temperatura), onde a transferência deste calor se dá através da convecção (mais rápida), condução (célula a célula, molécula a molécula) e radiação eletromagnética.

ii) pela evaporação da água onde há transferência de massa por meio dos estômatos e cutícula foliar. Esta transferência para a atmosfera é a responsável, também, pelo resfriamento (transferência de calor) da planta, que se dá principalmente através da convecção.

iii) reações fotoquímicas, como a fotossíntese (cerca de 1% da radiação incidente).

Portanto, o estímulo térmico é resultante direto da radiação solar, mas também depende de outros fatores, tais como a umidade relativa, velocidade do vento, etc.

Diante disso, estudos de transferência de energia entre a superfície e a atmosfera são importantes, não só para caracterizar o microclima local, como identificar interações existentes entre elas (OLIVEIRA et al., 2006).

Neste contexto, são utilizadas algumas técnicas micrometeorológicas para estimar as trocas de energia em uma superfície vegetada ou não. Entre elas destacam-se o balanço de energia e a Razão de Bowen, que estimam a partição de energia incidente e disponível, em diferentes fluxos de transferência (PEZZOPANE e PEDRO JÚNIOR, 2003).

3.3 BALANÇO DE ENERGIA EM TELHADOS VERDES

Os fenômenos biológicos, físicos e químicos que ocorrem na superfície terrestre estão diretamente relacionados com a quantidade de radiação solar incidente. Dessa forma, é importante compreender a partição dos componentes do balanço de radiação e energia sobre a superfície, e a interação entre eles envolvida (OLIVEIRA et al., 2006; PEREIRA, 2013; PEREIRA et al, 2011).

Estudos de balanço de energia entre a superfície e a atmosfera podem fornecer informações sobre a quantidade de umidade transferida para atmosfera e estimar quantitativamente os fluxos de calor sensível (H) e latente (E), que são decisivos na análise do ciclo hidrológico e no desenvolvimento da camada limite, que refere-se ao espaço

compreendido entre superfície terrestre e a altura até onde os fenômenos atmosféricos são influenciados pelo nível do solo (SENA, 2012; WILSON, HANSON e BALDOCCHI, 2002).

Tais estudos possibilitam o conhecimento das variações do tempo e do clima da região, auxiliam na identificação de efeitos de atividades antropogênicas como o desmatamento e queimadas, ou fatores naturais sobre diferentes questões ambientais (OLIVEIRA et al., 2006).

Como já citado, a energia necessária para que ocorram as interações entre a superfície e a atmosfera é oriunda do Sol, na forma de radiação de onda curta. Durante o dia a superfície recebe radiação solar, eleva sua temperatura e transfere parte dessa energia para a atmosfera na forma de calor. No entanto, durante a noite, a superfície tende a perder energia, ficando relativamente mais fria que a atmosfera, logo, a transferência de energia ocorre na direção oposta (SENA, 2012).

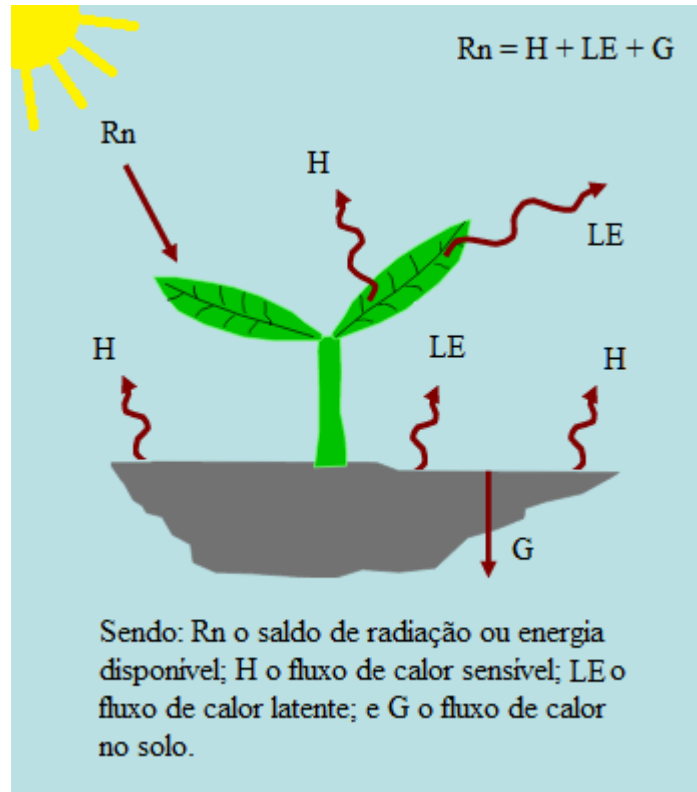
Como uma superfície não possui capacidade calorífica própria, a radiação líquida absorvida por ela deve ser totalmente dissipada (MARTINS, 2012). Essa dissipação se dá pelo aumento da temperatura da superfície, pelo aquecimento do ar ao seu redor e pelo processo de evaporação/evapotranspiração de tal superfície (BIUDES et al., 2009).

Segundo Heilman et al. (1989), o balanço de energia não necessita de informações sobre a velocidade do vento nem de propriedades aerodinâmicas da superfície do solo, visto que os fluxos são independentes da estabilidade do ar atmosférico, quando é considerada a igualdade entre os coeficientes de transferência turbulenta de calor latente e sensível. A maior exigência é que os gradientes de temperatura e umidade devem ser medidos dentro da camada limite interna da superfície, em contato com a atmosfera.

Arya (2001) e Martins (2012) afirmam que, considerando a superfície terrestre plana, com ou sem vegetação, o saldo de radiação (R_n) ou energia disponível nesse sistema pode ser representado matematicamente como a soma de três mecanismos fundamentais para que se dê o balanço de energia (Figura 7). Tais fluxos são os de calor do solo (G), que é a energia usada para elevar a temperatura do solo; calor sensível (H), responsável por aquecer o ar acima da superfície; e do calor latente (E), que trata da energia usada para a evaporação/evapotranspiração.

Conforme Silans, Monteny e Lhomme (2002), a previsão de fluxo de calor no solo (G) é difícil, devido a sua heterogeneidade e pelo mesmo possuir uma porosidade multifásica. Os mesmos autores, com base em trabalhos experimentais de balanço de energia com períodos de uma ou mais semanas, verificaram que o fluxo de calor no solo é muito pequeno, podendo ser desprezado na maior parte dos casos.

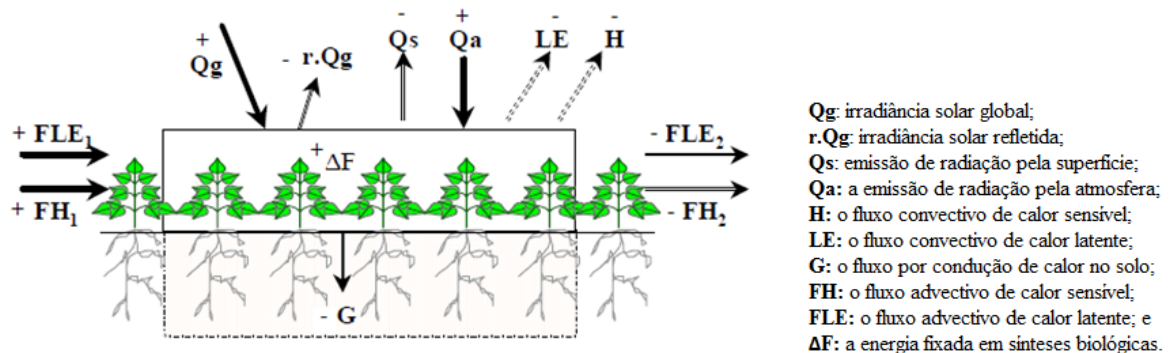
Figura 7 - Ilustração dos fluxos do balanço de energia.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para que se possa estudar um sistema sob qualquer ponto de vista, é necessário caracterizá-lo bem. Em um exemplo demonstrado por Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007), o sistema estudado é um volume de controle localizado numa área de altura z , comprimento x e largura y , contendo no seu interior ar atmosférico e uma população de plantas. A parte externa que interage com esse sistema é denominada de meio. Nestas condições, as principais trocas de energia entre o sistema e o meio e os armazenamentos decorrentes são caracterizados na Figura 8.

Figura 8 - Esquema do balanço de energia de um sistema vegetado, no período de um dia.



Equação do Balanço de Energia:

$$Qg - (r.Qg) + (Qs - Qa) + FLE1 + FH1 + \Delta F = LE + H + G + FLE2 + FH2$$

Fonte: Adaptado de Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007).

Sendo: **Qg** a irradiância solar global; **r.Qg** a irradiância solar refletida; **Qs** a emissão de radiação pela superfície; **Qa** a emissão de radiação pela atmosfera; **H** o fluxo convectivo de calor sensível; **LE** o fluxo convectivo de calor latente; **G** o fluxo por condução de calor no solo; **FH** o fluxo advectivo de calor sensível; **FLE** o fluxo advectivo de calor latente; e **ΔF** a energia fixada em sínteses biológicas (Fotossíntese). Fluxos advectivos referem-se às trocas laterais (no sentido horizontal predominante dos ventos). São adotados valores positivos para a energia que entra e negativos para a energia que sai do sistema.

Neste sentido, Foken (2008) afirma que os componentes do balanço de energia não são constantes ao longo da superfície do planeta, sendo diferente para cada ecossistema, devido às condições meteorológicas, de relevo, solo, e fenologia das plantas.

Entre os métodos existentes para a determinação do balanço de energia o mais citado é o de Bowen (1926). O pesquisador desenvolveu uma metodologia baseada no quociente entre os fluxos de calor sensível e latente, o qual combina as variáveis atmosféricas e a energia disponível na superfície evaporante.

Bowen (1926) foi o pioneiro nos estudos do balanço da energia sobre uma superfície natural, não antropizada, determinando a relação entre os fluxos de calor latente e sensível emitidos por uma superfície de água durante o processo de evaporação, em função dos gradientes da pressão do vapor e da temperatura observados. O resultado de tal procedimento foi denominado razão de Bowen.

Muitas pesquisas têm se concentrado na quantificação dos componentes do balanço de energia através da razão de Bowen, já considerada padrão para mensurar os fluxos de calor latente e sensível emitidos e recebidos por superfícies vegetadas, em função dos gradientes verticais de pressão do vapor d'água e da temperatura observados na camada de ar próxima à superfície do dossel vegetativo (BORGES et al., 2008).

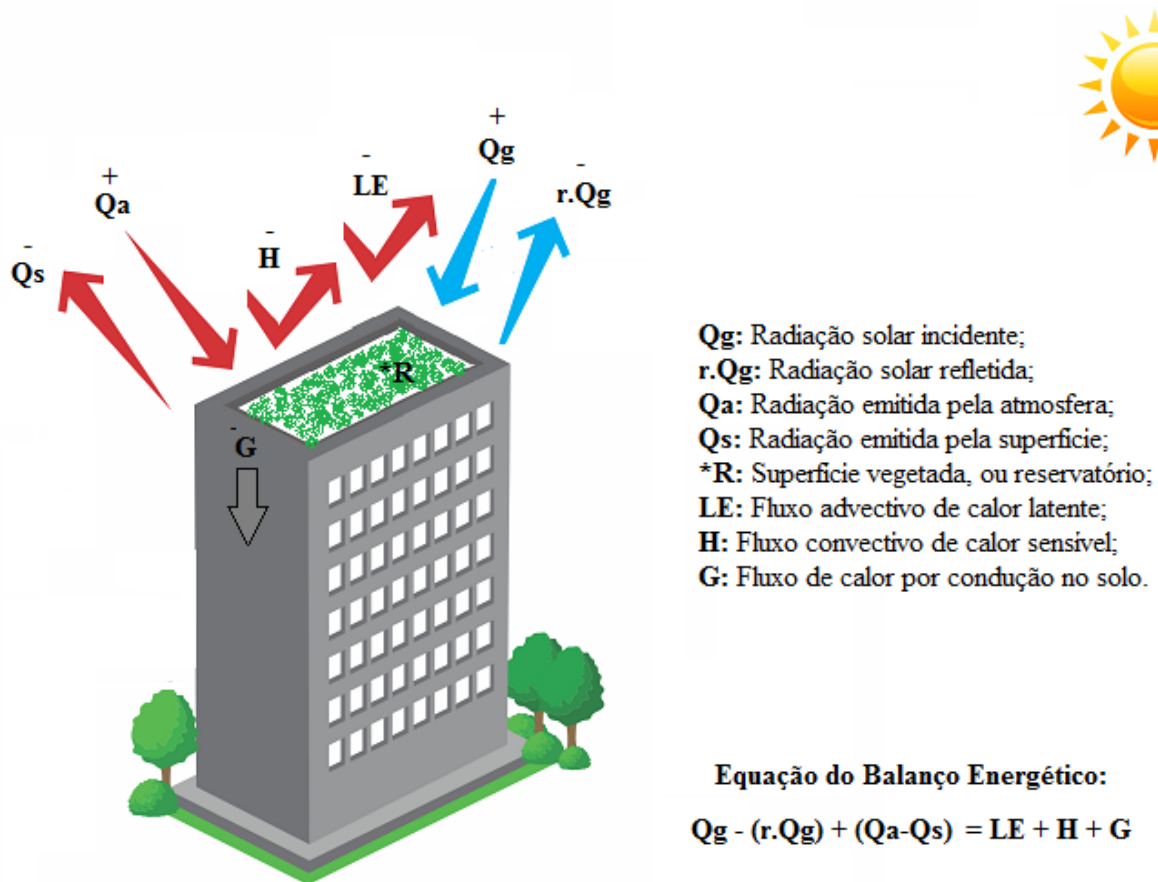
Especificamente, com relação ao balanço de energia em telhados verdes, não existem muitos estudos. O processo é semelhante aquele observado em superfícies vegetadas. Entretanto, devido ao fato de as plantas estarem dispostas em um local diferente do habitual, fatores como o comportamento térmico do substrato e a quantidade de energia da superfície externa do telhado para seu interior devem analisados com mais cuidado (FENG, MENG e ZHANG, 2010; LOPES, 2007).

Conforme Gaffin et al. (2011), em um telhado verde, a partir do topo das plantas até a parte inferior do meio de crescimento, existem sete grandes fluxos de energia e um reservatório, ilustrados da Figura 9.

Estes sete fluxos são: a radiação solar incidente de ondas curtas; o reflexo da radiação solar de ondas curtas; a radiação térmica emitida pela atmosfera (ondas longas); a radiação térmica emitida pela superfície do telhado verde (ondas longas); a perda de calor por convecção ou ganho de energia da atmosfera; a perda de calor por condução ou ganho da construção abaixo; e a evapotranspiração, sob a forma de vapor de água. Sendo o sistema de telhado verde, o chamado reservatório (GAFFIN et al., 2011).

Por convenção, os fluxos são considerados positivos para a energia que entra e negativos para a energia que sai do sistema (ARYA, 2001). No que se refere à radiação de ondas curtas, esta se trata daquela que incide diretamente, ou de forma difusa, no substrato e na vegetação utilizada no telhado verde. Ou ainda, aquela radiação refletida por estas superfícies (GAFFIN et al., 2011). Os autores afirmam que a radiação de ondas longas é aquela absorvida pela atmosfera, que chega na cobertura do telhado verde e aquela emitida pela superfície vegetal do mesmo. Sobre a perda de calor sensível, ou por convecção, esta é fortemente influenciada pelo vento, assim como a perda de calor latente é influenciada pela evapotranspiração. Com relação a perda de calor por condução, neste processo, a energia térmica é transferida da superfície do substrato para as camadas mais profundas, podendo ainda ser transmitida para o interior da edificação, dependendo das propriedades isolantes da cobertura.

Figura 9 - Esquema dos sete fluxos de energia considerados em um modelo de balanço energético.



Fonte: Adaptado de Gaffin et al. (2011).

Gaffin et al. (2011), em sua pesquisa, não incluem um parâmetro específico relacionado à energia usada pelas plantas na fotossíntese. Em geral, a literatura recomenda a inclusão desta variável, no entanto, tal parâmetro representa apenas 1 ou 2% da radiação líquida podendo assim ser desconsiderado (PEZZOPANE e PEDRO JÚNIOR, 2003; SILANS; MONTENY e LHOMME, 2002; SILVA e ANDRADE, 2013). No entanto, conforme Pilau (2005) e Pilau; Angelocci e Scarpore Filho (2007), a energia utilizada na fotossíntese trata-se de um parâmetro que não é descartado verdadeiramente, e sim incluído na variável que trata da absorção de energia pela superfície como um todo.

Neste contexto, algumas técnicas de monitoramento micrometeorológicas vêm sendo usadas para estimar as trocas de energia em uma superfície vegetada. O método da razão de Bowen é bastante aplicado, como discutido anteriormente, e pode ser utilizado com as medições de campo de saldo de radiação, fluxo de calor no solo, e gradientes de temperatura e

pressão de vapor d'água para a estimativa da partição da energia disponível em fluxos de calor latente e sensível (PEZZOPANE e PEDRO JÚNIOR, 2003).

Outras estimativas são igualmente possíveis, como o balanço específico para telhado verde extensivo proposto por Feng, Meng e Zhang (2010). Na pesquisa os autores consideraram o ganho de calor da radiação solar, o ganho de calor a partir de radiação de ondas longas, o calor transferido por convecção, a perda de calor por emissão, a perda de calor pela transpiração, o calor perdido por evaporação, o armazenamento de calor pelas plantas, o calor armazenado no solo, o calor transferido para o cômodo abaixo do telhado, a energia solar convertida por fotossíntese e a geração de calor por respiração.

Para tal fizeram uso dos seguintes dados: fluxo de calor no solo, temperatura da planta e solo, umidade (água) no solo, temperatura máxima e mínima, radiação solar global, velocidade do vento e ponto de orvalho. Os equipamentos foram instalados em um telhado verde construído em um prédio onde funciona o Laboratório de Energia da South China University of Technology, em Guangzhou – China, e o monitoramento foi realizado em um período de 11 dias (11 julho a 21 julho de 2009). O trabalho analisou o balanço energético de TVEs e apresentou um modelo simples e prático, onde apenas oito parâmetros são necessários para compreender e prever os fluxos de energia. A partir do experimento de campo o modelo foi validado, e os resultados mostraram que em 24h em um dia típico de verão a radiação solar foi responsável por 99,1% do ganho total de calor do TV enquanto a convecção compreendeu 0,9%. De todo o calor dissipado, 54,4% foi pela evaporação das plantas, 30,9% pela troca líquida radiativa de onda longa entre a superfície vegetal e a atmosfera, e 9,5% pela fotossíntese. Apenas 1,2% foi armazenada pelas plantas e pelo solo, ou transferidas para o ambiente abaixo do telhado.

Já Gaffin et al. (2006) elaboraram um modelo de balanço energético aplicado na comparação da eficiência de refrigeração entre telhados verdes e brancos. Para isso foi desenvolvido e instrumentado um experimento de campo em um telhado verde no centro da Pensilvânia. O experimento consistiu em seis edifícios separados, três com telhados verdes e três com telhados escuros para controle. Cada um dos telhados e edifícios foram monitorados quanto a temperatura, condições meteorológicas e retenção de água e drenagem. Os dados utilizados no estudo são referentes ao mês de julho do ano de 2003 e foram coletados a cada cinco minutos, mas para as análises foram utilizadas médias de hora em hora. Depois disso, o modelo de balanço de energia elaborado com base nos dados oriundos do monitoramento dos telhados verdes e controle, foi utilizado considerando as características de um telhado branco. Como resultados, os autores se detiveram principalmente ao albedo apresentado pelos

telhados verde e branco, concluindo que um telhado branco deve possuir um coeficiente de reflexão muito superior ao do telhado verde para oferecer condições semelhantes, no que se refere ao resfriamento do interior da estrutura. Os autores ainda afirmam que os TVs, por comparação, não resfriaram principalmente através do albedo, mas sim pela perda de calor latente.

De qualquer forma, independente do modelo de balanço de energia utilizado, a importância deste tipo de estudo é salientada em diversos trabalhos. Borges et al. (2008) afirma que o conhecimento dos componentes do balanço de energia sobre superfícies cultivadas, por exemplo, é de grande importância para a estimativa das perdas de água por evapotranspiração e caracterização do microclima local; e que além disso, pode contribuir para a utilização mais racional da água pelas culturas, cujas fases críticas de desenvolvimento são limitadas pelo fator hídrico.

Neste sentido, Pezzopane e Pedro Júnior (2003) concordam, ao dizer que é importante o conhecimento da partição da radiação solar nos processos de transferência de água de uma superfície para a atmosfera, de aquecimento e resfriamento do ar e solo, bem como para a realização do metabolismo das plantas. Pois, em uma superfície vegetada, o balanço de energia auxilia os estudos da variação do consumo de água durante o crescimento da cultura, o que influencia nos processos de formação da produção e acúmulo de açúcar.

FENG, MENG e ZHANG (2010) destacam a importância do balanço energético sobre telhados verdes para a caracterização do mesmo quanto à dissipação de calor e energia, tanto na a edificação quanto para o ambiente externo, interferindo assim no conforto térmico e no microclima local.

No entanto, mesmo comprovada a importância desse tipo de estudo, quando relacionados a telhados verdes o tema ainda não é muito abordado, principalmente no Brasil.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado em um TV experimental instalado no campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no município de Santa Maria, RS.

Para o cálculo do balanço de energia, foi necessária a obtenção de parâmetros como temperatura da planta e solo, temperatura do ar, radiação solar global, velocidade do vento, entre outros. Uma descrição detalhada do experimento e processo metodológico é apresentada a seguir.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL

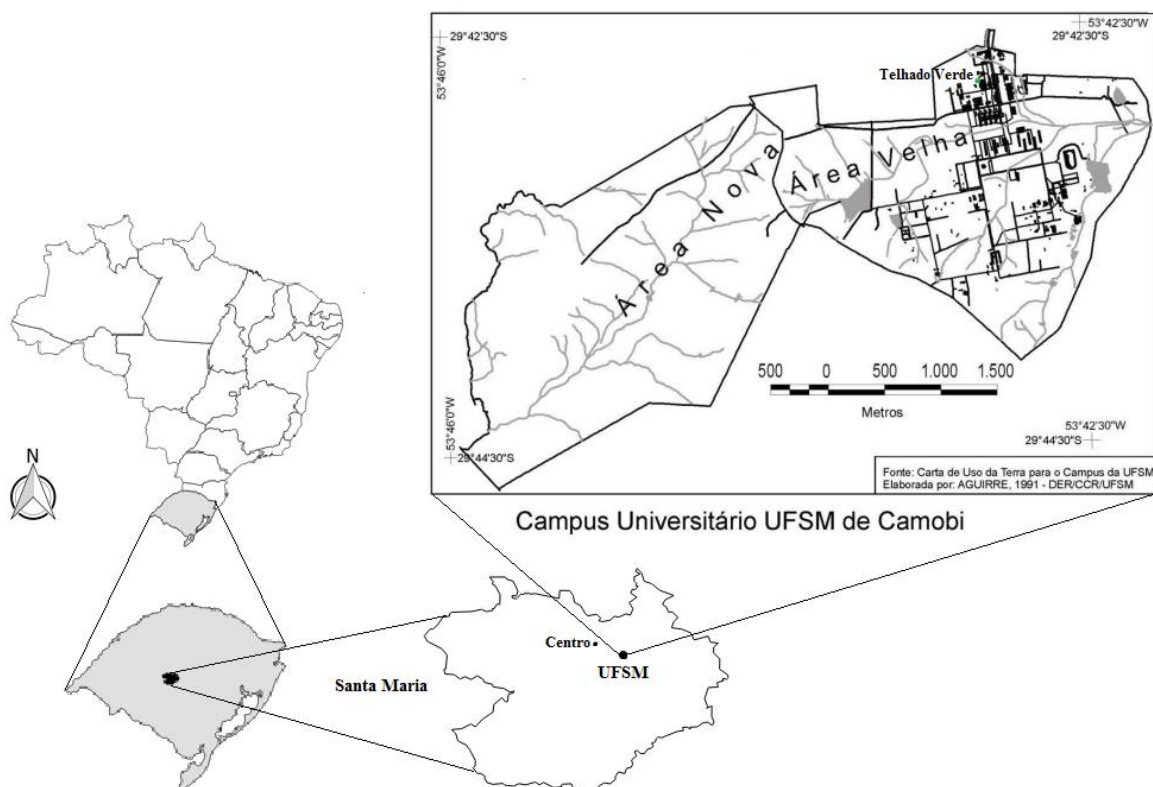
O TV, objeto desse estudo, está instalado na área pertencente ao Centro de Tecnologia (CT) do Campus da UFSM, localizado na cidade de Santa Maria – RS, mais precisamente no Bairro Camobi, a 29°44'16" de latitude Sul e 53°35'32" de longitude Oeste. A Figura 10 apresenta a localização da área de estudo no município de Santa Maria-RS, inserida no mapa do Estado do Rio Grande do Sul e do Brasil.

O município possui uma altitude média de 113 m em relação ao nível do mar, e apresenta características climáticas bem definidas com relação às quatro estações do ano. De acordo com o Mapa Hidrogeológico da folha de Santa Maria (CPRM, 1994), a precipitação média anual é de 1769 mm, e os meses de maio, junho e setembro são os mais chuvosos, enquanto novembro e dezembro são os mais secos. A umidade relativa média anual é de 72%, alcançando os valores mínimos no trimestre dezembro, janeiro e fevereiro (64%).

Segundo Sartori (1979; 2003), a cidade de Santa Maria está localizada em uma região de clima subtropical e possui temperaturas médias anuais aproximadamente de 22°C, sendo que as temperaturas médias e mínimas variam, no verão acima de 30°C e no inverno abaixo de 5°C, a ocorrência de geada entre junho e agosto é muito comum.

As direções predominantes dos ventos para a Região Central do Rio Grande do Sul, onde se encontra o município em questão, são as direções nordeste (NE) e sudeste (SE), e as maiores velocidades são registradas durante o inverno e a primavera (DALLA FAVERA, MARTINS e SCHUCH, 2010).

Figura 10 - Localização do telhado verde experimental em estudo, Santa Maria - RS.



Fonte: Adaptado de Valentini (2015).

A área do experimento encontra-se cercada, para evitar a entrada de pessoas não autorizadas e assegurar a integridade dos ensaios. Nos arredores do TV experimental se encontram edificações, uma área gramada, alguns exemplares de *Eucalyptus sp.*, outros experimentos, e ruas com um considerável fluxo de veículos e pessoas (Figura 11). Tais fatores devem ser levados em conta, pois podem influenciar de alguma forma nos resultados desta pesquisa, embora não ocorra um sombreamento excessivo sobre o TV, e que essas particularidades são observadas em um ambiente urbano, onde coberturas verdes seriam instaladas.

Figura 11 - Ilustração do entorno do telhado verde experimental.



Fonte: Acervo próprio.

4.2 DESCRIÇÃO DO TELHADO VERDE EXPERIMENTAL

O TV utilizado nesta pesquisa é do tipo extensivo e está instalado em uma estrutura na forma de casa em madeira, ilustrada na Figura 12-a. A cobertura da casa de madeira possui uma área total aproximada de 13,8 m², sendo que em apenas 6,74 m² está instalado o TV. O restante é constituído por um telhado convencional de fibrocimento (TC), que foi utilizado para uma análise comparativa da temperatura superficial e interna deste telhado com relação ao TV. Ambos os telhados possuem uma declividade de 1% a partir da divisão da estrutura.

A área do telhado verde é composta por uma cobertura vegetal homogênea (espécie *Sedum rupestre* - Figura 12-b), que foi implantada em módulos hexagonais dispostos sobre uma camada de impermeabilização constituída de uma lona plástica instalada para evitar infiltração de água pluvial na estrutura. Esse sistema modular hexagonal, utilizado na presente pesquisa, pode ser instalado em coberturas planas ou inclinadas e varia de material constituinte, tamanho e forma de acordo com o fornecedor.

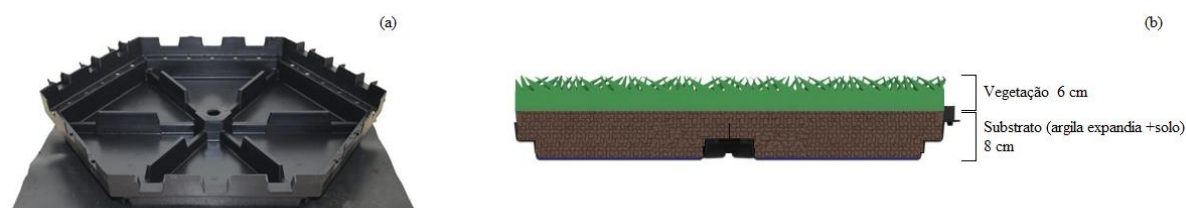
Figura 12 - Imagem demonstrativa do telhado verde experimental da UFSM (a) e respectiva cobertura vegetal (b).



Fonte: Acervo próprio.

Um exemplo deste tipo de módulo é observado na Figura 13-a. Cada módulo está preenchido com uma camada constituída por argila expandida e solo, de aproximadamente 8 cm de espessura, que abrigam a vegetação (6 cm de altura), como ilustra a Figura 13-b. Conforme laudo de análise do solo, este apresentou uma textura média, caracterizada por 51,5% de areia (grossa e fina) 21,5% de silte e 27% de argila, sendo classificado como um solo franco areno-argiloso.

Figura 13 - Ilustração de (a) um módulo hexagonal e (b) vista lateral do módulo preenchido a exemplo do experimento.

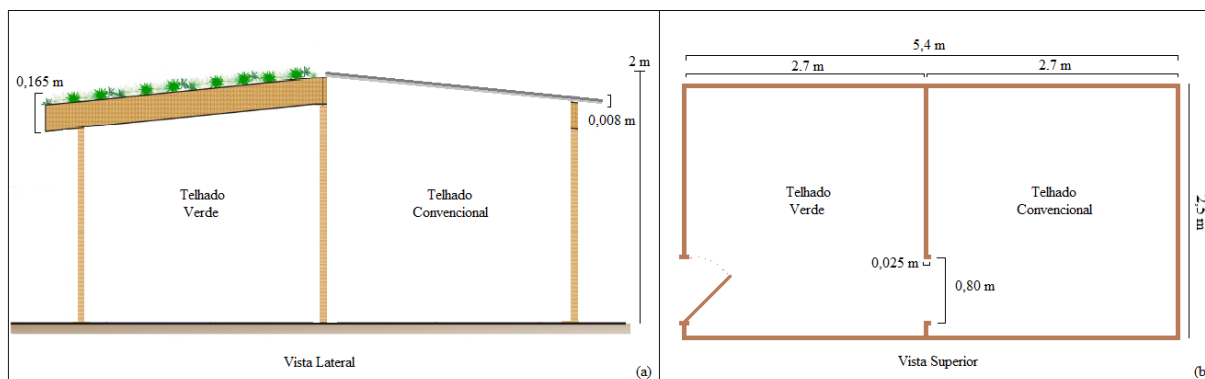


Fonte: Adaptado de Ecotelhado (2015).

O telhado convencional é revestido com telhas de fibrocimento de 8mm de espessura, e totaliza uma área de 2,48m de largura por 2,79m de comprimento. Esse TC é utilizado em outras pesquisas para captação e determinação do escoamento e qualidade da água resultante de precipitações (PESSOA, 2016), e foi utilizado neste estudo como “cobertura de

referência”. A Figura 14 mostra os detalhes estruturais do experimento, incluído os telhados verde e convencional.

Figura 14 – Detalhe esquemático das instalações dos telhados: (a) vista lateral, e (b) vista superior.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.3 MONITORAMENTO

O monitoramento foi realizado em duas etapas. A primeira etapa contou apenas com equipamentos manuais de monitoramento e dados na estação meteorológica da UFSM disponibilizados pela internet (agosto a dezembro de 2015); a segunda etapa foi iniciada quando instalada uma estação meteorológica (EM) no local de estudo (janeiro a maio de 2016).

Os equipamentos utilizados, a rotina de monitoramento, o sistema de medição, a aquisição de dados, bem como a metodologia aplicada no balanço de energia do TV estudado, estão descritos a seguir.

4.3.1 Equipamentos

Foram utilizadas as seguintes variáveis meteorológicas no estudo: i) temperatura da planta e solo; ii) temperatura superficial do telhado convencional; iii) temperatura interna (ambiente abaixo do TV e do TC); iv) temperatura do ar; v) umidade relativa do ar; vi) pressão atmosférica; vii) velocidade do vento; viii) radiação solar global incidente e ix) radiação solar refletida.

As variáveis de i) a iii) e a ix) foram monitoradas diretamente no experimento, sendo que a variável iii) também precisou ser estimada na segunda etapa do estudo, em determinados dias e horários. As variáveis vi) e vii) foram obtidas a partir de monitoramento realizado na Estação Meteorológica Automática pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (EMA-INMET), enquanto as variáveis iv), v) e viii) foram oriundas de monitoramento tanto no TV, quanto na EMA-INMET.

A EMA-INMET foi instalada em junho de 1968, junto ao Departamento de Fitotecnia, localizado na UFSM à latitude $29^{\circ}43'29,78''$ sul, longitude $53^{\circ}43'13,65''$ oeste e altitude de 89 metros (Figura 15), e está a 1,17 km de distância do TV experimental, aproximadamente. Os dados obtidos nesta estação são amplamente utilizados nas pesquisas dentro da própria Universidade e também fora dela, principalmente na área de agrometeorologia.

Figura 15 - Estação Meteorológica do INMET, em Santa Maria, RS.



Fonte: Acervo próprio.

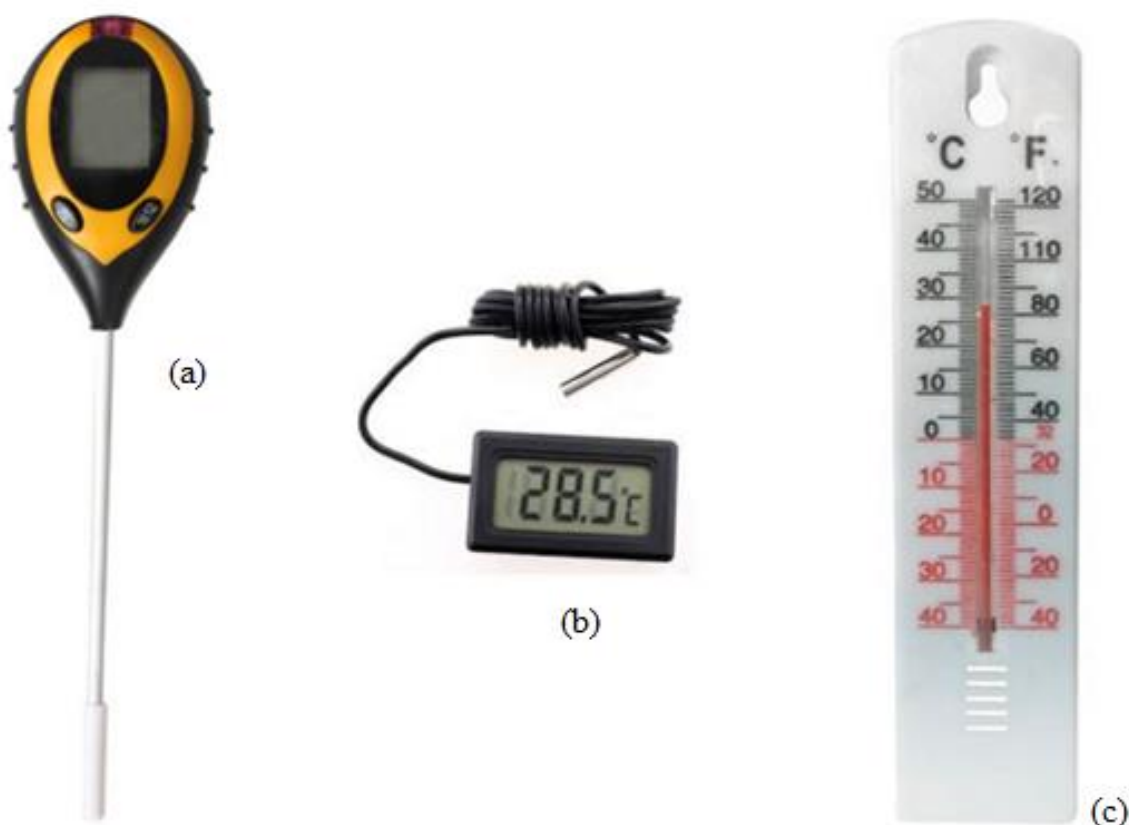
Optou-se pela utilização dos dados desta estação pela sua confiabilidade e facilidade de obtenção. Aliado ao fato da aquisição dos instrumentos necessários para a medição das variáveis de interesse ser bastante onerosa.

A estação do INMET, que faz parte da rede de observação climatológica mundial, está inserida nos padrões internacionais, contando desde 2002 com um observador automático, que

transmite dados por internet de dez em dez minutos, os quais são compilados e disponíveis em um intervalo de hora.

A variável temperatura do solo foi medida diretamente no experimento, utilizando-se o termômetro Tester. Para a medição da temperatura da planta, o equipamento utilizado foi o Termômetro Digital TPM-10. A temperatura do ar, do interior do ambiente abaixo dos telhados, e da superfície do TC, foram medidas utilizando-se um termômetro comum de parede. Os instrumentos utilizados podem ser observados na Figura 16.

Figura 16 - Equipamentos para medição de: (a) temperatura do solo, (b) temperatura da planta e (c) temperatura interna, do ar e da superfície do telhado convencional.



Fonte: Acervo próprio.

A escolha destes equipamentos foi motivada pelo baixo custo, e conseqüente facilidade de aquisição de um maior número de unidades, caso fosse necessário. Além disso, uma das propostas desta pesquisa é o monitoramento de baixo custo, e estes equipamentos

cumprem este requisito. As características gerais dos instrumentos estão apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Características gerais dos instrumentos utilizados no experimento.

Marca/Tipo	Instrumento Multifunção (4 em1) Tester	Termômetro Digital TPM-10	Termômetro de ambiente
Função no experimento	Medição da temperatura do solo	Medição da temperatura da planta	Medição da temperatura interna, do ar e superfície do TC
Variável Medida	T _{solo}	T _{planta}	T _{TV} ; T _{TC} ; T _{ar} ; T _{TC}
Descrição	Display de cristal líquido (LCD). Mede pH, temperatura e umidade do solo, e intensidade da luz ambiente	Modelo simples, painel LCD, resistente à umidade, forte anti-interferência	Termômetro de alta precisão e leve, medindo temperaturas em graus célsius (°C)
Dimensões	32,2x6,3x3,6 cm	4,7x2,8x1,4 cm	20 cm de altura
Faixa de medição	pH: 3,5~9,0 Temperatura: -9°C~50°C Umidade: muito seco a muito úmido (5 níveis) Luminosidade: muito escuro a muito claro (9 níveis)	-50° ~110°C	-50°C ~ 50°C
Resolução	0,5 pH 1° C/1°F	0,1°C	1°C
Alimentação	1 bateria de 9V	2 baterias 1.5V LR44	-
Temperatura de operação	-9°C~50°C	-10° ~50°C	-20°C ~ 50°C

Fonte: Adaptado do manual de instruções dos instrumentos.

Na segunda etapa da pesquisa, as variáveis temperatura do solo e da planta também foram obtidas a partir de uma EM, emprestada pelo Laboratório de Micrometeorologia da UFSM (LuMet-UFSM) e instalada no TV experimental (Figura 17). Esta EM ainda realizou medições de temperatura e umidade relativa do ar, e radiação solar global incidente e refletida pelo TV e TC.

Figura 17- Estação meteorológica instalada no telhado verde experimental.



Fonte: Acervo próprio.

Tal estação estava equipada com um piranômetro voltado para cima (Modelo CMB6 – Kipp & Zonen) para a medição da radiação solar global incidente, dois piranômetros voltados para baixo (CMP3 – Kipp & Zonen) para aferir a radiação refletida, do TV e do TC, um termohigrômetro (CS215 – Campbell Scientific, Inc.) para medição dos gradientes de temperatura e umidade do ar, um termômetro de solo (T108 - Campbell Scientific, Inc.), e dois radiômetros infravermelhos (SI-111 - Campbell Scientific, Inc.) para medir a temperatura superficial de ambos os telhados. As características gerais dos instrumentos estão apresentadas no Quadro 3.

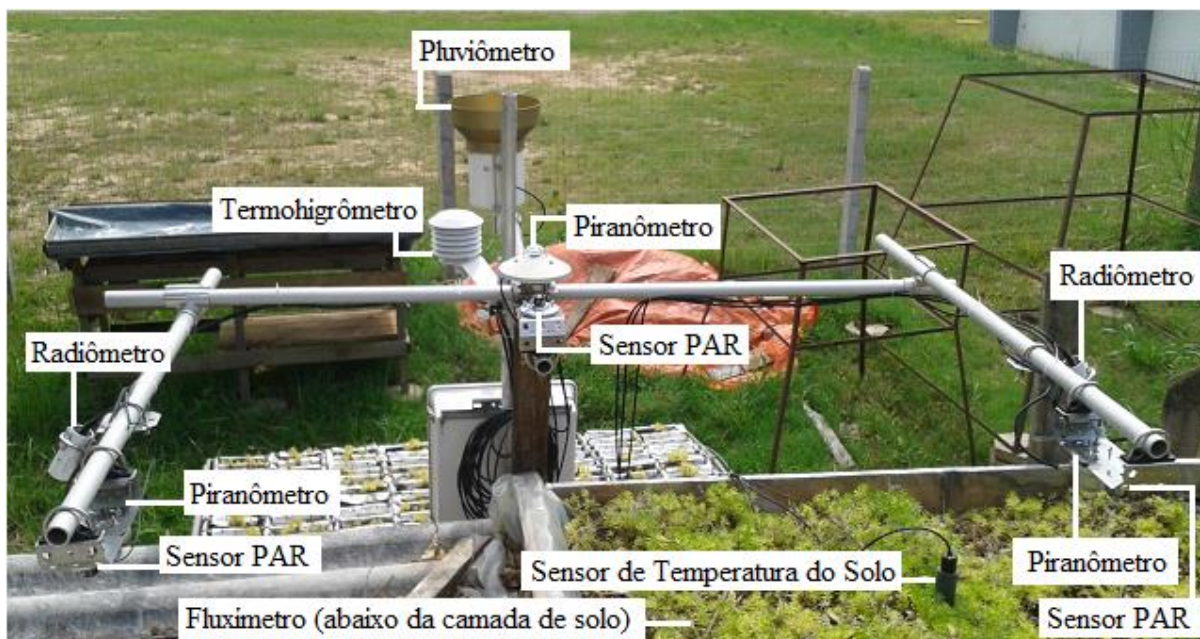
Quadro 3 - Características gerais dos instrumentos utilizados da estação meteorológica instalada no experimento.

Marca/Tipo	Piranômetros (CMB6 e CMP3) – Kipp & Zonen	Radiômetro (SI-111) – Campbell Scientific, Inc.	Termohigrômetro (CS-215) - Campbell Scientific, Inc.
Função no experimento	Medição da Radiação global incidente e refletida	Medição da temperatura superficial	Medição da temperatura e umidade relativa do ar
Variável medida	OC↓; OC↑	T _{TV} ; T _{TC}	UR; Tar
Faixa de Medição	310 a 2800 nm Irradiância máxima 2000W/m ²	-40 a 70 °C	-52 a 60°C 0 a 100% UR
Precisão	±2,5%	0,2 °C	±0,03% °C 0,1hPa
Resolução	0,01W/m ²	0,01 °C	0,1°C 0,1hPa
Temperatura de Operação	-40 a 80 °C	-55 a 80°C	-52 a 60°C 0 a 100% UR

Fonte: Adaptado do manual de instruções dos instrumentos.

Além disso, a estação contou também um pluviômetro (TE525MM – Texas Eletronics, Inc.)- que auxiliou na caracterização das condições ambientais do local de estudo, e um fluxímetro (HFP01SC – Hukseflux), para obtenção do fluxo de calor no solo do TV utilizado na aferição dos dados de condutividade na camada de solo. Na Figura 18 pode-se observar a localização dos sensores na EM instalada no experimento.

Figura 18 - Localização dos sensores na estação meteorológica instalada no telhado verde experimental.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.2 Rotina de monitoramento

Inicialmente, o monitoramento manual foi realizado por um período de cinco meses (Agosto a Dezembro de 2015). A intenção foi incluir no mínimo dez dias representativos de cada mês e estação climática, assim como compreender aqueles horários de intensa radiação solar.

Os sensores manuais eram instalados pela manhã, às 8 horas (horário da primeira leitura) e retirados no final da tarde, às 17 horas, quando era feito o último registro. Os registros destes dados se deram de forma manual, sendo que a coleta de dados era realizada com intervalo de uma hora, totalizando dez medições ao longo de um dia de monitoramento.

Especificamente nestes primeiros meses, no período noturno, não se realizou a coleta de dados em campo. Este fato se justifica pois, como mencionado, tais registros eram feitos de forma manual, e neste horário não existia pessoal disponível para a realização das leituras.

Em um segundo momento, quando se deu o empréstimo dos equipamentos do LuMet, foi possível um monitoramento de 24 horas por dia durante os cinco meses seguintes (Janeiro a Maio de 2016). No entanto, as leituras a campo registradas manualmente continuaram sendo realizadas, por no mínimo dez dias em cada mês analisado, em horários reduzidos (10h, 15h e

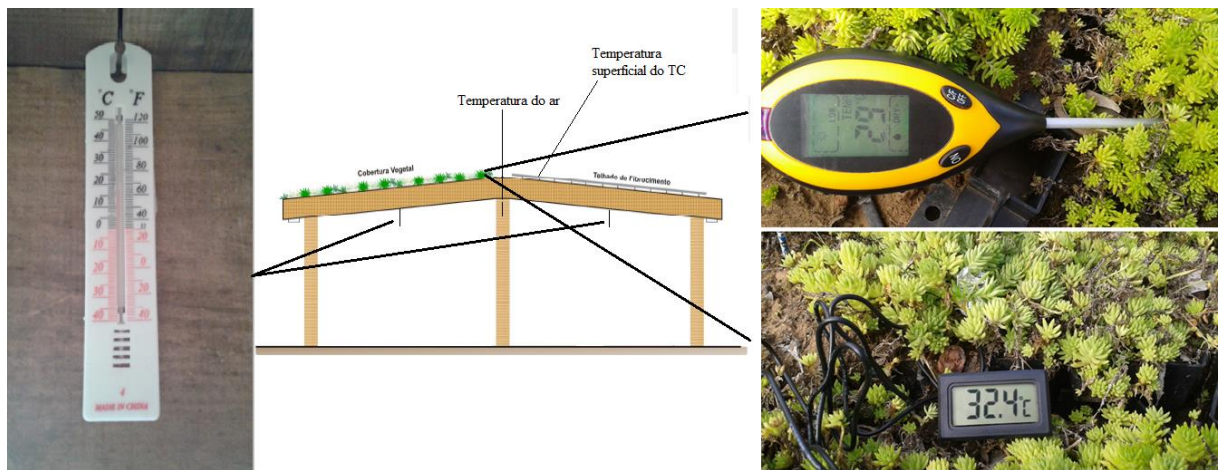
17h), para comparação dos valores medidos com equipamentos manuais e de alta resolução, e também para aferição dos dados que foram estimados.

4.3.3 Sistemas de medição e aquisição de dados

Para a presente pesquisa foi feito o download gratuito, a partir do site do INMET, dos dados da EMA da UFSM referentes à radiação global, pressão de vapor d'água na atmosfera, temperatura do ar e velocidade do vento, correspondentes aos dias e horários de medição em campo. Além destes, foram obtidos também dados de precipitação, para conhecimento e caracterização do microclima local.

Quanto à instalação dos equipamentos manuais, esta era realizada sempre no mesmo local, na lateral do telhado, e de forma que a sua disposição, e a posição do responsável pelo registro, não interferisse na medição das temperaturas. A localização é de fácil acesso, o que assegura a integridade física do operador e da cobertura (Figura 19).

Figura 19 - Esquema da vista lateral da estrutura do telhado e localização da instalação dos equipamentos.



Fonte: Adaptado de Persch (2012).

Para a medição da temperatura do solo, o sensor era inserido a uma profundidade de aproximadamente 6 cm da superfície. O sensor utilizado na medição da temperatura da planta era posicionado entre a vegetação, de forma que não ficasse exposto diretamente à radiação solar. Em ambos os casos, depois de ligados os termômetros, aguardava-se cerca de dois minutos para o registro das temperaturas. O objetivo de tal procedimento era a estabilização dos sensores.

Os termômetros para medição da temperatura dos ambientes internos era posicionado no centro da peça, com o intuito de não sofrer influência da sala ao lado, e tampouco do exterior, pois as laterais da estrutura não oferecem um bom isolamento. O termômetro que media a temperatura do ar era posicionado na lateral da estrutura, e o que media a temperatura superficial do telhado convencional era disposto sobre a telha de fibrocimento.

A EM foi instalada no experimento na manhã do dia 8 de janeiro de 2016, e seus equipamentos começaram a operar aproximadamente às 9h deste dia. O sistema de aquisição e registro de dados da estação utilizada é composto por um datalogger CR1000 da Campbell Scientific, Inc., e possui também um painel fotovoltaico e uma bateria para alimentação do equipamento. O sistema estava programado para efetuar o registro das medidas a cada um minuto, no entanto, para este estudo foram realizadas as médias para cada hora.

Os dados adquiridos nas duas estações meteorológicas, juntamente com os medidos manualmente, foram armazenados em planilhas eletrônicas, para facilitar o tratamento e a análise dos mesmos.

Outros dados, necessários para a realização desta pesquisa, tiveram que ser estimados, ou definidos de outras formas que não a medição direta. São eles: a temperatura interna, tanto do TV quanto do TC, na segunda etapa do monitoramento; e o coeficiente de reflexão (albedo) do TV.

Com a impossibilidade de realizar a leitura dos valores de temperatura interna do TV e do TC durante 24 horas por dia, foi então determinada uma equação para obtenção dos mesmos. Para isso, foi realizada uma análise de regressão múltipla, considerando as variáveis temperatura do ar e da superfície dos telhados, que estão diretamente relacionadas à temperatura interna da peça. A variável temperatura de superfície, para o TV foi obtida através da média dos valores de temperatura do solo e da planta. Já a da superfície do TC foi medida diretamente.

Para a validação dos valores calculados para as temperaturas internas, foram utilizados os dados obtidos pelas leituras manuais, realizadas em horário reduzido, conforme mencionado anteriormente. Dessa forma foi possível comparar os gradientes de temperatura interna, medidos e estimados, para tais episódios de averiguação. A fim de constatar a existência ou não de uma diferença significativa entre estes valores, e avaliar a aplicação das equações, foi utilizado o Teste t, com nível de significância de 0,05.

Com relação ao albedo, para estabelecer o valor deste coeficiente, foi realizada a divisão dos valores por minuto da radiação refletida do TV pelos valores da radiação global incidente, referentes ao período de janeiro a maio de 2016. Posteriormente, foram

determinadas as médias dos dados a cada hora, e após a análise de consistência, foram observados os valores apenas do período das 9h às 17h. Este intervalo foi considerado ideal, pois compreendeu os períodos de maior insolação durante os dias analisados.

A média diária dos valores de albedo para o intervalo definido foi utilizada para as outras horas do dia. Para o período em que a radiação refletida ainda não era monitorada, foi utilizado o albedo médio total.

4.4 ESTIMATIVA DO BALANÇO DE ENERGIA

A 1ª lei da termodinâmica diz que a variação de energia interna de um sistema é igual à diferença entre o calor trocado com o meio externo e o trabalho por ele realizado durante uma transformação. Com base nesta lei, no princípio da conservação de energia, e na razão de Bowen, foi adaptada e proposta, neste trabalho, a utilização da equação do balanço energético desenvolvida e aplicada por Gaffin et al. (2006) (Equação 1).

$$\begin{aligned} OC_{\downarrow} - OC_{\uparrow} + OL_{\downarrow} - OL_{\uparrow} - Q_{convecção} - Q_{condução} - Q_{latente} \\ = CT_{TV} \times \frac{dT_{TV}}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

Sendo: **OC** a radiação em ondas curtas; **OL** a radiação em ondas longas; **Qconvecção** o transporte de calor por convecção; **Qcondução** o transporte de calor por condução; e **Qlatente** o calor latente; **CT_T** a capacidade térmica do telhado verde; **dT_T** a diferença de temperatura da superfície do telhado verde; e **dt** a diferença de tempo. As designações ↓ e ↑ referem-se à entrada e saída de energia no sistema, respectivamente.

Para a aplicação da Equação 1, Gaffin et al. (2006) determinam que seus componentes devem ser calculados separadamente.

Referente ao primeiro componente do lado esquerdo da Equação 1, a radiação de ondas curtas que entra no sistema (OC_{\downarrow}), é produto da soma da radiação solar direta e da radiação solar difusa. Trata-se da parcela de energia solar que chega efetivamente até a superfície, pois o restante, ao interagir com a atmosfera e superfície, sofre processos de atenuação (absorção, difusão e reflexão).

Para esta variável, até dezembro de 2015 foi utilizado o valor disponibilizado pelo INMET, definido como radiação solar global, que trata da radiação total de ondas curtas incidente. Depois disso, a partir de janeiro de 2016 até o final do monitoramento, foram

utilizados os dados de radiação global incidente oriundos da estação meteorológica instalada no TV experimental.

O restante dos termos da Equação 1 são estimados conforme descrito a seguir, e dependem das condições climáticas, como temperatura do ar interna e externamente ao telhado, magnitude do vento e pressão de vapor d'água na atmosfera, assim como propriedades inerentes a composição do TV.

O Quadro 4 mostra as Equações 2 a 7, utilizadas para a obtenção dos demais termos do lado esquerdo da equação.

Quadro 4 - Equações adotadas para a resolução da Equação 1.

Variáveis (W/m ²)	Equações
OC _↑	$OC_{\uparrow}^1 = \alpha \times OC_{\downarrow}$ (2)
OL _↓	$OL_{\downarrow}^2 = (0,52 + 0,065 \times e^{1/2}) \times \sigma \times T_{ar}^4$ (3)
OL _↑	$OL_{\uparrow}^3 = \varepsilon_s \times \sigma \times T_{TV}^4$ (4)
Q _{convecção}	$Q_{convecção}^4 = \gamma_1 \times (T_{TV} - T_{ar})$ (5)
Q _{condução}	$Q_{condução}^5 = \kappa \times (T_{TV} - T_{iTV})$ (6)
Q _{latente}	$Q_{latente}^6 = Q_{convecção} / \beta$ (para telhados verdes) (7)

Fonte: Adaptado de Gaffin et al. (2006); Kreith e Bohn (1922) e Vilani et al. (2007).

Sendo: α o albedo; σ a constante de Stefan Boltzmann ($5,67.10^{-8} \text{ W/m}^2.\text{K}^4$); T_{ar} a temperatura do ar (ambiente externo), e a pressão de vapor d'água na atmosfera; ε_s a emissividade da superfície do telhado verde; T_{TV} a temperatura da superfície vegetal do telhado verde; u a velocidade do vento; γ_1 o coeficiente de convecção ($\text{W/m}^2.\text{K}$); κ a condutividade térmica da camada de cobertura ($\text{W/m}^2.\text{K}$); T_{iTV} a temperatura do ar interna (espaço abaixo do telhado verde); dz a espessura da cobertura telhado verde; e β a Razão de Bowen do fluxo de calor sensível (H) e latente (LE).

¹ Equação deduzida, amplamente utilizada, sem fonte definida;

² Equação proposta por Brunt em 1932;

³ Equação simplificada da proposta por J. Stefan em 1879 e deduzida teoricamente por L. Boltzmann em 1884;

⁴ Equação simplificada daquela originalmente proposta por Isaac Newton em 1701;

⁵ Equação simplificada da Lei de Condução de Fourier, proposta em 1822;

⁶ Adaptado da Razão de Bowen, proposta por Bowen em 1926.

Para a determinação da variável OC_{\uparrow} , a equação 2 foi utilizada apenas na primeira etapa da pesquisa, com um valor médio de albedo, determinado para o período de janeiro a maio de 2016. Para a segunda etapa foi utilizado o valor medido diretamente sobre o telhado verde, referente a radiação solar refletida por este.

Os termos devem estar expressos em unidades métricas, as temperaturas em K (Kelvin), a velocidade do vento em $m.s^{-1}$, radiação e fluxos de calor em $W.m^{-2}$ e pressão em milibares.

Por não possuir os equipamentos necessários para a definição do coeficiente de emissividade do TV (ϵ_s), foi utilizado o valor de 0,95 conforme determinado na literatura, para espécies do gênero *Sedum*, incluindo a *Sedum rupestre* que é utilizada nesta pesquisa (FENG, MENG e ZHANG, 2010; GAFFIN et al., 2006; SUN et al., 2013; ZHAO et al., 2013).

Para o coeficiente de convecção, frente à impossibilidade de obtenção para o caso específico do TV experimental, foi definido $\Upsilon_1=25 W/m^2.K$, sendo este o valor que melhor se ajustou aos dados e condições deste experimento. Tal valor foi estimado e testado em outros trabalhos semelhantes a este, através de um ajuste do modelo de balanço de energia proposto pelos autores (GAFFIN et al., 2006; BERDHAL e BRETZ, 1997). Na pesquisa de Gaffin et al. (2006), que tratava especificamente de telhados verdes, este foi construído sobre uma camada de asfalto de um telhado convencional, e era composto por uma barreira anti-raiz impermeável, uma camada de drenagem (geotêxtil), 9 cm de espessura de substrato (turfa, fibra de coco, perlite e sílica saturada) e ainda 2,5 cm de polipropileno expandido para o plantio da vegetação (espécie *Sedum spurium*). Neste sentido, os valores dos coeficientes de convecção foram considerados válidos pelo fato de a pesquisa de Gaffin et al. (2006) ser amplamente citada na literatura e ainda por apresentar uma espécie do mesmo gênero da utilizada no presente trabalho, condições climáticas como temperatura do ar e velocidade do vento semelhantes, assim como a temperatura superficial do telhado verde e valores de albedo.

Com referência à condutividade térmica da superfície do telhado (κ) no presente trabalho, foi considerada cada camada constituinte para a determinação de seu valor. Dessa forma o valor utilizado foi de 1,1 $W/m.K$ para espécies do gênero *Sedum* (LI, BOU-ZEID E OPPENHEIMER, 2014; SUN et al., 2013), 0,3 $W/m.K$ para solos do tipo areno-argiloso (DUARTE, 2004; GUIARD RESTIVO, 2016), e 0,15 $W/m.K$ para madeira leve (*Pinus*) (GUIARD RESTIVO, 2016). A partir desses valores foi determinada uma média ponderada,

considerando a espessura de cada camada, e assim determinado um valor único para κ , de 0,568 W/m.K.

A capacidade térmica do TV experimental (CT_{TV}) foi calculada utilizando-se a Equação 1, depois de determinadas suas variáveis. Depois de definido, esse fator foi comparado àqueles encontrados na literatura para TVs semelhantes.

Quanto à variável β (Razão de Bowen), utilizada para a determinação do fluxo de calor latente, esta é dada pela Equação 10, aplicada por Biudes et al. (2009), podendo ser reescrita na forma da Equação 11, que foi a utilizada nesta pesquisa.

$$\beta = H/LE \quad (10) \qquad \beta = \gamma \times \Delta T/\Delta e \quad (11)$$

Em que: **H** é o fluxo de calor sensível; **LE** é o fluxo de calor latente; ΔT é diferença de temperatura do ar entre dois níveis (°C); Δe é diferença de pressão de vapor d'água do ar entre dois níveis (kPa) – nos dois casos os níveis são a 2m e 2,5m de altura, desconsiderando a diferença de altitude; γ é a constante psicrométrica.

A constante psicrométrica γ (kPa °C⁻¹) é dada em função da pressão atmosférica **P** (kPa), e pode ser calculada pela Equação 12 (TOMAZ, 2008):

$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} \times P \quad (12)$$

A pressão de vapor d'água do ar saturado (**e_s**) em (kPa) para cada altura foi calculada como uma função da temperatura do ar (**T_{ar}**) em cada altura, conforme a Equação 13. Sendo a pressão de vapor d'água do ar atual (**e**) calculada a partir de **e_s** e da umidade relativa do ar (**UR**) (Equação 14) (BIUDES et al., 2009).

$$e_s = 0,6108 \times EXP^{\left(\frac{7,5 \times T_{ar}}{237,3 + T_{ar}}\right)} \quad (13)$$

$$e = e_s \times UR \quad (14)$$

4.5 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

Os dados oriundos do monitoramento foram trabalhados e analisados, de forma a permitir a determinação do balanço de energia do sistema de telhado verde experimental da UFSM. Para isso todos os parâmetros utilizados nos cálculos referentes a este balanço de energia foram incluídos em uma única tabela. Os valores contidos nessa tabela também foram transformados em gráficos, para melhor informação visual e entendimento das variações.

Sobre o caso específico da Razão de Bowen, a faixa de utilização indicada fica entre -0,7 a 1,5. Valores abaixo de -0,7 e acima de 1,5 m devem ser descartados (BIUDES et al., 2009; JARVIS; JAMES e LANDSBERG, 1976). Para preenchimento destes valores, devem ser realizadas regressões lineares simples entre os valores não descartados e do saldo de radiação, que é o resultado do balanço de radiação de ondas curtas e longas ($OC_{\downarrow} - OC_{\uparrow} + OL_{\downarrow} - OL_{\uparrow}$), obtidos três dias antes e três dias após a observação dos valores descartados.

Para verificar se houve concordância dos componentes do balanço de energia em relação à energia líquida disponível, foram utilizadas análises de correlação e regressão para estimar como as variáveis dependentes ($Q_{convecção}$, $Q_{condução}$, $Q_{latente}$), se relacionam com uma variável independente como o saldo de radiação. A regressão fornece as equações que mostram de que forma essas grandezas se relacionam, e define um coeficiente de determinação (R^2), sendo que quanto mais próximo o R^2 estiver de 1,0 melhor será considerado o ajuste (ARRUDA et al., 2006). Para testar a hipótese de que o coeficiente de correlação entre as variáveis envolvidas é igual a zero, contra a hipótese de que é diferente de zero, é indicado o teste t que foi utilizado nesta pesquisa com nível de significância de 0,05.

As temperaturas do ar, do solo, da superfície da planta e da superfície do telhado convencional foram comparadas a partir de janeiro de 2016, quando essas variáveis eram medidas por diferentes equipamentos em três horários diferentes (10h, 15h e 17h). Da mesma forma, as medidas das temperaturas internas de ambos os telhados foram comparadas àquelas estimadas, para os mesmos horários mencionados. Com o intuito de verificar a existência ou não de uma diferença significativa entre os valores comparados, também foi utilizado neste caso o Teste t, com nível de significância de 0,05.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram organizados de forma a apresentar inicialmente a caracterização meteorológica do local de estudo durante o período analisado, na sequência o comportamento térmico do TV estudado, e por fim uma análise do balanço de energia e seus componentes.

5.1 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA

Neste ítem são discutidos os dados destinados a caracterizar o microclima local. Tais valores, referentes à temperatura do ar, umidade relativa, precipitação acumulada e magnitude do vento, foram obtidos entre os meses de agosto de 2015 a maio de 2016, e analisados com base nos valores médios do dia, e de cada mês.

Para uma caracterização fidedigna, nos dias em que não houve a leitura direta das variáveis temperatura do ar, umidade relativa e precipitação acumulada, estas foram obtidas através do site do INMET, visto que testes estatísticos (Teste t) foram realizados, e mostraram que não existe uma diferença significativa - ao nível de significância de 0,05 - entre os valores medidos na estação do INMET/UFSM e aqueles aferidos diretamente no experimento.

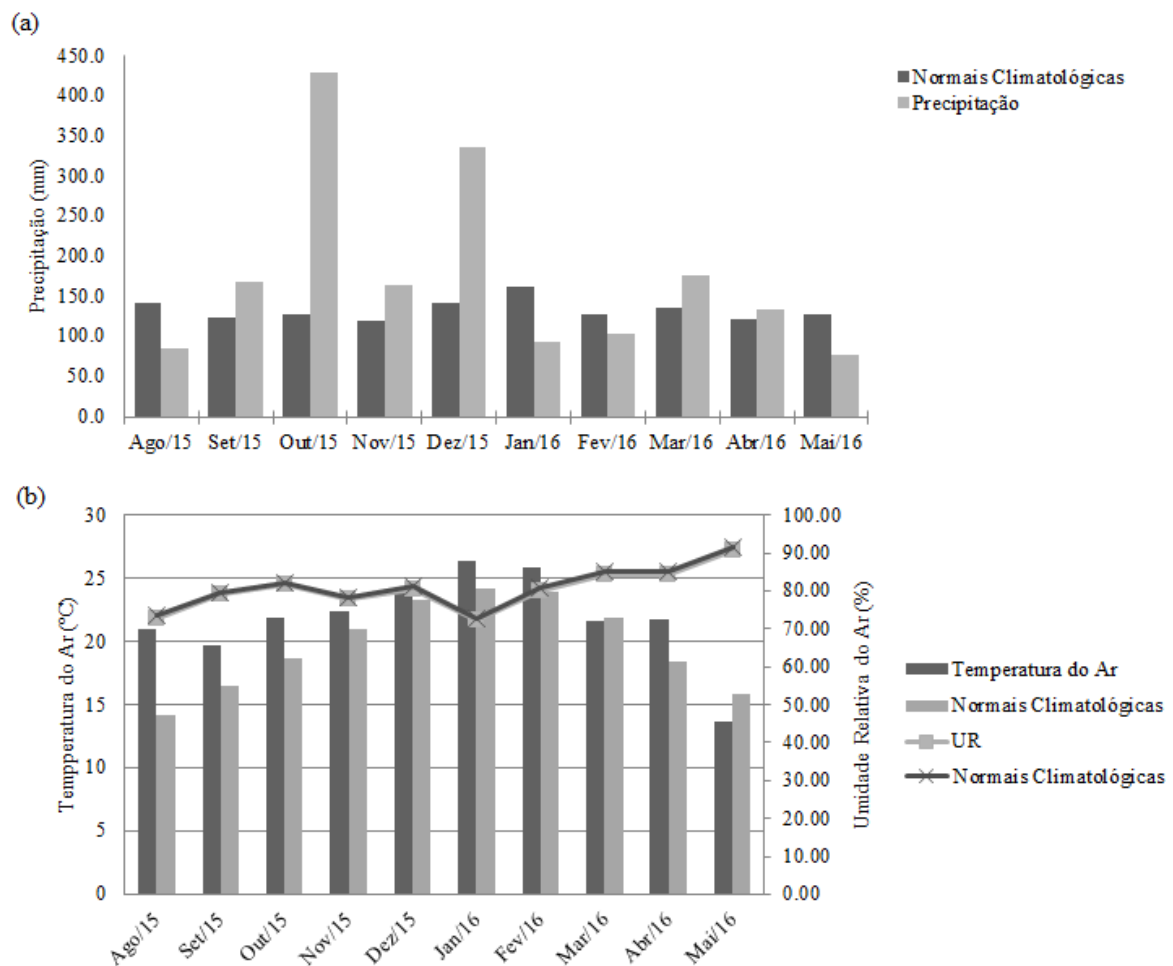
Os dados de precipitação foram obtidos para todo o período em estudo, com total acumulado de 1766,3 mm nos dez meses em questão. O mês de outubro de 2015 foi o mais chuvoso com precipitação acumulada de 428,4 mm, enquanto que os meses mais secos foram maio de 2016 e agosto de 2015, que apresentaram 77,8 mm e 85,2 mm de precipitação acumulada, respectivamente (Figura 20-a).

Segundo as normais climatológicas definidas para Santa Maria, o município apresenta uma precipitação bem distribuída ao longo de todo o ano, e a precipitação média normal varia de 121,4 mm a 163 mm, e a anual totaliza 1686,1 mm (BRASIL, 1992). No entanto, Sartori (1979; 2003) em seus estudos salientou que a distribuição espacial das chuvas em todo o Rio Grande do Sul é essencialmente frontal, dessa forma é resultante da circulação atmosférica regional que é determinado pelo avanço periódico das massas polares durante todo o ano. Neste contexto, e com a confirmação da presença do “El Niño” próximo da costa da América do Sul durante o período de monitoramento (2015-2016), a variação dos valores acumulados entre agosto de 2015 a maio de 2016 é justificada, pois esse fenômeno afeta os regimes de chuva (CPTEC/INPE, 2016).

A umidade relativa e a temperatura do ar médias mensais foram plotadas no mesmo gráfico (Figura 20-b) por estarem relacionadas. A umidade relativa do ar média mensal

apresentou uma variação de até 18,44% entre os meses analisados. A média do período foi de 71,98%, já a média mínima foi observada em janeiro de 2016 (72,09%), e a máxima em maio de 2016 (90,53%) Tais valores são semelhantes àqueles presentes na compilação dos valores médios climatológicos, para umidade relativa do ar, que trata da relação entre a quantidade de água existente no ar e a quantidade máxima que poderia haver na mesma temperatura (BRASIL, 1992).

Figura 20 -Médias mensais de: (a) Precipitação acumulada, (b) Temperatura e umidade relativa do ar para o local de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora.

A temperatura média ao longo dos meses analisados foi de 21,27°C, a média mínima foi observada no mês de maio de 2016 (13,64°C) e a média máxima em janeiro de 2016 (26,38°C). Os valores para temperatura média no período estudado foram diferentes daqueles

apresentados nas normais climatológicas em Brasil (1992), onde os mesmos são menores do que os observados neste trabalho. Notou-se também uma maior amplitude, quando comparadas as temperaturas máximas e mínimas. O período analisado apresentou geralmente temperaturas máximas maiores e temperaturas mínimas menores que as normais, com exceção apenas nos meses novembro e dezembro, conforme observado na Tabela 1.

No entanto, o comportamento da temperatura média está de acordo com Köppen (1931), que classifica o clima de Santa Maria como Subtropical Úmido com verões quentes – Cfa (onde C significa clima temperado chuvoso e quente; f nenhuma estação seca; a verão quente e mês mais quente com temperatura média maior do que 22°C e a do mês mais frio superior a 3°C). Além disso, de acordo com o CPTEC/INPE (2016) a presença do fenômeno “El Niño”, caracterizado por um aquecimento anormal das águas superficiais no oceano Pacífico Tropical e elevação das temperaturas e do índice pluviométrico, afetou diretamente o clima regional no período analisado, perdendo forças no segundo trimestre de 2016, mas ainda influenciando no clima até junho deste ano.

Tabela 1 - Comparativo dos valores de temperatura média, máxima e mínima, observados (Obs.) e definidos (Nor.) para os meses de estudo em Santa Maria, RS.

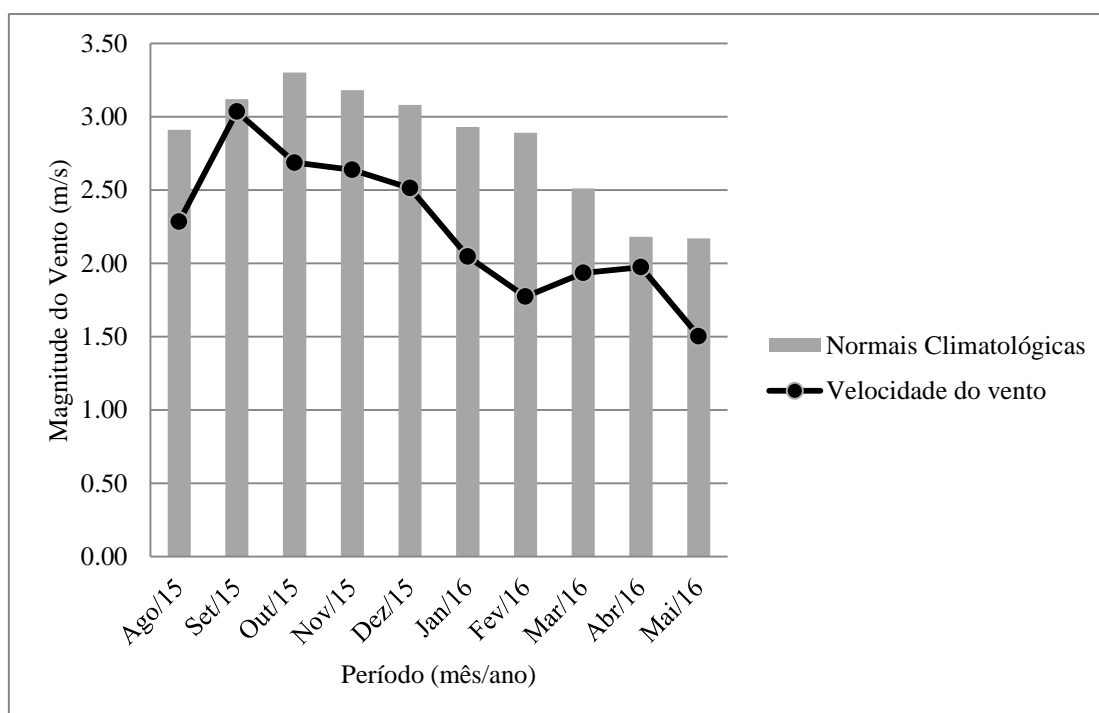
Santa Maria - RS		Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai
T Méd. (°C)	Obs.	20,9	17,8	19,2	21,2	24,2	26,4	25,9	21,7	21,7	13,6
	Nor.	14,2	16,5	18,6	21,0	23,3	24,2	23,9	21,9	18,4	15,9
T Máx. (°C)	Obs.	29,6	26,4	25,6	25,6	28,0	39,2	36,1	36,4	36,6	23,8
	Nor.	20,3	22,5	24,8	27,3	29,5	30,4	30,0	28,2	25,0	22,1
T Min. (°C)	Obs.	12,3	9,4	13,0	16,6	19,2	17,7	17,6	14,1	5,0	3,6
	Nor.	10,4	11,3	13,5	15,9	18,3	19,1	19,5	17,9	14,5	11,8

Fonte: Adaptado de Brasil (1992).

Com relação à magnitude do vento, observada na Figura 21, a média encontrada para o período foi de 2,24 m/s, pouco abaixo da normal (2,82 m/s) definida em Brasil (1992). A média máxima foi de 3.0 m/s observada no mês de setembro de 2015, e a mínima em maio de 2016 com 1,5 m/s. De acordo com o observado, e confirmado em Brasil (1992), o fator vento/intensidade é bem distribuído ao longo do ano, confirmando a evidente presença dos ventos no município, apresentando regularidade por ser o vento Norte o portador das maiores intensidades médias.

O vento norte é definido como um vento da direção norte que sopra com grande velocidade, em geral 20m/s, por 2 ou 3 dias, sendo extremamente seco, provocando assim ascensões de temperatura (MACHADO, 1950). No município de Santa Maria o vento norte adquire maior intensidade, motivado pela posição da cidade na base do Planalto, conforme aponta Sartori (1979; 2003).

Figura 21 - Médias mensais de magnitude do vento para Santa Maria, RS, observadas no período estudado e as normais climatológicas definidas em BRASIL (1991).



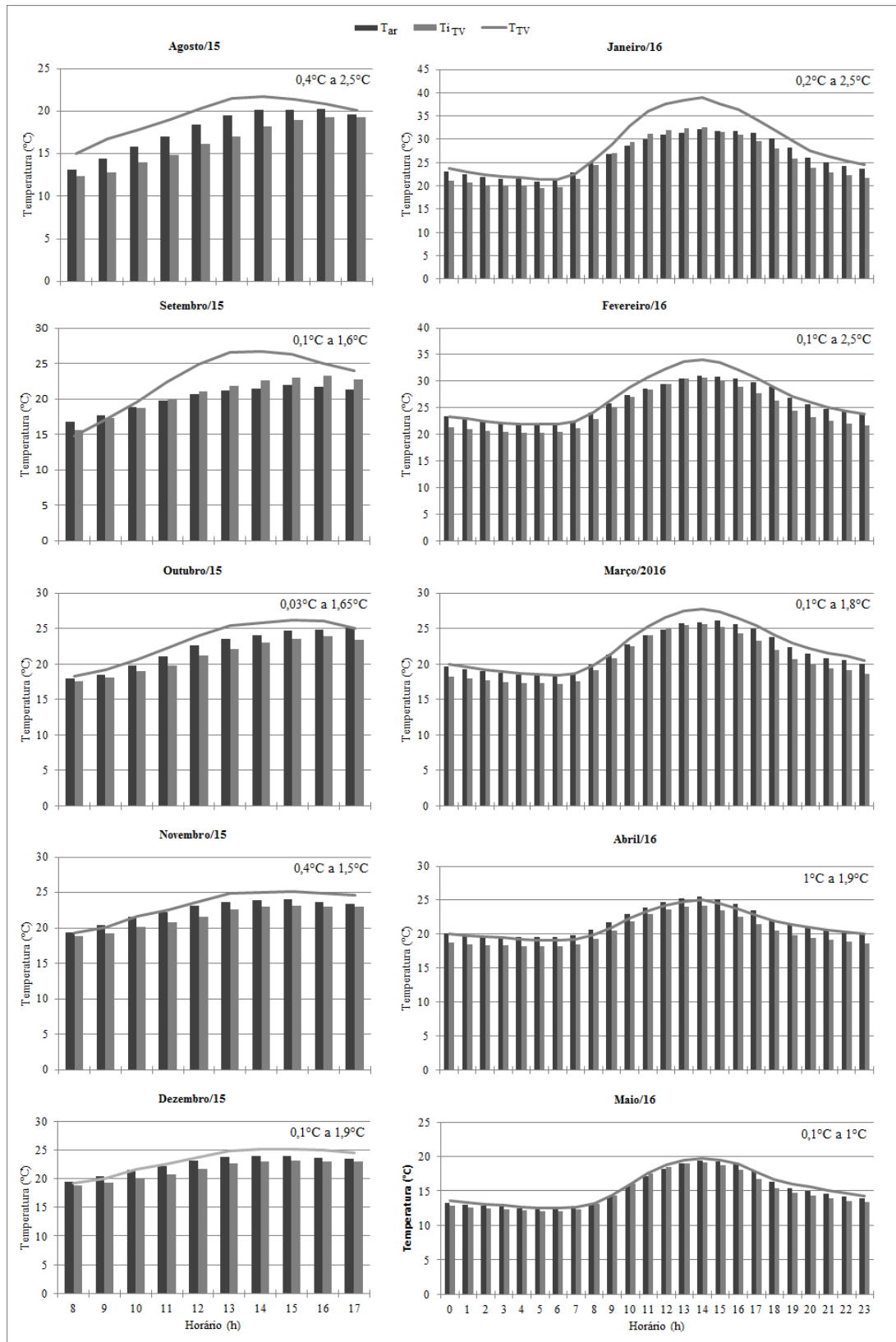
Fonte: Elaborado pela autora.

5.2 COMPORTAMENTO TÉRMICO DO TELHADO VERDE

Este item refere-se à análise do comportamento térmico do TV experimental, em função da relação entre a temperatura interna e externa à edificação e a temperatura superficial externa do telhado no que diz respeito à variação ao longo do tempo.

Conforme detalhado na metodologia deste trabalho, os valores foram obtidos nos primeiros cinco meses de monitoramento (agosto a dezembro de 2015) a cada hora em apenas dez horas por dia. No restante do período (janeiro a maio de 2016) a leitura foi realizada a cada minuto do dia, sendo que os dados utilizados referem-se à média de cada intervalo de hora.

Figura 22 – Média horária da temperatura interna do telhado verde, externa (ou do ar) e a temperatura superficial do telhado verde registradas no período estudado, e a diferença entre T_{AR} e T_{iTV} .



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 2 – Comparativo entre as temperaturas médias, máximas e mínimas, do ar e do telhado verde (interna e superficial).

Mês	Temperatura Externa			TELHADO VERDE					
	(°C)			T. Interna			T. Superficial		
	Méd.	Mín.	Máx.	Méd.	Mín.	Máx.	Méd.	Mín.	Máx.
Ago/15*	20,91	12,30	29,60	16,28	9,00	27,30	19,44	10,00	30,55
Set/15*	19,74	9,40	26,40	20,61	11,00	30,00	22,74	10,20	37,55
Out/15*	21,97	13	25,60	21,14	12,90	30,80	23,26	13,55	36,15
Nov/15*	22,41	16,60	25,60	21,52	15,00	30,50	23,17	14,40	38,45
Dez/15*	24,16	19,20	28,00	23,99	18,00	30,00	26,21	19,90	36,40
Jan/16	26,37	17,67	39,19	25,34	16,10	39,63	28,78	17,73	50,18
Fev/16	25,89	17,56	36,16	24,45	16,31	35,54	26,72	17,71	41,41
Mar/16	21,68	14,14	36,45	20,65	13,11	35,98	22,30	13,86	39,82
Abr/16	21,73	5,02	36,63	20,31	5,40	33,25	21,36	4,99	33,69
Mai/16	15,34	3,60	23,80	14,80	4,81	22,50	15,45	4,63	22,61

* não foram considerados todos os dias de cada mês e o monitoramento foi realizado apenas das 8h às 17h.

Fonte: Elaborada pela autora.

A temperatura externa em todo o período apresentou máxima de 32,18°C, em janeiro e mínima de 12,28°C, em maio. As máximas foram observadas geralmente entre as 14h e 17h, e as mínimas entre 4h e 6h, e no primeiro período de monitoramento às 8h.

Esse comportamento é o esperado, de acordo com Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007) que afirmam que o padrão típico de variação diária da temperatura do ar ocorre da seguinte forma: a temperatura máxima ocorre com uma defasagem de duas a três horas em relação ao horário de maior irradiância solar (12h), enquanto que a temperatura mínima ocorre um pouco antes do nascer do sol, em função do resfriamento noturno. Segundo os autores, e conforme observado na presente pesquisa, esse padrão pode ser alterado em função das condições macroclimáticas vigentes, como por exemplo a entrada de uma frente fria, ocorrência de chuvas, nebulosidade intensa, ventos fortes e contínuos, e ainda conforme a exposição e configuração do terreno, cobertura do solo, etc.

Conforme Silva (2006), a temperatura está associada também a insolação e consequente duração do dia. Dessa forma, espera-se que em dias mais curtos, típicos do outono/inverno, a temperatura não se eleve como nos dias mais longos do verão.

A temperatura interna do TV experimental apresentou uma média de 21°C para todo o tempo de estudo. Os horários de máximas e mínimas assemelham-se aos da temperatura externa. A temperatura interna máxima foi observada às 14h do dia 24 de janeiro de 2016, chegando a 39,63°C. A média máxima foi de 32,65°C no mês de janeiro, no intervalo das 14h. A mínima interna do período (4,81°C) foi observada às 6h do dia 1º de maio de 2016, e média mínima (12,09°C) notou-se às 5h no mês de maio.

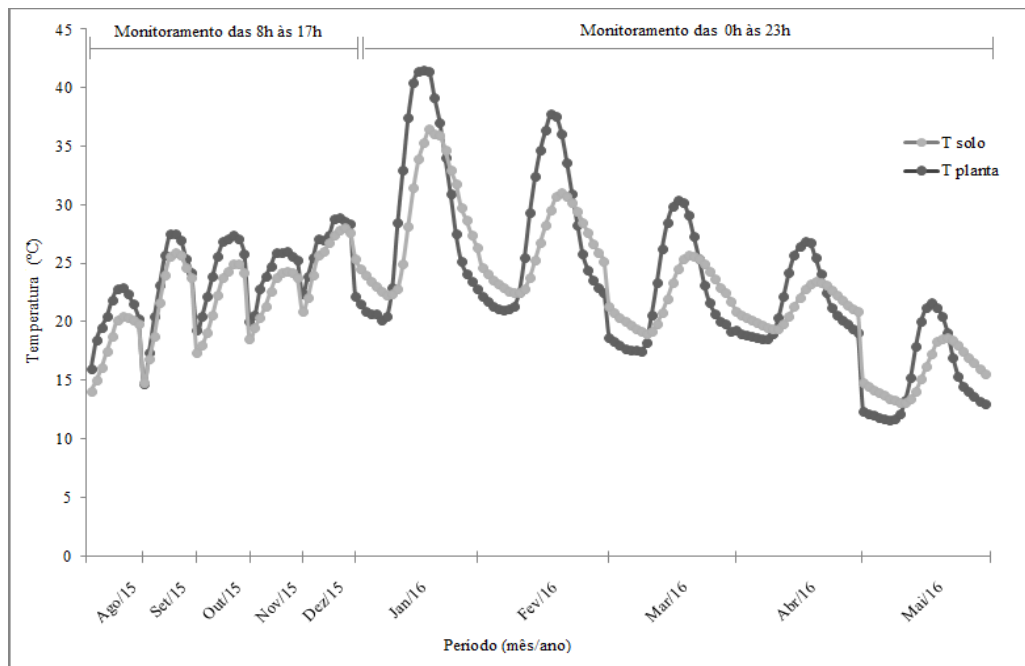
Essa variação de até 20,56°C se deu pelo fato do período contar com 10 meses de estudo, incluindo diferentes estações do ano. Além disso, conforme mencionado anteriormente, a presença do fenômeno “El Niño” fez com que as temperaturas entre o final de 2015 e início de 2016 ficassem mais elevadas do que o normal (CPTEC/INPE, 2016).

A diferença entre a temperatura interna do TV e externa variou de 0,03°C a 2,5°C. Em outras condições de isolamento térmico espera-se que a temperatura interna do ambiente abaixo do telhado verde apresente temperaturas ainda menores nos períodos mais quentes, assim como observado em outros estudos como os de Ferraz (2012) e Espínola (2010) que observaram uma diferença de até 12°C e 4,4°C, respectivamente. Em tais pesquisas as estruturas onde estava instalada a cobertura verde era de alvenaria e não de madeira como é o caso deste trabalho.

Os valores de temperatura do ar no interior do TV geralmente apresentaram-se menores do que os da temperatura do ar externo. No entanto, em setembro das 11h às 16h, e janeiro das 9h às 14h esse padrão não ocorreu. Esse comportamento pode estar associado à temperatura do solo e planta, constituintes da superfície do TV, assim como à umidade antecedente da cobertura, cuja temperatura está diretamente relacionada com a temperatura interna da edificação. Além disso, a estrutura está posicionada a cerca de 1,3 m de distância do quiosque do CT, onde está instalada uma churrasqueira, a qual é muito utilizada no mês de setembro em razão dos Festejos Farroupilhas. Dada esta situação, as temperaturas interna e superficial do TV certamente foram fortemente influenciadas pelo calor oriundo da utilização da churrasqueira.

Contextualizando, a Figura 23 traz a média mensal horária da temperatura da planta e do solo durante o período de monitoramento. Como mencionado anteriormente, a média desses valores constituem a temperatura superficial do TV experimental.

Figura 23 – Média horária mensal da temperatura da planta e do solo durante o período estudado.



Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se observar que ambas as temperaturas se elevam no decorrer do dia e voltam a reduzir ao entardecer. Durante o dia os valores observados para a temperatura da planta foram maiores que os do solo, isso porque nesse período a radiação solar incide diretamente na vegetação, que absorve ou reflete grande parte desta energia antes desta chegar ao solo. Já no período noturno, o solo perde menos calor devido a sua cobertura vegetal, e a planta por sua vez fica mais exposta à variação da temperatura do ar e à ação do vento.

A temperatura da planta apresentou as maiores variações ao longo do dia, chegando a uma amplitude de 21°C no mês de janeiro. A menor variação de temperatura da planta foi observada em agosto de 2015 (4,32°C). No caso da temperatura do solo também existe uma considerável variação ao longo do dia, chegando a uma amplitude de até 14°C em média nos dias mais quentes de janeiro, e diferindo entre 4°C a 5°C quando a temperatura do ar é mais amena (abril e maio).

Esse comportamento é justificado pela pequena profundidade de solo presente no experimento, cerca de 8 cm do total da espessura da superfície do TV, e pela sua composição. Conforme apresentado na descrição do experimento, o substrato possui argila expandida, e se caracteriza por ser franco-argilo arenoso, com 20 a 30% de argila, menos de 28% de silte e

45% ou mais de areia (PESSOA, 2016). Assim há um elevado volume de ar, que por sua vez é um mau condutor de calor, gerando uma grande variação de temperatura na sua superfície.

O trabalho de Issa, Leitch e Chang (2015), embora destaque a fração argilosa do substrato do telhado estudado, comprova que a constituição do solo interfere muito na variação térmica de uma cobertura verde, e complementam que tal variação pode estar associada também à espessura da camada de solo, visto que seus resultados mostraram uma diferença de temperatura menor à medida que a espessura da camada de solo aumentava, principalmente se superior a 10 cm.

Devido à presença de vegetação deve-se considerar, ainda, o processo fotossintético, que mesmo sem a presença de radiação e luz solar, segue sendo realizado; isso pode afetar a transferência de energia tanto para o interior do telhado quanto para a atmosfera.

Neste sentido, Niachou et al. (2001) encontraram resultados semelhantes para o dia e para noite, quando estudaram o comportamento térmico de um telhado verde na Grécia, e ressaltam que as diferenças de temperatura superficial externa observadas estavam também relacionadas com as espécies vegetais, ou tipo de material empregado na cobertura.

Como mencionado anteriormente, na presente pesquisa observou-se que tanto os índices de temperatura da planta quanto a amplitude térmica apresentada por esta variável foram maiores do que os do solo, mas o comportamento foi semelhante, sendo que a variação térmica durante o dia foi muito superior, principalmente nos meses mais quentes. Essa situação ocorre devido à vegetação sofrer com as altas temperaturas, mudando inclusive a forma e a coloração das folhas que se tornou amarelada, comprovando que a espécie possui plasticidade fenotípica, comportamento citado nos trabalhos de Gianoli (2004) e Grace (1997), assim como no livro de Taiz e Zeiger (2004).

Arelado a isso, as flores que em setembro estavam presentes acabaram secando e caindo, diminuindo a área verde do telhado, expondo o solo à incidência direta da radiação solar e calor.

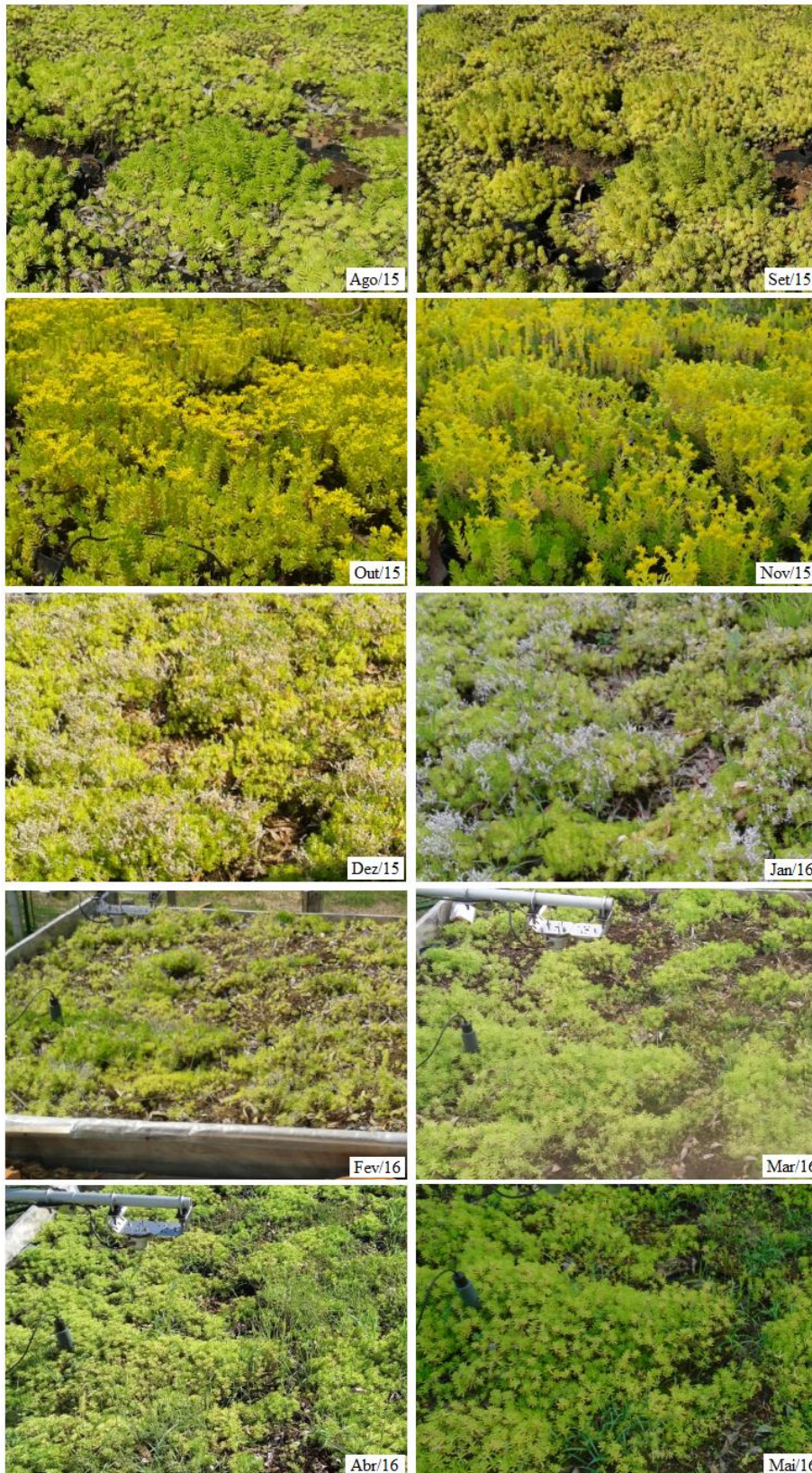
A Figura 24 ilustra a variação do aspecto da superfície vegetal do TV estudado, a cada mês de monitoramento, onde se pode observar a diferença de coloração mencionada anteriormente. Notou-se uma vegetação mais densa e a floração da espécie entre os meses de setembro a novembro, quando a superfície do TV apresentou gradientes de temperatura superiores ao do ar. De dezembro a maio, quando o TV apresentou flores ressecadas e vegetação mais esparsa, ocorreu uma pequena mudança desse comportamento; a temperatura superficial do TV se aproximou à temperatura do ar, apresentando uma diferença menor entre

elas e, ainda, foram observados casos onde o gradiente de temperatura superficial do TV foi inferior ao do ar.

Considerando essa situação, pode-se citar a pesquisa de Niachou et al. (2001), onde os autores testaram diferentes espécies vegetais e concluíram que a temperatura da superfície varia de acordo com o tipo de vegetação e sua disposição no telhado. Nesse estudo os autores obtiveram temperaturas superficiais, tanto externa quanto interna, mais baixas nos espaços cobertos por espessa vegetação de cor verde escuro, e mais elevadas onde a vegetação estava menos densa ou com uma coloração diferente (clara ou avermelhada). Isso porque, assim como no presente trabalho, para compor a temperatura superficial do TV os autores consideraram também a temperatura do substrato.

Neste contexto, tal comportamento é explicado também pela capacidade de refletir a radiação solar incidente, conforme a cor apresentada pela vegetação em determinado período. Essa capacidade é determinada pelo coeficiente de reflexão (albedo) da superfície vegetal, melhor discutido na sequência deste trabalho.

Figura 24 - Ilustração da mudança do aspecto da vegetação do telhado verde experimental durante o período estudado.



Fonte: Acervo próprio.

Quanto à temperatura superficial, notou-se um comportamento análogo ao da temperatura externa, considerando a variação horária. No entanto, os valores observados para a superfície do TV, geralmente, durante o período e horários monitorados, foram mais elevados do que os apresentados pelo ar, com exceção do mês de abril. Isso se justifica pelo fato da cobertura do telhado ser composta por solo e vegetação, que apresentam funções biológicas e outras características que interferem nas trocas térmicas, como foi discutido anteriormente.

Além disso, a diferença entre os valores da temperatura superficial do TV e a da temperatura do ar variou de $0,01^{\circ}\text{C}$ até $6,95^{\circ}\text{C}$. Essa variação está diretamente relacionada à elevação do índice de temperatura do ar, ou seja, quanto maior o valor da temperatura externa, maior a diferença entre esta e a temperatura da superfície do telhado. A exemplo disso, a amplitude máxima observada ocorreu em 24 de janeiro, comprovadamente o dia mais quente desde o início do ano de 2016 em Santa Maria, RS (INMET, 2016).

Ainda, referente à temperatura superficial do TV, a média do período foi igual a $22,9^{\circ}\text{C}$. Assim como as variáveis anteriores, a mínima foi observada em maio ($12,51^{\circ}\text{C}$) e a máxima em janeiro ($38,91^{\circ}\text{C}$), mês geralmente mais quente na região. Quanto à variação horária, os valores mínimos foram observados às 8h (agosto a dezembro de 2015), e entre 5h e 6h (janeiro a maio de 2016). As temperaturas máximas foram registradas entre 14h e 15h.

Esse comportamento condiz com o esperado, pois, sabe-se que um ambiente o qual recebe a incidência de raios solares durante o dia, armazena o calor nas suas partes construtivas e só o transfere no período noturno. Dessa forma, a temperatura de qualquer estrutura tende a apresentar gradientes de temperatura elevados e amplitudes térmicas maiores durante o dia, e o inverso com o chegar da noite. Neste contexto ainda cabe lembrar a pesquisa de Lopes (2007), onde, ao analisar o comportamento térmico de diferentes coberturas observou que as variações das temperaturas ocorridas tanto durante o dia quanto à noite são de maior amplitude fora da edificação e de menor amplitude dentro.

Compararam-se ainda as temperaturas internas e superficiais do TV e do TC de fibrocimento, e ainda a temperatura do ar externo. O resultado das médias mensais de temperatura para cada situação pode ser observado na Tabela 3. Para uma melhor visualização, tais temperaturas foram plotadas no gráfico ilustrado na Figura 25.

Notou-se que a diferença entre as temperaturas médias no interior do TV e TC é mais pronunciada quando a temperatura externa é elevada. De forma geral, a temperatura na sala com cobertura do TV foi menor que a sala ao lado, com a cobertura do TC. Destaca-se que a

sala com a cobertura verde é mais desfavorável com relação à orientação solar pois possui abertura para norte e uma das paredes externas para oeste, ficando mais exposta à radiação solar ao longo do dia. Além disso, os ambientes são separados apenas por uma parede de madeira com espessura de 2,5 cm sem isolamento térmico, e estão interligados por uma abertura de aproximadamente 80 cm de largura e 1,80 m de altura, o que pode facilitar a troca de calor entre os ambientes.

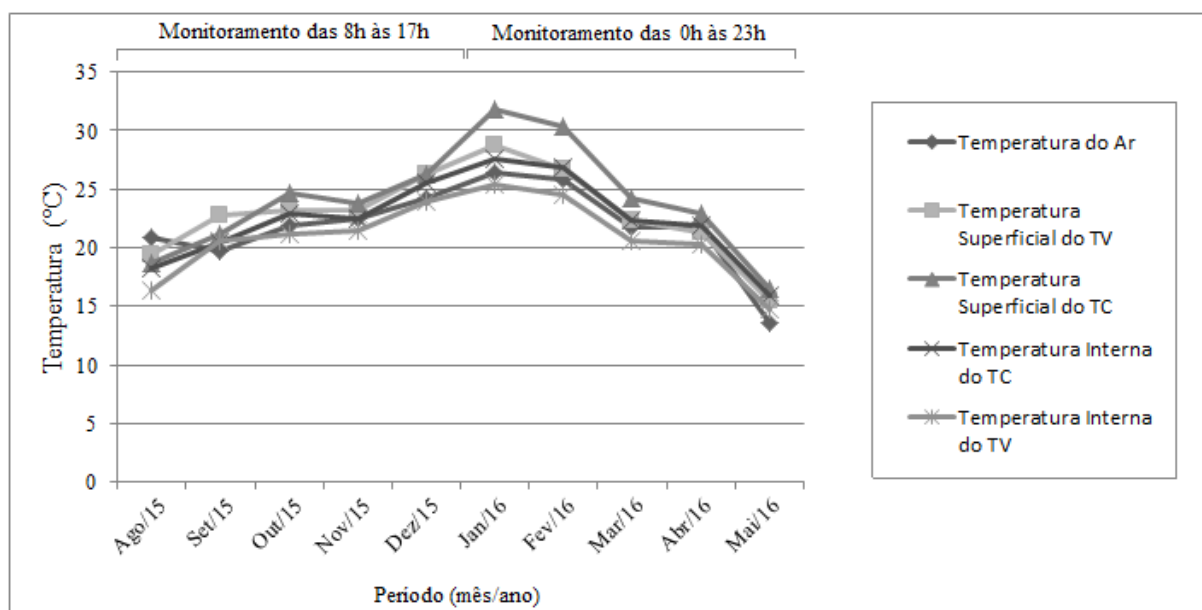
Tabela 3 - Comparativo das médias mensais de temperaturas interna e superficial dos telhados verde e convencional, e da temperatura do ar externo.

Mês	Temperatura Externa (°C)	TELHADO VERDE (°C)		TELHADO CONVENCIONAL (°C)	
		T. Interna	T. Superficial	T. Interna	T. Superficial
Ago/15*	20,91	16,28	19,44	18,22	18,75
Set/15*	19,74	20,61	22,74	20,69	21,23
Out/15*	21,97	21,14	23,26	22,84	24,66
Nov/15*	22,41	21,52	23,17	22,41	23,72
Dez/15*	24,16	23,99	26,21	25,49	26,34
Jan/16	26,37	25,34	28,78	27,62	31,75
Fev/16	25,89	24,45	26,72	26,84	30,31
Mar/16	21,68	20,65	22,30	22,30	24,16
Abr/16	21,73	20,31	21,36	21,90	22,97
Mai/16	15,34	14,80	15,45	15,89	16,54

* não foram considerados todos os dias de cada mês e o monitoramento foi realizado apenas das 8h às 17h.

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 25- Comparação entre as médias mensais das temperaturas internas e superficiais dos telhados verde e convencional, e a temperatura do ar no período estudado.



Fonte: Elaborada pela autora.

Foi possível conferir também que, geralmente, a temperatura superficial do TC é superior àquela do TV. Somente nos meses de Agosto e Setembro isso não ocorreu, e isso deve-se às condições do solo e da vegetação, ou por interferência externa no horário da leitura. Durante esses meses a leitura era feita a cada hora, e dessa forma a presença de nuvens, ou ainda sombreamento causado pela construção ao lado ou espécies arbóreas presentes no entorno do telhado, nestes casos somente no período da manhã, pode ter influenciado os valores observados.

Com relação ao resultado da temperatura superficial, pode-se citar Lopes (2007) e Peralta (2006), que compararam um telhado verde com outros tipos de cobertura, como telha cerâmica romana, aço galvanizado, material reciclado, fibrocimento, laje de concreto, e constataram que os telhados verdes apresentaram uma menor amplitude térmica em relação aos outros materiais, comprovando a sua eficiência no conforto ambiental proporcionado para os seus usuários.

Em um experimento realizado por Vecchia (2005) comparando a temperatura interna de módulos construtivos com diferentes coberturas, num dia de temperatura externa de 34,0°C, verificou-se que a temperatura máxima no interior do módulo de cobertura verde foi de 28,8°C, a maior amplitude observada (5,2°C) quando comparada às demais coberturas:

telha cerâmica 30,4°C, aço galvanizado 45°C, telha de fibrocimento 31,0°C e laje de concreto 34,7°C, evidenciando a eficiência de isolamento térmico dos TVs.

Espínola (2010) e Ferraz (2012) chegaram a resultados semelhantes no que se refere ao comportamento ou desempenho térmico de telhados verdes ao longo do dia. O primeiro autor observou diferenças entre as temperaturas médias internas a construções com TC e TV em relação à temperatura externa, destacando que quando a temperatura externa é elevada, a redução térmica para o interior da edificação com TV é bem pronunciada, em torno de 4,4°C, enquanto para edificação com TC ficou em 1,5°C. Para temperatura mais amena, ou no inverno (frio), a diferença no TV ficou de 0,45 a 0,96° C e no TC ficou de 0,1 a 0,35° C, resultando assim uma maior eficiência do TV no período de temperaturas mais elevadas, característico do período de verão. Já Ferraz (2012), na sua pesquisa, observou que a temperatura interna do ambiente com cobertura verde apresentou índices menores que a temperatura externa do ar na hora mais quente do dia, e índices maiores que a externa na hora mais fria.

Dessa forma, os autores concordam que, em suas pesquisas, as coberturas verdes apresentaram um bom comportamento em relação à atenuação das variações de temperaturas internas à edificação, frente às temperaturas do ar externo, assim como o demonstrado no presente estudo.

Conforme mencionado na metodologia, a partir do monitoramento da temperatura foi realizada uma análise de regressão múltipla, considerando a temperatura do ar e da superfície dos telhados, de forma a definir diferentes equações para a obtenção da temperatura interna do TV (Equação 15) e do TC (Equação 16), a partir de janeiro de 2016.

$$Ti_{TV} = 1,7739 + 0,4990 * Tar + 0.3582 * T_{TV} \quad (15)$$

$$Ti_{TC} = 1,4740 + 0,5718 * Tar + 0,3485 * T_{TC} \quad (16)$$

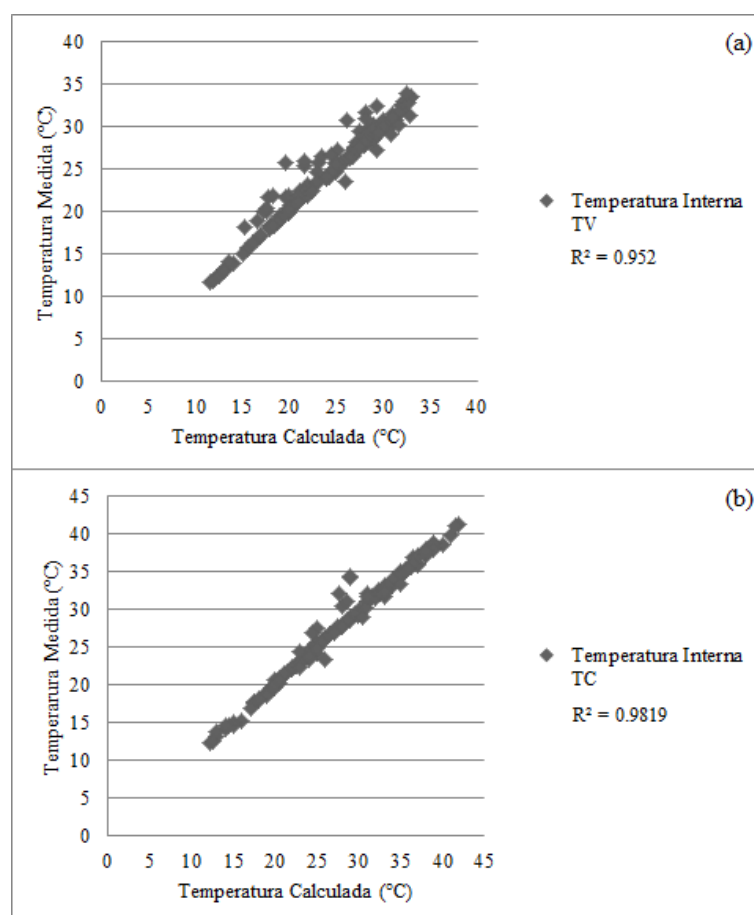
Sendo: Ti_{TV} a temperatura interna do TV, Ti_{TC} a temperatura interna do TC, Tar a temperatura do ar, T_{TV} a temperatura superficial do TV e T_{TC} a temperatura superficial do TC.

O valor observado de R^2 foi de 0,95 para a temperatura interna do TV e 0,98 para a do TC, o que significa que existe uma forte relação entre as variáveis.

Utilizando o Teste t, com nível de significância de 0,05, foi possível constatar que não existe uma diferença significativa entre os valores medidos e os estimados, sendo correto dizer que as equações propostas atendem os requisitos a que se propõem, e se mostram

adequadas à obtenção de valores de temperatura interna para os telhados. A Figura 26 ilustra a correlação entre os gradientes de temperatura interna, medidos e estimados, para o TV (a) e TC (b), mostrando também o valor de R^2 . Em ambos os casos observou-se uma forte relação entre os índices de temperatura lido e calculado.

Figura 26 - Correlação entre os gradientes de temperatura interna, medidos e calculados, para o TV (a) e TC (b).



Fonte: Elaborado pela autora.

5.3 BALANÇO DE ENERGIA DO TELHADO VERDE

Este item mostra uma análise dos componentes do balanço de energia obtidos nesta pesquisa e apresenta os resultados gerados no TV experimental acerca da determinação do seu balanço energético.

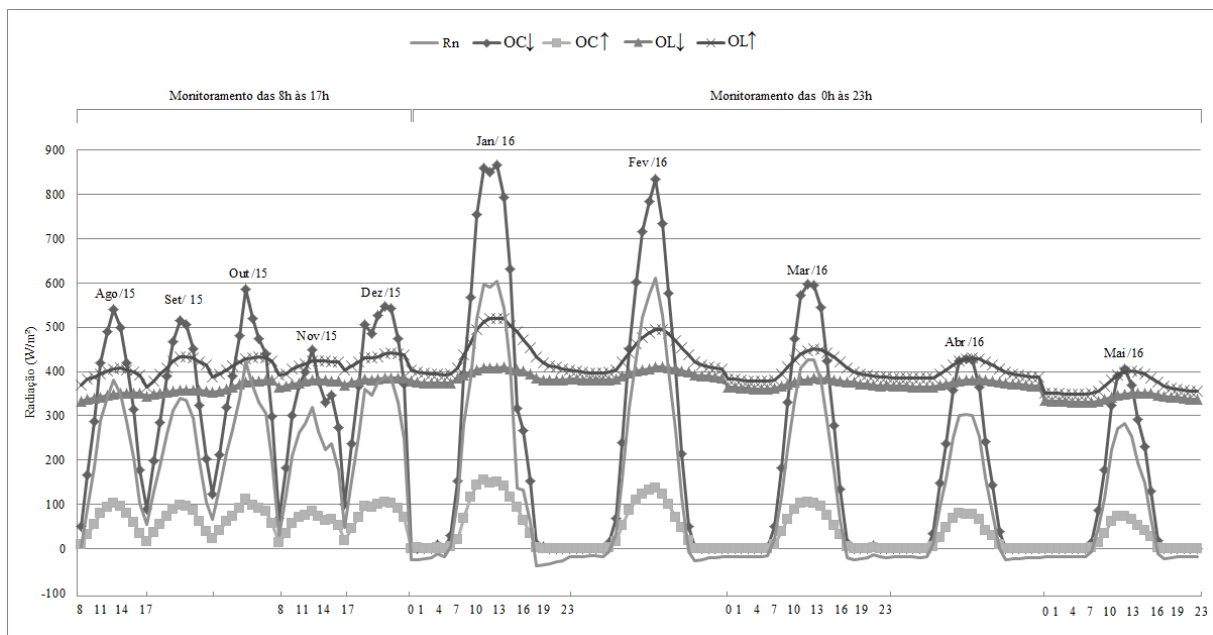
O balanço de radiação de ondas curtas ($OC_{\downarrow} - OC_{\uparrow}$) e longas ($LO_{\downarrow} - OL_{\uparrow}$), que compõem o saldo de radiação (R_n) e os fluxos de calor latente ($Q_{latente}$), por condução

($Q_{\text{condução}}$) e por convecção ($Q_{\text{convecção}}$) foram obtidos conforme a metodologia descrita na seção 4.4.

Inicialmente, tratando do balanço da radiação que entra e sai do sistema TV, foi elaborada a Figura 27, que mostra graficamente a variação média horária mensal dos componentes medidos para o balanço de radiação na superfície do TV durante o período de monitoramento, sendo considerado tanto os dias nublados, como de céu limpo.

A energia média diurna de radiação global incidente (OC_{\downarrow}) durante todo o período de estudo foi igual a $391,08 \text{ W/m}^2$, a de OC_{\uparrow} foi de $73,02 \text{ W/m}^2$, a OL_{\downarrow} , com valor médio de $373,39 \text{ W/m}^2$ e a OL_{\uparrow} com $425,81 \text{ W/m}^2$, finalmente o saldo de radiação (R_n) foi de $265,73 \text{ W/m}^2$. Todos estes valores considerando apenas o intervalo das 8 às 17h.

Figura 27 - Variação média horária dos componentes do balanço de radiação durante os meses estudados.



Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se constatar que os componentes do balanço de radiação apresentam um ciclo diário bem definido, com os valores mais elevados ocorrendo durante o período diurno e os menores durante o período noturno. Nota-se que o saldo de radiação (R_n), a radiação refletida (OC_{\uparrow}), e as radiações de onda longa acompanham a variação da radiação global incidente (OC_{\downarrow}) durante o dia, sendo que os valores máximos da OC_{\downarrow} , OC_{\uparrow} e R_n ocorrem geralmente às 13h, chegando a $865,41 \text{ W/m}^2$, $154,90 \text{ W/m}^2$ e $637,06 \text{ W/m}^2$, respectivamente. Por outro lado, o valor máximo de OL_{\uparrow} ($503,30 \text{ W/m}^2$) e de OL_{\downarrow} ($410,42 \text{ W/m}^2$) se observam às 14 h.

Percebe-se que durante o período diurno, a energia disponível no sistema, ou saldo de radiação, é dominado pelas trocas radiativas de OCs, sendo que o índice de radiação global recebido é gerenciado pelo coeficiente de reflexão (albedo). No período noturno, o R_n é composto exclusivamente pelos fluxos de ondas longas, cujas perdas na superfície são controladas pela temperatura da superfície e pela emissividade (OKE, 1987 e GALVÃO, 2000). Neste sentido, observou-se ainda que o balanço de OLs foi negativo em praticamente todo o período, revelando que a superfície está emitindo mais energia radiante que a atmosfera.

Sobre o comportamento do R_n pode-se dizer que o substrato, a água contida nele e a vegetação alteram a composição espectral da radiação com suas diferentes taxas de absorção, reflexão e transmissão. Dessa forma, dependendo das características apresentadas por esses elementos, a absorção ou reflexão da radiação incidente vai resultar na redução ou aumento da energia nesse sistema (solo-vegetação) (PEREIRA, ANGELOCCI e SENTELHAS, 2007).

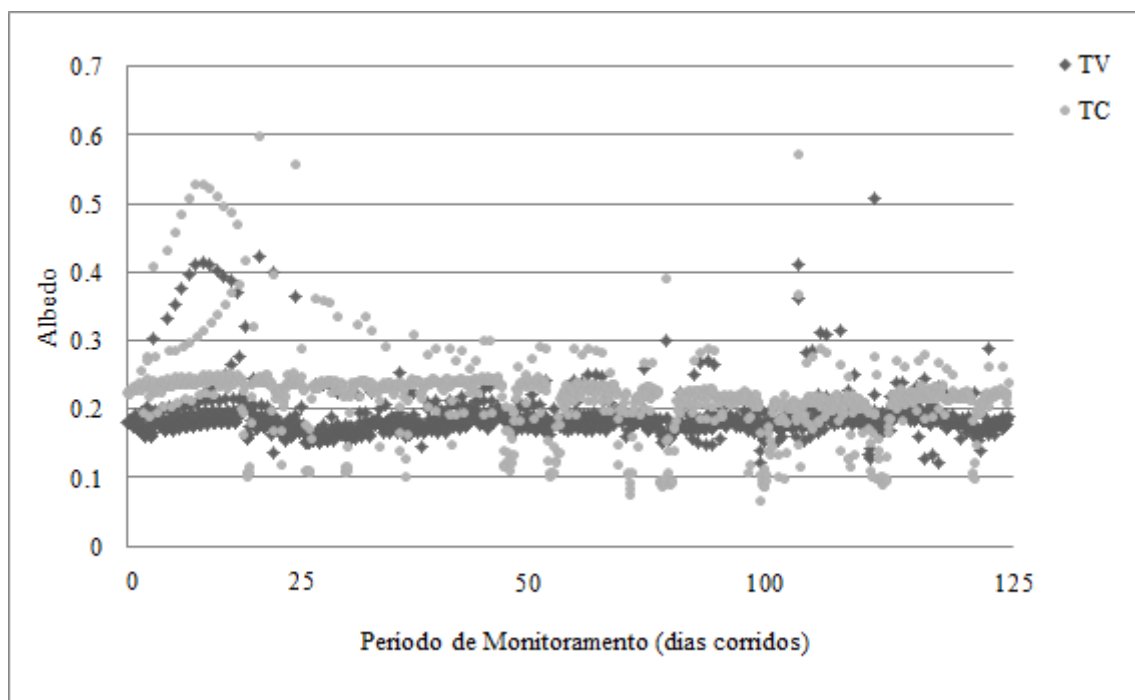
Neste contexto, notou-se que os valores de albedo, coeficiente de reflexão do TV, ficaram mais elevados nos períodos mais quentes, quando o solo estava mais seco, a vegetação amarelada e esparsa, e reduziram quando a vegetação se apresentou mais densa e verde. Conforme Niachou et al. (2001), as variações do albedo podem ser relevantes para caracterizar alterações das propriedades biofísicas de determinada superfície durante diferentes períodos, e evidenciam as características de determinada espécie desde o período de crescimento até a senescência, a variabilidade da vegetação em análises sazonais ou na escala de longos períodos.

Neste contexto, vale ressaltar que a média para o coeficiente de reflexão encontrada nesta pesquisa foi igual a 0,19. O processo usado para determinar este valor está detalhado no Apêndice A. O valor de albedo encontrado neste trabalho é próximo ao observado por Gaffin et al. (2006), Zhao et al. (2013) e Li Bou-Zeid e Oppenheimer (2014), que foram de 0,20, 0,23 e 0,17, respectivamente, para um telhado verde com espécies vegetais semelhantes, todas pertencentes ao gênero *Sedum*.

Quando comparados os albedos do TV e TC, como ilustra a Figura 28, pode-se notar que o TC apresentou, na maior parte do tempo, valores mais elevados do que aqueles observados no TV. Isso ocorre porque a telha de fibrocimento possui uma coloração cinza claro, o que proporciona uma reflexão maior do que aquela realizada por superfícies de cores mais escuras, como a do TV. Os dias em que esse comportamento não foi observado podem ser justificados pelo acúmulo de sujeira e/ou folhas secas sobre o TC.

Percebe-se, no entanto, que embora a capacidade de reflexão do TC seja maior que a do TV, o telhado de fibrocimento transmite mais calor para o interior da estrutura do que aquela onde está presente a cobertura verde, conforme mostra o comportamento térmico dos dois telhados apresentado anteriormente. Esse comportamento também foi observado por Gaffin et al. (2006), ao determinarem que para que construções com TCs apresentem temperaturas internas próximas àsquelas apresentadas por prédios com TVs, o albedo deveria assumir valores entre 0,7 a 0,85.

Figura 28 - Comparação dos albedos referentes aos telhados verde e convencional, no intervalo das 9h às 17h, de janeiro a maio de 2016.



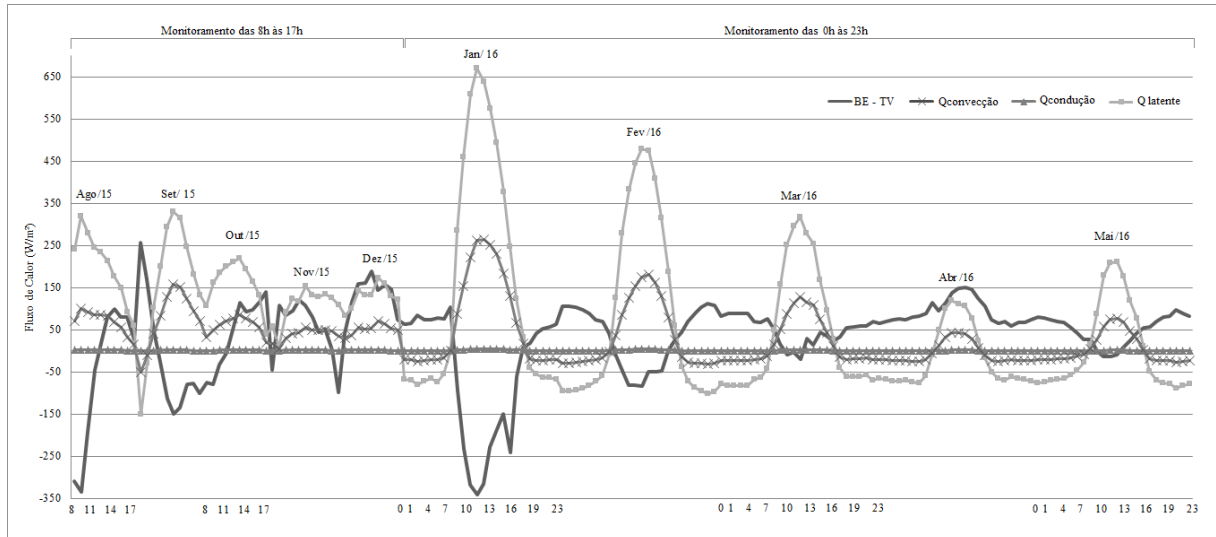
Fonte: Elaborado pela autora.

Com relação à $OL\uparrow$, esta é afetada diretamente pela emissividade do TV e varia conforme a temperatura do ar. Tal parâmetro ($OL\uparrow$) comportou-se como o esperado, apresentando valores e amplitudes maiores nos meses mais quentes e nos horários de maior radiação e temperatura. Esse desempenho foi o mesmo encontrado nos trabalhos de Feng, Meng e Zhang (2010) e Gaffin et al. (2006), os quais utilizaram espécies do mesmo gênero da utilizada neste experimento.

A série temporal dos componentes do balanço de energia (R_n , $Q_{condução}$, $Q_{convecção}$ e $Q_{latente}$) para o telhado verde estudado durante o período de acompanhamento

(agosto/15 a maio/16) está ilustrada na Figura 29. Valores médios mensais podem ser observados na Tabela 4.

Figura 29 - Balanço de energia e fluxos de calor do telhado verde em estudo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4- Médias mensais dos componentes R_n , $Q_{convecção}$, $Q_{condução}$, $Q_{latente}$ e do balanço de energia do telhado verde estudado.

	R_n (W/m ²)	$Q_{convecção}$ (W/m ²)	$Q_{condução}$ (W/m ²)	$Q_{latente}$ (W/m ²)	BE – TV (W/m ²)
Ago/15*	225,78	69,07	2,46	201,04	-46,80
Set/15*	223,24	79,09	1,53	162,10	-19,49
Out/15*	269,18	59,54	1,94	161,62	46,07
Nov/15*	217,68	38,77	1,45	107,05	70,42
Dez/15*	292,61	49,98	1,59	128,50	112,54
Jan/16	173,86	66,99	2,11	155,82	-51,06
Fev/16	160,76	34,18	1,59	86,28	38,70
Mar/16	114,80	19,47	1,03	40,33	53,98
Abr/16	73,49	-6,24	0,66	-18,55	97,62
Mai/16	61,06	3,52	0,27	3,39	53,87

* não foram considerados todos os dias de cada mês e o monitoramento foi realizado apenas das 8h às 17h.

Fonte: Elaborado pela autora.

O componente $Q_{convecção}$, que trata do transporte de calor por convecção, apresentou um valor médio para o período de $41,44 \text{ W/m}^2$, o $Q_{condução}$, transporte de calor por condução; $1,46 \text{ W/m}^2$ e o $Q_{latente}$, o calor latente responsável pela evapotranspiração, $102,76 \text{ W/m}^2$.

O calor latente se apresentou, na maior parte do tempo, o principal caminho de saída da energia do sistema, chegando a $201,04 \text{ W/m}^2$ em agosto, seguido pelo fluxo de calor por convecção. As menores perdas foram observadas pelo fluxo de calor por condução. Em outras pesquisas sobre balanço de energia, considerando TVs (GAFFIN et al., 2011; NIACHOU et al., 2001; SUN et al., 2013) os componentes atuaram da mesma forma. Já quando considerados outros tipos de vegetação, como floresta e pastagem (GALVÃO, 2000), e lavoura de arroz (SENA, 2012; SENNA et al., 2011), as perdas pelo fluxo de calor por condução foram maiores que as perdas por convecção, isso porque a camada de solo presente nestas pesquisas são muito superiores do que a observada em telhados verdes.

Pode-se dizer que todos os componentes apresentam um comportamento semelhante, com valores mais altos durante o dia (9h às 17h), reduzindo com o anoitecer e voltando a elevar-se no amanhecer. No entanto, o fluxo de calor por condução variou menos ao longo do dia, com relação às amplitudes observadas nos fluxos $Q_{convecção}$ e $Q_{latente}$.

Com relação ao $Q_{convecção}$, conforme Gaffin et al. (2011), este fluxo é influenciado pela velocidade do vento quando esta é superior a $1,75 \text{ m/s}$. Durante a presente pesquisa a magnitude do vento esteve, em média, superior a esta margem, portanto interferindo diretamente na planta, promovendo dessecamento ou perda intensa de calor para o ambiente. No entanto, grande parte das pesquisas relacionadas ao balanço de energia não considera esta variável, e aliado ao fato que a velocidade do vento não foi medida diretamente no experimento, o que poderia influenciar negativamente nos resultados, nesta pesquisa este parâmetro não foi considerado.

Em geral, as perdas por convecção ocorrem durante o dia, quando a temperatura da superficial do TV é mais alta do que a temperatura do ar. À noite, essa temperatura superficial cai significativamente e o gradiente de temperatura reverte com o ar que passa a ser mais quente do que a superfície, portanto, aquecendo-a. Ainda sobre o fluxo de calor por convecção, Gaffin et al. (2011) dizem que este trata da transferência de calor sensível e é um processo complexo que envolve a turbulência dos ventos, gradientes de temperatura e fluxos da camada limite. Assim sendo, não é possível generalizar a variável $Q_{convecção}$ para diferentes construções e ambientes. Dito isso, esse fluxo pode ter sido estimado de forma

equivocada, visto que o coeficiente de convecção utilizado é para espécies do gênero *Sedum*, mas não a espécie específica do TV experimental estudado. Além disso existem diferenças estruturais e climáticas entre os experimentos.

Neste contexto, foi realizada uma análise de sensibilidade sobre estes coeficientes, testando valores apresentados por Gaffin et al. (2011), e coeficientes sugeridos por Berdahl e Bretz (1997), além de valores 25% e 50% acima e abaixo dos valores sugeridos. O resultado desta análise demonstrou que ao longo do dia não existe uma diferença significativa nos resultados do balanço de energia quando testados diferentes valores dos coeficientes de convecção. No entanto, foi observado que coeficientes de convecção maiores são melhor aplicados quando a velocidade do vento é menor que 2 m/s e sobre superfícies planas (NETO, 2010), e que coeficientes superiores a 30 W/m².K passam a distorcer e superestimar os resultados.

Em se tratando dos elementos necessários para a obtenção do fluxo de calor latente, com relação à variável β (Razão de Bowen) calculada para o período, todos os valores observados se encontraram dentro do intervalo de -0,7 a 1,5, indicado por Biudes et al. (2009) e Jarvis, James e Landsberg (1976), não sendo necessário o descarte de nenhum valor. Além destes, outros estudos utilizam apenas a Razão de Bowen para estimar os componentes do balanço de energia, no entanto, esse método desconsidera fatores importantes como velocidade do vento e propriedades físicas do sistema a ser estudado, o que pode gerar resultados que não condizem com a realidade, principalmente quando aplicado à pequenas áreas. Dessa forma, no presente trabalho, a variável β faz parte da determinação de um dos componentes do balanço energético, mas não é o único método utilizado para obtenção do balanço de energia do telhado verde estudado.

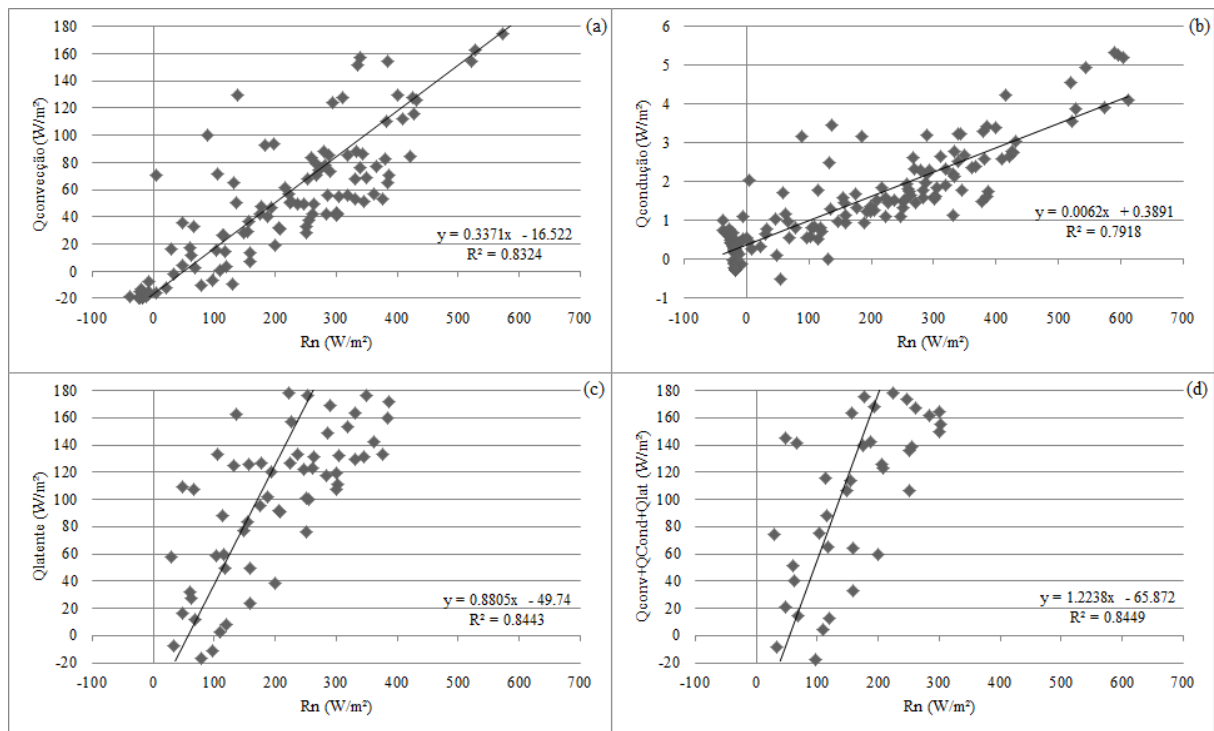
Sobre o fluxo de calor por condução, este é intimamente ligado á composição da superfície do telhado; neste sentido é considerada não apenas a capacidade térmica do solo, mas de todas as camadas que compõem a superfície. No caso do TV estudado foi considerado a espessura de cada camada (solo, vegetação, e madeira que compõe a base da estrutura do telhado), e conforme descrito na metodologia, foi determinada uma média ponderada dos valores de condutividade térmica de tais camadas, totalizando um valor único para κ , de 0,568 W/m.K. Além disso, este fluxo também é influenciado pela espessura ou profundidade da camada analisada. Nesta pesquisa a camada de cobertura do telhado possuía apenas 0,165 m, o que justifica os baixos valores para este fluxo.

Os valores obtidos nesta pesquisa, para os fluxos de calor por convecção, por condução e latente vão de acordo com o observado por Gaffin et al. (2011), embora as

condições climáticas não sejam as mesmas e que os autores tenham considerado a velocidade do vento na estimativa do fluxo de calor por convecção.

A Figura 30 apresenta a relação moderada existente entre as variáveis dependentes ($Q_{\text{convecção}}$, $Q_{\text{condução}}$ e Q_{latente}) e a variável independente (R_n). Isso mostra que o comportamento dos fluxos de energia do sistema telhado verde está certamente sujeito à quantidade de energia disponível, mas não exclusivamente, pois estes fluxos são fortemente influenciados pelas mudanças climáticas (temperatura, precipitação e velocidade do vento) e características inerentes à composição da cobertura.

Figura 30 - Correlação entre as médias horárias mensais de: (a) R_n e $Q_{\text{convecção}}$, (b) R_n e $Q_{\text{condução}}$, (c) R_n e Q_{latente} e (d) R_n e $Q_{\text{convecção}} + Q_{\text{condução}} + Q_{\text{latente}}$.



Fonte: Elaborado pela autora.

O lado direito da Equação 1, referente ao cálculo do balanço energético utilizada neste trabalho, representa o índice de variação do teor de calor ou energia da camada de cobertura e é observado na quarta coluna da Tabela 5. Tal índice foi calculado como a taxa de variação de temperatura da superfície no intervalo médio de uma hora, com base no coeficiente de capacidade térmica para o telhado verde (CT_{TV}).

Como resultado, esse índice variou de 10,23 W/m² em maio de 2016, mês mais frio do período, a 295,48 W/m² em dezembro de 2015, um dos meses mais quentes. O que significa

que as trocas de energia, e a velocidade desse processo, variam conforme os gradientes de temperatura, e a duração e intensidade de radiação solar incidente.

Tabela 5 - Médias mensais da capacidade térmica, do balanço de energia, da taxa de variação de temperatura do telhado verde experimental, e a diferença entre os dois últimos.

Mês	CT_T (MJ/m ² .K)	BE – TV (W/m ²)	$CT_T \times dT_T/dt$ (W/m ²)	Diferença entre BE e Índice de variação (W/m ²)
Ago/15*	2,23	-46,80	-28,04	-18,76
Set/15*	2,21	-19,49	-24,12	4,63
Out/15*	2,57	46,07	-30,79	76,85
Nov/15*	1,78	70,42	-12,38	82,80
Dez/15*	1,78	112,54	-19,84	132,39
Jan/16	2,08	-51,06	-4,09	-46,97
Fev/16	2,62	38,70	9,74	28,96
Mar/16	2,42	53,98	10,80	43,17
Abr/16	2,87	97,62	6,32	91,30
Mai/16	1,86	53,87	10,03	43,84

* não foram considerados todos os dias de cada mês e o monitoramento foi realizado apenas das 8h às 17h.

Fonte: Elaborado pela autora.

O CT_T foi calculado fazendo uso da Equação 1, após a determinação das variáveis do lado esquerdo. As médias mensais dessa variável são mostradas na segunda coluna da Tabela 5. Observa-se que a capacidade térmica do TV variou de 1,78 a 2,87 MJ/m².K, valores esses incluídos no intervalo encontrado nas pesquisas realizadas por Li, Bou-Zeid e Oppenheimer (2014) e Bou-Zeid e Smith (2011), que chegaram a uma média de 1,9 MJ/m².K, e ainda conforme os autores que Sun et al. (2013) e Wang, Bou-Zeid e Smith (2013) que observaram valores entre 1,2 a 2,2 MJ/m³.K. Tais estudos foram realizados em TVs constituídos, assim como o objeto deste estudo, por espécies do gênero *Sedum*.

A Tabela 5 traz também a diferença encontrada entre o balanço de energia (coluna três) e o índice de variação do conteúdo de energia na cobertura do TV (coluna quatro). Quanto a este último aspecto, pode-se observar que os valores de variação de energia se apresentaram negativos em agosto e setembro de 2015, e janeiro de 2016 e positivos nos

outros meses, demonstrando que o sistema está perdendo energia na primeira ocasião e ganhando na segunda.

Quando o lado esquerdo da Equação 1, ou seja, o balanço de energia resultar positivo, significa que a camada de cobertura está ganhando mais energia por unidade de tempo do que perdendo (GAFFIN et al., 2011). Os autores afirmam ainda que este ganho deve ser próximo à taxa de aumento do conteúdo de calor da camada de cobertura (coluna quatro da Tabela 5).

No entanto, conforme se verifica neste trabalho, o balanço de energia e o índice de variação do conteúdo de energia não foram equivalentes, o que significa que existem caminhos ou quantidade de energia, seja por perda ou ganho, que não estão sendo identificados. A existência dessa diferença pode ser explicada pelo fato de terem sido utilizados valores, para alguns parâmetros, referentes a trabalhos similares a este, mas com certas peculiaridades como a espécie, o solo e substrato, e também características climáticas. Além disso, não foi considerada a velocidade do vento sobre a superfície do TV, a qual pode ter interferido diretamente no fluxo de calor por convecção. Outro fator que pode ter influenciado nos resultados é o período de monitoramento, o qual era de apenas 10h por dia na primeira etapa, assim como o número de dias monitorados, que não contaram com o total de cada mês, exceto em fevereiro, março e abril de 2016.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O objetivo principal desse trabalho foi analisar o comportamento dos diferentes fluxos de energia em um telhado verde (TV) experimental da Universidade Federal de Santa Maria e determinar o balanço energético desse sistema. Para atingir este objetivo, foi estudado o comportamento térmico do TV e finalmente aplicado um modelo de balanço de energia, utilizando-se medidas diretas e indiretas de seus componentes.

A instalação e o monitoramento dos instrumentos de medição respeitaram os preceitos descritos no decorrer deste trabalho. Em relação ao equipamento utilizado nesta pesquisa, quando comparadas as medições realizadas pelos instrumentos manuais e de baixo custo com os equipamentos automáticos e de alta resolução, os valores observados foram semelhantes e não apresentaram uma diferença significativa entre eles. Dessa forma, conclui-se que os instrumentos de baixo custo se mostraram eficientes quanto às medições propostas no monitoramento do TV estudado.

Especificamente, o comportamento térmico do TV deu-se da forma esperada, tanto em períodos de frio, quanto calor. Pôde-se observar que a cobertura verde proporcionou menores flutuações de temperatura interna ao experimento ao longo do dia, em relação aos valores externos; as variações também foram menores quando comparadas com os valores obtidos e observados na cobertura de referência, com telha de fibrocimento. Além disso, foi comprovado que a estrutura com TV promoveu maior isolamento térmico da edificação do experimento. A instalação com o TV apresentou, na maioria das vezes, temperatura interna menor que a temperatura externa nas horas mais quentes do dia, e temperatura interna maior que a externa na hora mais fria.

Com relação à determinação do albedo, necessário na estimativa do balanço de energia do TV, foi encontrado um valor médio de 0,19 para este parâmetro, equivalente ao encontrado na literatura para espécies do gênero *Sedum*, sendo que índices maiores foram observados em dias e horários mais quentes. Esse resultado demonstra a eficiência da cobertura verde com relação à reflexão da radiação solar incidente, o que interfere na transferência de calor para o interior da estrutura.

Como previsto, as radiações de onda longa e curta apresentaram um comportamento bem definido, com índices mais elevados durante o dia e mais baixos no decorrer da noite. Todos os componentes do balanço de energia apresentaram maiores médias nas estações mais quentes do ano, compreendidas entre os meses de setembro a março. Notou-se, ainda, que no período entre o amanhecer e o entardecer, o saldo de radiação (R_n) é composto pela radiação

de onda curta (OC), e as trocas de energia são administrados pelo albedo da superfície. Já no período noturno, a energia disponível no sistema TV é exclusivamente oriunda da radiação de onda longa (OL) e dependente da emissividade da superfície; neste sentido, em todo o período de monitoramento foi observado que a superfície do TV emitiu mais energia radiante (de OL) que a atmosfera.

A energia, ou R_n , disponível no sistema para as demais trocas, foi destinada prioritariamente ao fluxo de calor latente (56%), seguido pelo fluxo de calor por convecção ou sensível (23%) e pelo fluxo de calor por condução (1%). Dado o exposto, foi observado que 79% da energia incidente e disponível retornou para a atmosfera e o restante ficou retido no sistema de cobertura (20%), confirmando a eficiência dos TVs na atenuação da temperatura e transferência de energia.

Finalmente, o balanço de energia do TV experimental resultou em valores positivos em todos os meses de monitoramento, concluindo-se que este sistema (TV) está ganhando e armazenando mais energia por unidade de tempo do que perdendo.

Com a aplicação do modelo de balanço de energia proposto, o resultado deste balanço deveria apresentar valores equivalentes à taxa de aumento do conteúdo de calor da superfície do TV. No entanto, isso não foi observado, sugerindo que existem outras formas de troca de energia que não foram investigadas neste estudo, ou que algum componente foi superestimado.

Neste contexto, recomenda-se que futuras pesquisas de balanço de energia com telhados verdes determinem coeficientes específicos de convecção, e realizem medições de velocidade do vento junto ao experimento de forma a aprimorar os resultados.

Sugere-se, também, que pesquisas como esta sejam aplicadas em telhados verdes instalados sobre edificações com ambientes de melhor isolamento interno, visto que essa condição não foi possível no caso das salas com TV e TC neste experimento. Além disso, como sugestões para futuros estudos acerca do tema coberturas verdes, podem ser analisadas e investigadas, entre outros, os efeitos da utilização de telhados verdes sobre o consumo energético de edifícios institucionais e residenciais.

Com isso, a presente pesquisa contribui para a construção do conhecimento do funcionamento de telhados verdes em condições climáticas brasileiras, ampliando o seu entendimento com relação ao balanço de energia e salientando os benefícios térmicos desta cobertura, especialmente em grandes centros urbanos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, I. A. **Qualidade do espaço verde urbano: Uma proposta de índice de avaliação.** Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP. 2004.
- ALVAREZ, I.A; SILVA FILHO, D.F.; COUTO, H.T.Z. Comparação entre ideografia e fotografia aérea para diagnóstico da vegetação em ambiente urbano de Piracicaba, SP. **Revista Árvore.** Viçosa, MG. v.34, n.4, p691-698. 2010.
- ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology.** San Diego: Academic Press, 2001. 420p.
- ARRUDA, J. C. JORGE, A. PRIANTE FILHO, N.; NOGUEIRA, J de S.; ALMEIDA FILHO, E. O.; CAMPELO JUNIOR, J.H.; VOURLITIS, G.V. Aplicação de três metodologias para estimar o fluxo de calor latente em floresta de transição. **Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso).** v.21, p.233-240. 2006.
- BEATRICE, C.C. Avaliação do potencial de uso de três espécies vegetais como cobertura leve de telhados em edificações. **Revista de Ciências Ambientais (Unilasalle).** v.5, p.5-24, . 2011.
- BERDHAL, P.;BRETZ, S.E. Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. **Energy and Buildings,** v.19, p. 13-118. 1997.
- BIUDES, M. S.; JÚNIOR, J. H. C.; NOGUEIRA, J.de S.; SANCHES, L. Estimativa do balanço de energia em cambarazal e pastagem no norte do Pantanal pelo método da razão de Bowen. **Revista Brasileira de Meteorologia,** v.24, n.2, 135-143, 2009.
- BONI, F. Telhados verdes são sustentáveis? Rio de Janeiro. 2015. Disponível em: <<http://www.sustentarqui.com.br>> Acesso em: 13 mar. 2016.
- BORGES, C. J. R.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, V. P. R.; CAMPOS, J. H. B. C.; MOURA, M.S.B.; SOARES, J.M.; SILVA, B.B. Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** v.12, n.4, Campina Grande. Jul/Ago. 2008.
- BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review,** v.27, p.779-787, 1926.
- BRASIL. Normais Climatológicas (1961-1990). Brasília, DF: Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, 1992. 84 p.
- BRUM, R. ; PAUL, S. ; SILVA, A. R. ; PIOVESAN, T. R. . ACOUSTIC ABSORPTION OF GREEN ROOF SAMPLES COMMERCIALY AVAILABLE IN SOUTHERN BRAZIL. In: In: 1680 Encontro da Sociedade Acústica da América, 2014, Indianópolis- EUA. **Journal of the Acoustical Society of America,** 2014. v. 136. p. 2305.
- CASTRO S. A.; GOLDENFUM , J. A. Uso de telhado verdes no controle quantitativo do escoamento superficial urbano. **Attitude,** Porto Alegre, v.7, p.75-81. 2010.

COMPANHIA DE PESQUISAS E RECURSOS MINERAIS. CPRM. **Mapa hidrogeológico da Folha de Santa Maria**. Escala 1:100.000. 1994. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br>>. Acesso em: 12 Out. 2015.

COSTA, E. – **Arquitetura ecológica – condicionamento térmico natural**. Editora Edgar Blucher, São Paulo, 2000.

COUTO, D. L. N.; SILVA, M. E. S. Albedo em cerrado sensu stricto como resposta à variação climática e biológica: estoques de carbono e fluxos de CO₂. **GEOUSP: Espaço e Tempo**. 2010.

CPTEC-INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Produtos Especiais: El Nino, La Nina**. Disponível em:<<http://www.cptec.inpe.br>> . Acesso em: 1 de Mai., 2016.

DALLA FAVERA, A.C.; MARTINS, F. R.; SCHUCH, N.J. Análise do comportamento estatístico anual e sazonal dos ventos para a região central do Rio Grande do Sul. IN: XXIV CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA - CRICTE. **Anais...** Rio Grande, RS. 2010.

DUARTE, A.P.L. **Avaliação de propriedades termo-hidráulicas de solos requeridas na aplicação da técnica de dessorção térmica**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

DURHMAN, A. K.; ROWE, D. B.; RUGH, C.L. Effect of Substrate Depth on Initial Growth, Coverage, and Survival of 25 Succulent Green Roof Plant Taxa. **Hort Science**. v. 42, n. 3, p. 588-595, 2007.

ECOCASA. **Tecnologias Ambientais: Telhado Verde**. Disponível em: <<http://www.ecocasa.com.br>>. Acesso em: 14 fev. 2015.

ECOTELHADO. **Ecopavimento**. Disponível em: <<http://www.ecotelhado.com.br>>. Acesso em: 14 fev. 2015.

ELIAS, J. Telhados ‘vivos’ são solução para a falta de verde nas grandes cidades. **Revista Galileu**. Dez/2013. Disponível em: <<http://www.revistagalileu.globo.com>>. Acesso em: 14 fev. 2015.

ESPÍNOLA, D. M. **Telhados verdes, uma proposta para redução térmica em Foz do Iguaçu-PR**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental). União Dinâmica de Faculdades Cataratas. Foz do Iguaçu, PR. 2010.

FENG, C.; MENG, Q.; ZHANG, Y. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. **Energy and Buildings**. n.42, p.959-965. 2010.

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

FERREIRA, M. F. **Teto verde: O uso de coberturas vegetais em edificações**. São Paulo: USP. 2008.

FOKEN, T. **Micrometeorology**. Springer. Verlag Berlin Heidelberg. 320 p., 2008.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, p.403-410, 1991.

GAFFIN, S. R.; ROSENZWEIG, C.; KHANBILVARDI, R.; EICHENBAUM-PIKSER, J. ; HILLEL, D.; CULLIGAN, P.; MCGILLIS, W.; ODLIN, M. **Stormwater Retention for a Modular Green Roof Using Energy Balance Data**. Center for Climate Systems Research, Columbia University, New York. 2011.

GAFFIN, S.; PARSHALL, L.; O'KEEFFE, G.; BRAMAN, D.; BEATTIE, D.; BERGHAGE, R. Energy balance modeling applied to a comparison of white and green roof cooling efficiency In: ROSENZWEIG, C., S. GAFFIN; L. PARSHALL (Eds.) 2006. **Green Roofs in the New York Metropolitan Region: Research Report**. Columbia University Center for Climate Systems Research and NASA Goddard Institute for Space Studies. New York. 59p.

GALVÃO, J. A. C. Balanço de energia em áreas de floresta e pastagem na Amazônia (Ji-Paraná, RO). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.15, n.2, p25-37. 2000.

GETTER, K. L.; ROWE, D. B. The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development. **HortScience**, East Lansing, v. 41, n. 5, ago. 2006.

GIANOLI, E. Plasticidad fenotípica adaptativa en plantas. In: Cabrera, H.M. **Fisiología ecológica em plantas**, p.12-25. 2004.

GONÇALVES, F.L.T. **Biometeorologia Vegetal**. Material On-Line do Departamento de Ciências Atmosféricas. USP: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. 2015.

GRACE, J. **Plant water relations**. In: Crawley MJ (ed) *Plant Ecology*. Blackwell, Oxford. 1997.

GUISARD RESTIVO, T.A. **Ensaio de condutividade térmica e difusividade térmica**. Protolab: Laboratório de Propriedades Termofísicas e Prototipação. Disponível em: <www.protolab.com.br> Acesso em: 10 jan 2016.

HENEINE, M. C. A. S. **Cobertura Verde**. Monografia (Especialização em Construção Civil). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2008.

IGRA. (Internacional Green Roofs Association). **A Quick Guide to Green Roofs**. Disponível em: <<http://www.igra-world.com/>>. Acesso: 21 mar. 2015.

_____. **Green Roof Types**. Disponível em: <<http://www.igra-world.com/>>. Acesso: 17 mar. 2015.

INMET. (Instituto Nacional de Meteorologia). **Dados Meteorológicos**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>>. 2016.

ISSA, R. J.; LEITCH, K.; CHANG, B. Experimental heat transfer study on green roofs in semiarid climate during summer. **Journal of construction engineering**, vol.2015, Article ID960538, 15 p. 2015

JARVIS, P. G.; JAMES, G. B.; LANDSBERG, J. J. Coniferous forests. In: MONTEITH, J.L. (Ed.) **Vegetation and the Atmosphere: Case Studies**. London: Academy Press, v. 2, p. 171-240, 1976.

JOBIM, A. L. **Diferentes tipos de telhados verdes no controle quantitativo da água pluvial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2013.

JOHNSTON, J; NEWTON, J. **Building green: a guide to using plants on roofs, walls and pavements**. London: Greater London Authority. Disponível em: <<http://www.buildinggreen.com>> Acesso em 20 mar. 2015.

KÖEPPEN, W. **Climatología**. México - Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica. 2º edição. 1931.

KREITH, F.; BOHN, M.S. **Princípios de transferência de calor**. 1922. Ed. Pioneira Thomson Learning, São Paulo. 2003.

L2 ARQUITETURA. **Telhado verde e redução de IPTU**. Disponível em: <<http://l2arquitetura.blogspot.com.br/>> Acesso em : 17 mar. 2015.

LEANDRO, A. M. **Avaliação da capacidade de instalação de telhados verdes na cidade de Lisboa com recurso a SIG e detecção remota**. Dissertação (Mestrado em Geografia e Ordenamento do território, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa. Lisboa. 2011.

LI, D.; BOU-ZEID, E.; OPPENHEIMER, M. The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. **Environmental Research Letters**. 2014.

LOPES, D. A. R. **Análise do comportamento térmico de uma cobertura leve (CVL) e diferentes sistemas de cobertura**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos-SP. 2007.

LORENZINI NETO, F. **Modelagem de telhado verde: Uma análise da eficiência no controle do escoamento pluvial em diferentes escalas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2014.

MACHADO, F. P. **Contribuição ao estudo do clima do Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro, IBGE, 1950.

MARTINS, G. M. **Eficientização, gestão e diagnósticos da energia elétrica**. Notas de Aula. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2012.

MARY, W. et al. Telhado verdes: Ferramenta potencial para geração de renda em áreas de fragilidade social. In. ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENEPEA, 9. **Anais...** Curitiba, Paraná, 2008.

MINKE, G. **Techos Verdes. Planificación, Ejecución, Consejos Prácticos.** Montevideu, Uruguai: Editora Fin de Siglo, 2004.

MONTEIRO, C. A. de F. **Teoria e Clima Urbano.** São Paulo: IGEOG/USP, 1976. 181p.

MORUZZI, R. B.; MOURA C. C.; BARBASSA, A. P. Avaliação do efeito da inclinação e umidade antecedente na qualidade e quantidade das parcelas escoadas, percoladas e armazenadas em telhado verde extensivo. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v. 14, n.3, jul./set. 2014.

NETO, C.B. Transferência de calor (TCL): Volume I- Parte 3. **Notas de aula.** Área Técnica de Refrigeração e Condicionamento de Ar. Instituto Federal Santa Catarina, Campus São José. 2010.

NIACHOU, A.; PAPAKONSTANTINO, K.; SANTAMOURIS, M.; TSANGRASSOULIS, A.; MIHALAKAKOU, G. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. **Energy and buildings**, v.33, p.719-729. 2001.

OBERNDORFER, E. et al. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. **BioScience**, v. 57, n. 10, p. 823-833, nov. 2007.

OKE, T.R. **Boundary layer climates.** London. Methuen & Co Ltd., 2ed. 1987. 372 p.

OLIVEIRA, M. B. L.; VON RANDOW, C.; MANZI, A. O.; ALVALÁ, R. C.; SÁ, L. D.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; SOUZA, A. Fluxos turbulentos de energia sobre o Pantanal sul matogrossense. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, p. 159-165, 2006.

PERALTA, G. **Desempenho térmico de telhas: análise de monitoramento e normalização específica.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2006.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola.** Ed. Rev. e Ampl. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Departamento de Ciências Exatas. Piracicaba, SP. 2007.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDYAMA, G. C. **Evapotranspiração.** Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

PEREIRA, O. A. **Estimativas do balanço de energia e fluxo de carbono por diferentes métodos em floresta de transição no sudoeste da Amazônia.** Tese de Doutorado (Física Ambiental). Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, MT. 2013.

PEREIRA, O. A. ; NOGUEIRA, J. S. ; ARRUDA, J. C. ; Biudes, M. S. . Descrição do método da Razão de Bowen Modificada para estimativa do Fluxo vertical de CO₂. In: José de Souza Nogueira; Erondina Azevedo de Lima. (Org.). **Coletânea Física Ambiental.** 1ed.São Paulo: Baraúna, 2011, v. 1, p. 129-137.

PERSCH, C. G. **Avaliação da eficiência de um telhado verde no controle quantitativo do escoamento pluvial.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2012.

PESSOA, Jonas O. **Qualidade e quantidade de águas pluviais escoadas a partir de telhados verdes extensivos em Santa Maria-RS.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2016.

PEZZOPANE, J. R. M.; PEDRO JÚNIOR, M. J. Balanço de energia em vinhedo de 'Niagara Rosada'. **Bragantia**, v. 62, n. 1, p. 155-161, 2003.

PILAU, F. G. ; ANGELOCCI, L. R.; SCARPARE FILHO, J. A.. Radiation balance of an orange tree in orchard and its relation with global solar radiation and grass net radiation. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 15, p. 257-266, 2007.

PILAU, F.G. **Saldo de radiação da copa de laranjeira num pomar e de renques de cafeeiros: medidas e estimativas.** Tese (Doutorado em Agronomia). ESALQ. Piracicaba, SP. 2005.

PIOVESAN, T.R. **Caracterização acústica de dois sistemas modulares de telhados verdes brasileiros.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2013.

ROLA, S. M. **A Naturação como ferramenta para a sustentabilidade de cidades: estudo da capacidade do sistema de natureza em filtrar a água de chuva.** Tese (Doutorado em Ciências de Planejamento Energético). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2008.

ROLA, S. M.; VASQUEZ, E. G.; CARVALHO, L. F. B.; LEITE da FONSECA, I. C.; FREITAS, M. A. V.; ROSA, L. P. The sustainability of construction: techniques and technologies for energy efficiency and the reduction of greenhouse gases ? methodological aspects. **WIT Transactions on Ecology and the Environment** (Online) , v. 165, p. 421-430, 2013.

ROSENZWEIG, C.; GAFFIN, S.; PARSHALL, L. **Green Roofs in the New York Metropolitan Region: Research Report.** Columbia University Center for Climate Systems Research e NASA Goddard Institute for Space Studies, 2006.

SARTORI, M. G. B. A. **O clima de Santa Maria: do regional ao urbano.** 165f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1979.

_____ A dinâmica do clima do Rio Grande do Sul: indução empírica e conhecimento científico. **Revista Terra Livre**, São Paulo, v. 1, n. 20, p. 27-49, jan./jul. 2003.

SEARS, F; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. – **Física.** Volumes 1 e 2, Editora Pearson Education, 12ª edição, 2008.

SENA, J. C. L. **Estudo das componentes do balanço de Energia em uma cultura de arroz Irrigado no sul do Brasil**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia na Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2012.

SENA, J. C. L. ; CARNEIRO, J. ; TEICHRIEB, C. ; SEHENEN, J. ; ROBETI D. ; ZIMERMANN, H. R. ; WEBLER, G. . Análise das componentes do balanço energético numa lavoura de arroz irrigado. In: Julio Cesar Lopes Sena, 2011, Santa Maria. **VII Brazilian Micrometeorology Workshop**. Santa Maria: Editora UFSM, 2011. v. 33. p. 143-146.

SILANS, A. M. B. P.; MONTENY, B. A.; LHOMME, J. P. Um estudo experimental do balanço de energia e dos fluxos de calor acima da vegetação da caatinga. XII CONGRESSO DE METEOROLOGIA. **Anais**. Foz do Iguaçu, 2002.

SILVA, D. T. **Instalação e avaliação de um telhado verde em relação à utilização das espécies *Gazania rigens* e *Kalanchoe blossfeldiana* na cidade de Santa Maria-RS**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Florestal) Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2010.

SILVA, F. M.; ANDRADE, R. L. Comportamento energético do sistema vegetação – atmosfera no bioma caatinga. **Sociedade e Território**, Natal, v.25, nº2, EDIÇÃO ESPECIAL, p.17-28, jul./dez. 2013.

SILVA, M. A. V. **Meteorologia e Climatologia**. Versão Digital 2. INMET. Recife, Pernambuco. 2006.

SILVA, N. C. **Telhado Verde [manuscrito]: sistema construtivo de maior eficiência e menor impacto ambiental**. Monografia de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2011.

SNODGRASS, E; SNODGRASS, L. **Green Roof Plants: A Resource and Planting Guide**. Portland: Timber Pres Inc, 2006. 220p.

SPANGENBERG, J. **Melhoria do clima urbano nas metrópoles tropicais - Estudo de caso**. 2004. Disponível em: <[http:// www.basis id.de /site2006/ science/01](http://www.basis id.de /site2006/ science/01)> – Site traduzido. Acesso em: 10 mar. 2015.

STUDIO CIDADE JARDIM. **Telhados Verdes**. Disponível em: <<http://www.studiocidadejardim.com.br>>. Acesso em: 21 fev. 2015.

SUN, T.; BOU-ZEID, E.; WANG, Z-H.; ZERBA, E.; NI, G-H. Hydrometeorological determinants of green roof performance via a vertically-resolved model for heat and water transport. **Building Environment**. 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3^oed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

TASSI, R.; TASSINARI, L. C. da S.; ALLASIA, D. G.; PERSCH, C. G. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 139-154, jan./mar. 2014.

TASSINARI, L. C. S.; BASSO R. E.; PERIUS, C. F.; SILVA, D. T.; PERSCH, C. G.; TASSI, R. ALLASIA, D.G. Influência da pluviometria sobre a persistência das espécies *Gazania rigens* e *Kalanchoe blossfeldiana* como cobertura vegetal de um telhado verde. In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Bento Gonçalves, RS. **Anais...** 2013.

TOMAZ, P. “**BMP’s (Best Management Practices)**. São Paulo: Livro Digital. Capítulo 10- Telhado verde. 2005. Disponível em: <<http://pliniotomaz.com.br>>. Acesso em: 22 mar. 2015.

_____. **Evapotranspiração**. São Paulo: Livro Digital. Capítulo 5- Método de Penman-Monteith FAO, 1998 para evapotranspiração de referência ETo. 2008. Disponível em: <<http://pliniotomaz.com.br>>. Acesso em: 22 mar. 2015.

VALENTINI, D.R. Planejamento ambiental para o campus da UFSM – Santa Maria-RS. In: XVI ENCONTRO NACIONAL ANPUR. Belo Horizonte. **Anais...** . 2015.

VECCHIA, F. Cobertura verde leve (CVL): Ensaio experimental. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC) e IV ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ELACAC). Maceió. **Anais...** .2005.

VILANI, M.T.; SANCHES, L.; PINHEIRO, M.R.; JUNIOR, O.B.P. Estimativa da radiação de onda longa incidente em uma floresta semidecídua tropical da Bacia Amazônica. **Ciência e Natura**. UFSM, p.65-81. 2010.

VILELA, S. **Telhados verdes: pequenos pulmões para grandes cidades**. 2011. Disponível em: <http://www.dw-world.de/dw/article/0,,1772334_page_2,00.html>. Acesso em: 21 mar. 2015.

ZHAO, M.; TABARES-VELASCO, P. C.; SREBRIC, J.; KOMARNENI, S. Comparison of green roof plants and substrates based on simulated green roof thermal performance with measured material properties. In: 13th CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION. Chambéry, França. **Anais...** 2013.

WANG, Z. H.; BOU-ZEID, E.; SMITH, J. A. A coupled energy transport and hydrological model for urban canopies evaluated using a wireless sensor network. **Q J R Meteorology Soc**. 2013.

WILLES, J. A. **Tecnologias em telhados verdes extensivos: meios de cultura, caracterização hidrológica e sustentabilidade dos sistema**. Tese (Doutorado em Ciências: Fitotecnia). Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, SP. 2014.

WILSON, K.B., HANSON, P.J., BALDOCCHI, D. D. Factors controlling evaporation and energy balance partitioning beneath a deciduous forest over an annual cycle. **Agricultural Forest. Meteorology**. v. 102, p. 83–103. 2000.

APÊNDICE A – VARIAÇÃO DIÁRIA DO ALBEDO SOBRE UM TELHADO VERDE EXPERIMENTAL EM SANTA MARIA-RS

RESUMO SUBMETIDO À XXXI JORNADA ACADÊMICA INTEGRADA E VII SALÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO. Autores: Palmeira, A.N.¹(PG); Tassi, R.¹(O); Webler, G.²(C); Teichrieb, C.A.²(C); Roberti, D.R.²(C).

¹Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria; ²Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Maria.

O albedo é caracterizado pelas condições de reflexão de uma superfície. Refere-se à razão entre a radiação eletromagnética refletida pela superfície e a incidente, e pode ser variável dentro de um ano, ou mesmo do dia. Trata-se de um componente de suma importância para o cálculo do balanço de radiação e energia. Apesar disso, verifica-se escassez de dados de albedo para diferentes superfícies, e ocorre devido, principalmente, às dificuldades operacionais e ao custo elevado dos equipamentos necessários à realização das medições. Diante dessa dificuldade, muitos pesquisadores utilizam dados médios de albedo, sem considerar o horário ou dia do ano. No entanto este procedimento pode influenciar diretamente o resultado das pesquisas conduzidas neste sentido, pois tal parâmetro é dependente de diversos fatores, que resultam em diferentes valores de albedo durante o período analisado. Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar as variações diurnas e diárias do albedo de um telhado verde extensivo experimental, coberto com uma espécie *Sedum* situado na Universidade Federal de Santa Maria, em Santa Maria-RS. Durante os meses de janeiro a março de 2016 foram realizadas medições de radiação solar incidente e refletida (0,3 a 3 μm) sobre a superfície vegetada do telhado. Para a medição dessas radiações foram instalados piranômetros, -modelos CMB6 e CMP3 (Kipp & Zonen)- a uma altura de aproximadamente 30 cm da superfície do telhado. Um dos piranômetros foi direcionado para cima, e o outro para baixo, de maneira a captar as duas radiações de interesse. Para a aquisição e armazenamento contínuo dos dados foi utilizado um datalogger CR1000 (Campbell Scientific, Inc.), o qual foi programado para efetuar a leitura e o armazenamento a cada minuto. Posteriormente foram determinadas as médias dos dados a cada hora, e após a análise da consistência, foi determinado o albedo instantâneo da superfície, dividindo-se os valores da radiação refletida pelos valores da radiação incidente. Também foram realizadas análises diurnas instantâneas e médias, das 9h às 17h, para dias com e sem a presença de nebulosidade. O horário compreendido é o ideal para pesquisas referentes ao albedo durante os meses estudados, pois inclui aqueles de maior insolação. Em análise aos valores médios diários da radiação solar incidente pôde-se perceber que, em geral, valores mais altos foram observados no horário das 11h às 12h durante o mês de janeiro. O mesmo comportamento foi observado para a radiação solar refletida. Ao serem apreciados os resultados do albedo, estes mostraram que os picos oscilaram entre as 16h e 17h no período estudado, chegando até 0,42 no dia 27/01 às 17h. Os valores relativos médios de albedo determinados foram de 0,20 para janeiro e 0,18 para fevereiro e março. Quando analisados separadamente, foi encontrada uma diferença de 0,01 a 0,03 para o albedo, no que se refere à presença ou não de nuvens. Dessa forma conclui-se que existe uma variação temporal do albedo, associada ao ângulo de elevação solar e às condições de nebulosidade, além da radiação solar incidente. Sugere-se uma análise da fisiologia da planta utilizada, e seu comportamento fotossintético, para investigação da sua influência quanto à determinação dos valores de albedo.