



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

FERNANDO KIT WU

**DESENVOLVIMENTO DE UM LISÍMETRO DE PESAGEM ELETRÔNICA DE  
BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM TELHADO  
VERDE EXTENSIVO**

Florianópolis  
2023

FFERNANDO KIT WU

**DESENVOLVIMENTO DE UM LISÍMETRO DE PESAGEM ELETRÔNICA DE  
BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM TELHADO  
VERDE EXTENSIVO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de  
Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Ambiental

Orientadora: Profa. Alexandra Rodrigues Finotti, Dra.

Coorientadora: Profa. Patrícia Kazue Uda, Dra.

Florianópolis

2023

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

Wu, Fernando Kit  
Desenvolvimento de um lisímetro de pesagem eletrônica de baixo custo para medição da evapotranspiração em telhado verde extensivo / Fernando Kit Wu ; orientador, Alexandra Rodrigues Finotti, coorientador, Patrícia Kazue Uda, 2023.  
167 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Manejo de águas pluviais urbanas. 3. Telhados verdes. 4. Evapotranspiração. 5. Lisímetro de pesagem de baixo custo. I. Finotti, Alexandra Rodrigues . II. Uda, Patrícia Kazue. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. IV. Título.

FERNANDO KIT WU

**DESENVOLVIMENTO DE UM LISÍMETRO DE PESAGEM ELETRÔNICA DE  
BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM TELHADO  
VERDE EXTENSIVO**

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

Andy Blanco Rodriguez, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Bernardo Barbosa da Silva, Dr.  
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Rodrigo de Almeida Mohedano, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Rutineia Tassi, Dra.  
Universidade Federal de Santa Maria

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado  
para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental

---

*Coordenação do Programa de Pós-Graduação*

---

*Profa. Alexandra Rodrigues Finotti, Dra.  
Orientadora*

---

*Profa. Patrícia Kazue Uda, Dra.  
Coorientadora*

Florianópolis, 2023.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, que sem o incentivo e suporte deles, certamente não teria concluído esta etapa nos estudos.

Aos meus amigos, Pedro, Anzolin, Bia, Paula, Kelvin, Paulo, Aurélio, amigos do grupo Lado direito da sala, Gamenight, Gangue do natal, Fejuwi, pela amizade e por proporcionarem momentos de alegria na minha vida.

Às professoras Alexandra e Patrícia, pela confiança depositada em mim e pela orientação dada ao trabalho.

À Jéssica, Thiago, Gabriel, Júlia, João e demais integrantes do LAUTEC e LAHIMAR, pela ajudada dada na montagem do trabalho experimental.

Ao João Henrique de Sá, João Claudio e Andy Blanco pelo auxílio dado em sanar as dúvidas que surgiram com o uso dos componentes eletrônicos e do Arduino.

À banca avaliadora deste trabalho, pelas contribuições valiosas dadas a este trabalho.

Ao LABHIDRO e EPAGRI pela disponibilização dos dados de precipitação e meteorológicos utilizados na pesquisa.

Ao programa de pós-graduação pelo auxílio dado na aquisição de materiais para o experimento.

À CNPq pela bolsa de mestrado concedida.

Aos professores que transferiram os seus conhecimentos e a todos que indiretamente contribuíram ao meu crescimento profissional e pessoal durante os anos da pós-graduação. Muito obrigado!

## RESUMO

Telhados verdes são sistemas que possibilitam um melhor manejo das águas pluviais urbanas em diferentes locais do mundo. A capacidade de armazenamento de volumes de precipitação nesses sistemas é influenciada por alguns fatores, sendo a evapotranspiração de grande importância. Um melhor entendimento sobre esse fenômeno pode, ainda, auxiliar na determinação da necessidade, ou não, de irrigação e na escolha de tipos de vegetação e de substratos. Pelo número limitado de estudos nessa área e por tratar-se de um fenômeno complexo que depende de fatores climáticos locais, assim como características construtivas desses sistemas, mais investigações são necessárias. Uma das formas mais recomendadas de determinação da evapotranspiração é por meio dos lisímetros de pesagem, porém, esses equipamentos costumam ser de alto custo e demandam pessoal qualificado para a sua operação e manutenção e necessitam de cuidados na sua instalação. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi de desenvolver, instalar e operar lisímetro de pesagem eletrônica de baixo custo para a determinação da evapotranspiração em telhados verdes do tipo extensivo, compatibilizando características construtivas de lisimetria e de telhados verdes, assim como eletrônica aberta e materiais de baixo custo disponíveis no mercado. O lisímetro construído foi instalado na Universidade Federal de Santa Catarina, campus Trindade (Florianópolis –SC), e monitorou entre março e junho de 2023 os dados de peso e de volume escoado pelo dreno de uma parcela de telhado verde com área de 0,74 m<sup>2</sup>, tipo extensivo (10 cm de substrato), vegetação gramínea. Como resultado da operação do lisímetro proposto, foram obtidos 74 valores de evapotranspiração diária. Foi possível observar que a evapotranspiração em dias sem escoamento pelo dreno representou cerca de 42% das entradas na parcela de telhado verde monitorado. Em relação à influência do módulo de telhado verde na diminuição da geração de escoamento superficial, foi observado que o módulo de telhado verde reteve cerca de 74% do acumulado dos dez maiores eventos do período (61 mm dos 83 mm da precipitação acumulada) e um tempo de retardo do escoamento variando entre 20 a 650 minutos. Considera-se que a configuração do lisímetro apresentada possui potencial para replicação, viabilizando o desenvolvimento de mais estudos, ainda que na realidade dos países em desenvolvimento como no caso do Brasil, para investigar a utilização de telhados verdes como medidas de drenagem urbana sustentável.

**Palavras-chave:** Manejo de águas pluviais urbanas. Telhados verdes. Evapotranspiração. Lisímetro de pesagem de baixo custo

## ABSTRACT

Green roofs are systems that enable better stormwater management in different parts of the world. The storage capacity of stormwater volumes in these systems is influenced by some factors, evapotranspiration being one of the most important. A better understanding of this phenomenon can help to determine the need or not for irrigation and the choice of vegetation types and substrates. Due to the limited number of studies in this area and because it is a complex phenomenon that depends on local climatic factors, as well as constructive characteristics of these systems, further investigations are needed. One of the most recommended ways to determine evapotranspiration is through weighing lysimeters, however, these equipments are usually expensive and require qualified personnel for their operation and maintenance and need special care in their installation. Thus, the objective of this work was to develop, install and operate low-cost electronic weighing lysimeter for determining evapotranspiration on extensive green roof, making constructive characteristics of lysimetry and green roofs compatible, as well as open source electronics and low cost available construction materials. The built lysimeter was installed at the Federal University of Santa Catarina, Trindade campus (Florianópolis – SC), which monitored the weight and drained volume from a green roof plot with an area of 0.74 m<sup>2</sup>, extensive type (10 cm of substrate), grassy vegetation, between March and June 2023. As result of the operation of the proposed lysimeter, we obtained 74 daily evapotranspiration values. It was possible to observe that evapotranspiration on days without drainage through the drain represented around 42% of the inputs in the monitored green roof plot. Regarding the influence of the green roof module in reducing the generation of surface runoff, the green roof module retained around 74% of the accumulated amount of the ten largest events of the period (61 mm of the 83 mm of accumulated precipitation) and a flow delay time varying between 20 and 650 minutes. The configuration of the lysimeter presented showed potential for replication, enabling the development of more studies, even in the reality of developing countries as in the case of Brazil, to investigate the use of green roofs as sustainable urban drainage structures.

**Keywords:** Stormwater management. Green roofs. Evapotranspiration. Low cost weighing lysimeter.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formas de instalação de um telhado verde .....	25
Figura 2 - Camadas constituintes de um telhado verde .....	26
Figura 3 – Valores máximos, mínimos e as médias de ETo estimados por Rincón (2018)...	32
Figura 4 - Principais componentes dos lisímetros de percolação (a) e de pesagem (b) .....	45
Figura 5 - Influência da área e do formato de um lisímetro .....	46
Figura 6 - Configurações do sistema de sistema de medição de peso testadas por Amaral et al. (2018.a): MS1(a), MS2(b), MS3(c) e MS4 (d).....	49
Figura 7 - Representação gráfica da não linearidade (a) e histerese (b).....	51
Figura 8 - Fluxograma metodológico do trabalho .....	56
Figura 9 – Principais elementos constituintes do lisímetro .....	58
Figura 10 - Visão geral do conjunto lisimétrico planejado .....	59
Figura 11 - Elementos básicos da instrumentação do lisímetro .....	60
Figura 12 – Componentes do Arduino UNO R3 .....	62
Figura 13 - Configurações das pontes de Wheatstone (a) $\frac{1}{4}$ de ponte; (b) $\frac{1}{2}$ ponte; (c) ponte diagonal; (d) ponte completa .....	63
Figura 14 – Célula de carga selecionada para o lisímetro .....	64
Figura 15 – Sensores de temperatura e umidade DHT22/AM2302 .....	65
Figura 16 – ADCs utilizados a) HX711 vermelho (com blindagem) e b) HX711 verde .....	67
Figura 17 - Sensor de distância HC-SR04 conectado ao Arduino UNO.....	68
Figura 18 – <i>Datalogger shield</i> para Arduino UNO .....	68
Figura 19 – Representação do divisor de tensões utilizado.....	70
Figura 20 – Esquema representando a calibração eletrônica.....	71
Figura 21 – Plataforma de carga utilizada na calibração, com (a) imagem da plataforma (b) esquema de conexão SP-1 (c) esquema de conexão SP-2 .....	72
Figura 22 – Obtenção de objetos com pesos conhecidos para a calibração .....	73
Figura 23 – Montagem da curva de calibração. Ciclos de carregamento e descarregamento com sinais brutos (a) e sinais convertidos para mV (b). Exemplo de curva de calibração (c).....	75
Figura 24 - Montagem da estrutura do lisímetro .....	78
Figura 25 - Calibração do sistema de medição de peso do lisímetro em ambiente protegido .	79

Figura 26 - Localização das estações meteorológicas próximos ao lisímetro .....	80
Figura 27 - Registros fotográficos da montagem das camadas do módulo .....	81
Figura 28 – Vistas superior e frontal do lisímetro .....	90
Figura 29 - Corte A-A' com detalhes dos módulos de telhado verde e do lisímetro .....	91
Figura 30 - Curva cota-volume do reservatório de saída do lisímetro .....	96
Figura 31 - Comportamento das células LC3, LC5, LC6, LC11 e LC12 no teste de repetitividade com monitoramento da temperatura .....	98
Figura 32 - Comportamento do teste de repetitividade do lisímetro utilizando as células de carga LC3, LC5, LC6, LC11 .....	100
Figura 33 - Precipitação no período monitorado .....	103
Figura 34 – Temperatura do ar no período monitorado.....	104
Figura 35 – Radiação solar no período monitorado .....	105
Figura 36 – Velocidade do vento no período monitorado .....	105
Figura 37 – Umidade relativa do ar no período monitorado .....	105
Figura 38 - Comportamento das precipitações, das regas e dos dados medidos pelo lisímetro no período monitorado .....	107
Figura 39 - Condensação na tampa do reservatório do volume escoado pelo dreno.....	109
Figura 40 – Valores de evapotranspiração obtidos por lisimetria e por estimativa ao longo do período de monitoramento.....	110
Figura 41 - Evapotranspiração obtida pelo método 1 e pelo método 2 quando comparado com a evapotranspiração obtida pelo método 3 .....	112
Figura 42 - Comportamento da evapotranspiração mensurada e estimada ao longo do período monitorado, excetuando dias 16 a 18/06 .....	114
Figura 43 - Comportamento da evapotranspiração estimada após ajustes com coeficientes mensal e geral .....	117
Figura 44 - Peso e escoamento pelo dreno do módulo de telhado verde ao longo do evento de precipitação 03.....	120
Figura 45 - Registros das dificuldades encontradas no lisímetro em campo.....	123

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Testes realizados com os componentes do lisímetro desenvolvido.....	69
Quadro 2 - Testes de repetitividade dos sistemas de medição em ambiente protegido.....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características de telhado verde do tipo extensivo, semi-intensivo e intensivo .....	25
Tabela 2 – Valores de evapotranspiração de telhados verdes obtidos experimentalmente .....	41
Tabela 3 – Procedimentos das calibrações do sistema de pesagem em ambiente protegido ...	74
Tabela 4 - Procedimentos de calibração realizados no lisímetro em campo .....	84
Tabela 5 - Classificação do desempenho dos índices KGE, NSE .....	89
Tabela 6 - Avaliação das calibrações eletrônicas .....	93
Tabela 7 - Resultado das calibrações do sistema de pesagem em ambiente protegido .....	94
Tabela 8 - Resultado das calibrações do sistema de pesagem do lisímetro em campo .....	101
Tabela 9 - Comportamento mensal das precipitações no período monitorado .....	103
Tabela 10 - Valores de evapotranspiração encontrados experimentalmente em telhados verdes com vegetação gramínea. ....	113
Tabela 11 – Valores acumulados de evapotranspiração monitorados e estimados e entradas (rega ou precipitação) durante o período do estudo .....	115
Tabela 12 - Coeficientes de ajuste combinado .....	116
Tabela 13 - Índices NSE, KGE, R <sup>2</sup> e RMSE após ajustes da evapotranspiração estimada por FAO PM com uso de coeficientes de ajuste do estudo .....	117
Tabela 14 – Características dos eventos de precipitação observados na estação do LABHIDRO .....	118
Tabela 15 - Análise dos dados do lisímetro com os eventos identificados .....	119

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

°	grau
°C	grau Celsius
a.C	antes de Cristo
ADC	analog-to-digital converter (conversor analógico-digital)
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ASCE	American Society of Civil Engineers (Sociedade Americana de Engenheiros Civis)
BU	Biblioteca Universitária
CAM	crassulacean acid metabolism (metabolismo de ácido das crassuláceas)
CC	corrente contínua
CETRE	Centro de Treinamento de Florianópolis
cm	centímetro
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
EMA	erro máximo absoluto
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
ET	evapotranspiração
ETc	evapotranspiração sob condições padrão
ETc adj	evapotranspiração sob condições não padrão
ETo	evapotranspiração de referência
EUA	Estados Unidos da América
FAO	(Food and Agriculture Organization) Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organização para a Alimentação e Agricultura das Nações Unidas)
g	grama
IDE	integrated development environment (ambiente integrado de desenvolvimento)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
kc	coeficiente de cultura
K <sub>comb</sub>	coeficiente de ajuste combinado
kg	quilograma
KGE	Kling-Gupta Efficiency
ks	coeficiente de estresse hídrico
kΩ	quiloohm
L	litro
LABHIDRO	Laboratório de Hidrologia



LC	load Cell (célula de carga)
LED	light-emitting diode (diodo emissor de luz)
m	metro
m <sup>2</sup>	metro quadrado
m <sup>3</sup>	metro cúbico
mA	miliampère
mHz	megahertz
mm	milímetro
mV	milivolt
NSE	Nash-Sutcliffe
OSHWA	Open Source Hardware Association (Associação de Hardware de código aberto)
PR	Paraná
PVC	polyvinyl chloride (policloreto de vinila)
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação por largura de pulsos)
R\$	Real
R <sup>2</sup>	coeficiente de determinação
RMSE	root-mean-square deviation (raiz quadrática média)
RTC	real time clock (relógio em tempo real)
SC	Santa Catarina
SEE	standard error of estimate (erro padrão da estimativa)
TDR	time domain reflectometry (Reflectometria no domínio do tempo)
USD	Dólar norte-americano
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USB	universal serial bus (porta serial universal)
USEPA	United States Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)
V	volt
Ω	ohm

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1	OBJETIVO GERAL .....	20
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>20</b>
1.2	JUSTIFICATIVA .....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
2.1	TELHADOS VERDES .....	23
<b>2.1.1</b>	<b>Composição dos telhados verdes.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Comportamento hidrológico dos telhados verdes no Brasil .....</b>	<b>29</b>
2.2	EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	33
<b>2.2.1</b>	<b>Quantificação da evapotranspiração.....</b>	<b>34</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Evapotranspiração em telhados verdes.....</b>	<b>36</b>
2.3	LISÍMETROS .....	44
<b>2.3.1</b>	<b>Calibração e especificações de lisímetro de pesagem eletrônica.....</b>	<b>47</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Custos da instrumentação de lisímetros e eletrônica aberta.....</b>	<b>52</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>56</b>
3.1	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO LISÍMETRO.....	57
3.2	INSTRUMENTAÇÃO DO LISÍMETRO .....	60
<b>3.2.1</b>	<b>Arduino UNO R3 .....</b>	<b>61</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Célula de carga CZL635-3135 .....</b>	<b>62</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Sensor de temperatura e umidade AM2302 .....</b>	<b>64</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Conversor analógico-digital (ADC) HX711 .....</b>	<b>66</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Sensor de distância HC-SR04 .....</b>	<b>67</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Datalogger Shield .....</b>	<b>68</b>
<b>3.2.7</b>	<b>Fonte de Alimentação .....</b>	<b>68</b>

3.3	TESTES E PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO EM AMBIENTE PROTEGIDO .....	69
3.3.1	<b>Calibração eletrônica dos ADCs.....</b>	<b>70</b>
3.3.2	<b>Calibração do sistema de pesagem em ambiente protegido.....</b>	<b>71</b>
3.3.3	<b>Calibração do sensor de distância em ambiente protegido.....</b>	<b>75</b>
3.3.4	<b>Teste de repetitividade.....</b>	<b>76</b>
3.4	CONSTRUÇÃO DO LISÍMETRO .....	78
3.5	INSTALAÇÃO DO LISÍMETRO EM CAMPO E SUA OPERAÇÃO.....	79
3.6	ACOMPANHAMENTO DA INSTRUMENTAÇÃO EM CAMPO .....	83
3.7	TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS NO LISÍMETRO...	84
3.7.1	<b>Estimativa da evapotranspiração por balanço de massa .....</b>	<b>85</b>
3.7.2	<b>Comportamento hidrológico do módulo de telhado verde monitorado.....</b>	<b>89</b>
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>90</b>
4.1	VISÃO GERAL DO LISÍMETRO CONSTRUÍDO .....	90
4.2	TESTES PARA PLANEJAMENTO E AJUSTES DA INSTRUMENTAÇÃO ....	93
4.2.1	<b>Resultados da calibração eletrônica dos ADCs .....</b>	<b>93</b>
4.2.2	<b>Resultados das calibrações em Ambiente protegido.....</b>	<b>93</b>
4.2.3	<b>Resultados dos testes de repetitividade (LCs separadas, LC no lisímetro e sensor de distância) .....</b>	<b>97</b>
4.2.4	<b>Resultados das calibrações e aferições dos sistemas de medição em campo ..</b>	<b>101</b>
4.3	DADOS CLIMÁTICOS NO PERÍODO MONITORADO .....	102
4.4	DADOS DO LISÍMETRO NO PERÍODO MONITORADO .....	106
4.4.1	<b>Evapotranspiração monitorada pelo lisímetro nos dias sem chuva .....</b>	<b>110</b>
4.4.2	<b>Coefficientes de ajustes .....</b>	<b>116</b>
4.4.3	<b>Análise da influência do módulo de telhado verde na redução do escoamento superficial.....</b>	<b>118</b>

4.5	CUSTOS DO LISÍMETRO CONSTRUÍDO .....	120
4.6	DIFICULDADES ENCONTRADAS .....	121
5	CONCLUSÕES.....	124
	REFERÊNCIAS.....	126
	ANEXO A – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS – CÉLULA DE CARGA CZL635-3135 .....	136
	ANEXO B – FOLHA DE DADOS DO ADC HX711.....	137
	APÊNDICE A - SÉRIE DE RESISTÊNCIAS DO DIVISOR DE TENSÕES UTILIZADO NA CALIBRAÇÃO ELETRÔNICA.....	147
	APÊNDICE B – ESQUEMATICO DA PLACA DE FENOLITE COM TRILHOS PARA CONEXÃO DOS SENSORES AO ARDUINO.....	148
	APÊNDICE C – PROGRAMAÇÃO UTILIZADA NO ARDUINO PARA O LISÍMETRO DESENVOLVIDO .....	149
	APÊNDICE D – CURVAS DE CALIBRAÇÃO ELETRÔNICA .....	154
	APÊNDICE E – CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE DISTÂNCIA .....	155
	APÊNDICE F – RESULTADOS DO PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE DISTÂNCIA E MÉTRICAS APÓS CORREÇÃO UTILIZANDO AS CURVAS DE CALIBRAÇÃO .....	156
	APÊNDICE G – RESULTADOS DO TESTE DE REPETITIVIDADE EM AMBIENTE PROTEGIDO .....	157
	APÊNDICE H – CURVAS DAS CÉLULAS DE CARGA REPROVADAS NO TESTE DE REPETITIVIDADE .....	158
	APÊNDICE I – VALORES DIÁRIOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO QUANTIFICADA, ESTIMADA E DE PRECIPITAÇÃO OU REGA DURANTE O PERÍODO DE MONITORAMENTO .....	160

<b>APÊNDICE J – PESO E ESCOAMENTO PELO DRENO DO MÓDULO DE TELHADO VERDE EM EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO MAIORES QUE 0.5 MM .....</b>	<b>163</b>
<b>APÊNDICE K - PESO E ESCOAMENTO PELO DRENO DO MÓDULO DE TELHADO VERDE EM EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO MENORES OU IGUAIS A 0.5 MM .....</b>	<b>165</b>
<b>APÊNDICE L – CUSTO DE MATERIAL UTILIZADO NO LISÍMETRO DESENVOLVIDO .....</b>	<b>167</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas clássicos de drenagem urbana tem como base os preceitos de técnicas higienistas, as quais objetivam a retirada rápida das águas acumuladas. Na abordagem clássica, ainda predominante em alguns meios técnicos, estão inclusos sistemas de galerias pluviais e ações para “melhoria do fluxo” em cursos d’água por meio de cortes de meandros, retificações e mudanças de declividade do fundo. No entanto, devido ao processo da urbanização resultante do crescimento das cidades, surgem limitações nessa abordagem, como pontos da rede se tornando insuficientes periodicamente, sendo necessário medidas como alargamento de rios e substituição de galerias por maiores dimensões, transferindo problemas de enchente nas áreas urbanas para a jusante ou para o futuro (POMPÊO, 2000; BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2011).

Se contrapondo à abordagem higienista da drenagem urbana, as técnicas compensatórias surgem, na década de 1970, como técnicas de controle na fonte, possibilitando um melhor manejo das águas pluviais. As técnicas ou tecnologias compensatórias em drenagem urbana visam diminuir o volume escoado e aumentar o tempo de percurso nos sistemas de drenagem, favorecendo a infiltração e armazenamento temporário da água da chuva (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2011). Dentre essas técnicas, encontram-se os sistemas de telhados verde, utilizados em vários locais do mundo, mais comumente na América do Norte, na Europa (DEPARTMENT OF PLANNING AND LOCAL GOVERNMENT, 2010) e na Austrália, possibilitando um melhor manejo das águas pluviais urbanas. Telhados verdes, diferente das demais técnicas compensatórias, possuem como vantagem a possibilidade de serem instalados sobre coberturas de edificações existentes (BERNDTSSON, 2010).

Telhados verdes são, sucintamente, sistemas construídos sobre a cobertura visando manter uma camada vegetativa viva sobre ela (VIJAYARAGHAVAN, 2016). Esses sistemas podem proporcionar benefícios como melhoria da qualidade do ar, diminuição das ilhas de calor, diminuição do volume e retardo do escoamento (GETTER; ROWE, 2006), assim como uma diminuição da temperatura interna dos ambientes, entre outros.

A Evapotranspiração (ET), nessas estruturas, além de influenciar em alguns desses benefícios (FENG, 2018; CASCONI et al., 2019), auxilia na determinação da necessidade, ou não, de irrigação e na escolha de tipos de vegetação e de substratos (SKABELUND; DIGIOVANNI; STARRY, 2015) mais adequados para um determinado local. No que se refere

ao controle do escoamento superficial pelos telhados verdes, a ET está associada à recuperação do potencial de retenção do sistema (BÄR; TAVARES, 2017). Pelo número limitado de estudos nessa área e por tratar-se de um fenômeno complexo que depende de fatores climáticos locais, assim como características construtivas desses sistemas, são necessárias mais investigações com a finalidade de melhor compreender o fenômeno da ET nos telhados verdes (DIGIOVANNI et al., 2013; CASCONI et al., 2019).

A ET, transferência de vapor d'água para a atmosfera em superfícies vegetadas ou com presença de água, pode ser determinada diretamente, por medições, ou indiretamente, por meio de equações que se fundamentam em teorias de transferência de massas de ar, balanço energético ou combinações destas, assim como, pode ser estimada por equações empíricas (JENSEN; ALLEN, 2016; NOURI et al., 2013). DiGiovanni et al. (2013) apontam que as estimativas de ET por métodos indiretos necessitam de valores medidos, seja para validar o método empírico o qual foi concebido para uma determinada condição climática, seja para adequar as estimativas de ET para condições diferentes das quais foram inicialmente propostas (grande disponibilidade hídrica ou cultura padrão, por exemplo).

Uma das formas mais precisas para determinação da ET é por meio de lisímetros, que medem diretamente a ET. Lisímetros são recipientes com volume de solo conhecido, no qual é possível monitorar o movimento da água, entre outros parâmetros (HOWELL; SCHNEIDER; JENSEN, 1991). Dentre os diferentes tipos de lisímetros, os de pesagem eletrônica permitem a quantificação direta da ET por meio da diferença de massa de um conjunto solo-planta em um determinado intervalo de tempo (HOWELL, 2005).

Porém, esses equipamentos possuem características que, se não consideradas na sua concepção, podem causar erros de interpretação em medidas de massa de água (CAMPECHE, 2002; HOWELL, 2005) e costumam ter alto custo de aquisição e instalação (ALLEN; FISHER, 1990; FISHER, 2012), restringindo seu uso a trabalhos específicos, especialmente em países em desenvolvimento, como o Brasil (FELTRIN et al., 2017).

Os lisímetros utilizados para a quantificação da ET são normalmente utilizados em estudos de necessidade hídrica na agricultura, e possuem uma vasta documentação que podem auxiliar nos trabalhos com abordagens semelhantes (HOWELL, 2005; HOWELL; SCHNEIDER; JENSEN, 1991; HOWELL; MCCORMICK; PHENE, 1985). As recomendações desses materiais são, na sua maioria, no sentido de guiar a concepção dos lisímetros para que os mesmos sejam representativos para a área que se deseja estudar.

Telhados verdes do tipo extensivo possuem características como vegetação gramínea ou de pequeno porte e substrato com profundidade rasa (BERNDTSSON, 2010). Em função dessas características, lisímetros empregados para estudo da ET nesses sistemas podem ter volume e peso menor a serem monitorados, se comparados a lisímetros com mesma área superficial caso fossem utilizados na agricultura, por exemplo. Assim, há a possibilidade de usar equipamentos com menor capacidade de medição, resultando em menores custos de instalação e operação.

Aliado a isso, com o avanço da eletrônica e o surgimento de equipamentos *open-source*, áreas como aquisição de dados ambientais e meteorológicos (ALI et al., 2016; ORTIZ, 2019), análise química (GRINIAS et al., 2016), lisimetria (MERINO, 2016; VILELA et al., 2015) e diversas outras, foram beneficiadas devido à capacidade de customização daqueles e de incluir sensores e atuadores de design simples e modular (URBAN, 2015).

Este trabalho visa desenvolver, instalar e operar lisímetro de pesagem eletrônica de baixo custo para o monitoramento da evapotranspiração em telhados verdes do tipo extensivo. O estudo faz parte de uma linha de pesquisas do Laboratório de Águas Pluviais Urbanas e Técnicas Compensatórias (LAUTEC) da Universidade Federal de Santa Catarina que se dedica às técnicas compensatórias em drenagem urbana. Com os resultados do trabalho, espera-se obter um equipamento de baixo custo capaz de monitorar a evapotranspiração de uma parcela de telhado verde, possibilitando o desenvolvimento de mais estudos, principalmente para a realidade dos países em desenvolvimento como no caso do Brasil, para avançar na compreensão e quantificação da importância da evapotranspiração no controle do escoamento superficial através do uso de telhados verdes, frente à complexidade e à importância desse fenômeno.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um lisímetro de pesagem eletrônica de baixo custo para a determinação da evapotranspiração em telhados verdes do tipo extensivo

### 1.1.1 Objetivos Específicos

- Planejar os componentes de um lisímetro de pesagem eletrônica para determinar a ET em telhados verdes do tipo extensivo;



- Testar componentes, construir e operar lisímetro de pesagem eletrônica para determinar a ET em módulos de telhado verde do tipo extensivo;
- Analisar a evapotranspiração obtida por métodos de balanço de massa, usando dados do conjunto lisimétrico.
- Comparar os dados de evapotranspiração monitorados pelo lisímetro com os estimados pelo método FAO Penman-Monteith e propor coeficientes de ajuste da evapotranspiração
- Analisar a influência do módulo de telhado verde construído para a redução do escoamento superficial

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O crescimento do interesse no uso de telhados verdes se deve, possivelmente, aos múltiplos benefícios que essas tecnologias podem trazer. Porém, devido ao apelo comercial que essas técnicas ganharam, muitos dos telhados verdes comercializados têm o enfoque no benefício estético em detrimento dos outros. Se tratando de uma compensatória em drenagem, os telhados verdes apresentam uma grande vantagem de controle de escoamento superficial e podem ser implantados inclusive em locais em que a infiltração pode ser difícil ou não recomendada, como no caso das coberturas das edificações (BERNDTSSON, 2010).

Quantificar a evapotranspiração (ET) nessas estruturas, além de possibilitar o entendimento sobre aqueles benefícios, pode auxiliar na determinação da necessidade ou não de irrigação e na escolha de características construtivas como tipo de vegetação e de substrato (FENG, 2018; CASCONE et al.; 2019; SKABELUND; DIGIOVANNI; STARRY, 2015).

Essa quantificação pode ser feita por meio de medição ou estimativa. Porém, as medições diretas normalmente demandam alto custo e as estimativas podem não representar a realidade, pois foram concebidas para uma determinada situação (tipo de vegetação e condição climática, por exemplo), necessitando de estudos que validem o seu uso em uma determinada região e situação (JENSEN; ALLEN, 2016; DIGIOVANNI et al., 2013).

De uma maneira geral, a melhor quantificação da componente evapotranspiração permitirá uma melhor avaliação do impacto do uso destas estruturas no manejo das águas urbanas e redução de alagamentos. Ademais, a definição de um módulo de medição de baixo custo facilitará a implantação em outros locais do Brasil de forma a se conseguir definir coeficientes ajustados para regiões climáticas tropicais que ainda não dispõem deste tipo de

informação. O melhor dimensionamento das técnicas compensatórias depende de sua aplicação e monitoramento local, nesse sentido, Reino Unido e França são exemplos de dois países que avançaram no processo de dimensionamento após 3 décadas de operação de estruturas em campo em técnicas compensatórias.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 TELHADOS VERDES

Sucintamente, telhados verdes podem ser descritos como sistemas construídos sobre a cobertura de uma edificação com o intuito de manter uma camada vegetativa viva sobre ela (VIJAYARAGHAVAN, 2016). Assim como pavimentos permeáveis, biofiltros, tricheiras e valas de infiltração, telhados verdes fazem parte das técnicas compensatórias em drenagem urbana. Estas, visam compensar sistematicamente os efeitos da urbanização no que se refere ao ciclo hidrológico, favorecendo processos como infiltração, armazenamento e evapotranspiração de águas pluviais (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2011). Porém, diferente das demais técnicas, telhados verdes não necessitam de grandes áreas para sua implementação, pois podem ser instalados sobre telhados existentes (BERNDTSSON, 2010)

Os primeiros registros sobre telhados verdes datam do século VI a.C, no qual jardins construídos sobre terraços, também conhecidos como jardins suspensos da Babilônia, tinham como principal função o embelezamento da cidade. Séculos atrás, eram utilizados como uma forma de isolamento térmico em regiões com condições climáticas extremas, como na Escandinávia (WILLES, 2014).

Na década de 1970, após pesquisas que objetivaram contribuir com a biodiversidade e com os métodos construtivos dessas técnicas na Alemanha, telhados verdes mais modernos foram sendo desenvolvidos, aumentando a sua utilização no país, seguido por países vizinhos da Europa. Atualmente, países como Estados Unidos, Canadá, Austrália, Singapura e Japão também possuem fortes incentivos ao uso dos telhados verdes devido aos múltiplos benefícios que essas técnicas podem proporcionar (BERNDTSSON, 2010; VIJAYARAGHAVAN, 2016).

O uso dos telhados verdes nas edificações pode proporcionar benefícios diretos e indiretos tanto para a edificação, quanto ao ambiente ao seu redor. Alguns desses benefícios incluem a diminuição do volume e o retardo do escoamento superficial durante um evento de chuva (BERNDTSSON, 2010; BÄR; TAVARES, 2017); o aumento da vida útil das membranas do telhado (GETTER; ROWE, 2006); o conforto térmico e a diminuição das ilhas de calor (LIZ; ORDENES; GUTHS, 2018; SOUZA et al., 2018); a melhoria da qualidade do ar (COLLAZO-ORTEGA; ROSAS; REYES-SANTIAGO, 2017; LI; BABCOCK JR, 2014) a diminuição de

ruídos (PIOVESAN, 2013); agricultura urbana (ALBERTO, 2017; MARY et al., 2010); a melhoria na estética e a valoração da propriedade (HUI, 2016).

Grande parte das pesquisas sobre telhados verdes evidenciam as melhorias quanto ao aspecto de controle térmico e controle das águas pluviais (OHNUMA JUNIOR; MARQUES; SILVA, 2017; SIMMONS et al., 2008 ), sendo que o uso desses sistemas na América do Norte e na Europa objetivam principalmente o controle da quantidade e da qualidade das águas neles escoadas (DEPARTMENT OF PLANNING AND LOCAL GOVERNMENT, 2010).

Usualmente, esses sistemas são classificados em função da espessura da camada de substrato, influenciando aspectos como manutenção, custos de instalação e cargas exercidas sobre a edificação, sendo divididos em três categorias (BALLARD et al., 2015; BÄR; TAVARES, 2017; HUI, 2016):

- Extensivo: utilizam camada rasa de substrato (menor que 150 mm), normalmente sem sistema de irrigação, limitando a vegetação para que sejam de pequeno porte, tolerantes a seca e que requerem menos manutenção (como musgos, suculentas e gramíneas). Em edificações já existentes, são mais escolhidas para serem implantadas, pois exercem cargas menores sobre a edificação.

- Intensivo: utilizam camada mais profunda de substrato (maior que 150 mm). Assim, podem abrigar vegetação de maior porte, como arbustos e árvores, possibilitando um paisagismo mais complexo e, em consequência disso, maiores benefícios para a biodiversidade. No entanto, requerem uma capacidade estrutural maior das edificações e manutenções mais frequentes.

- Semi-intensivo: camada com profundidade intermediária, entre 100 a 200mm, podendo abrigar vegetação de pequeno e médio porte. Se caracterizam sendo o meio termo dos outros sistemas, podendo incorporar as características deles.

Na Tabela 1 são apresentadas as principais características de cada tipo de telhado verde.

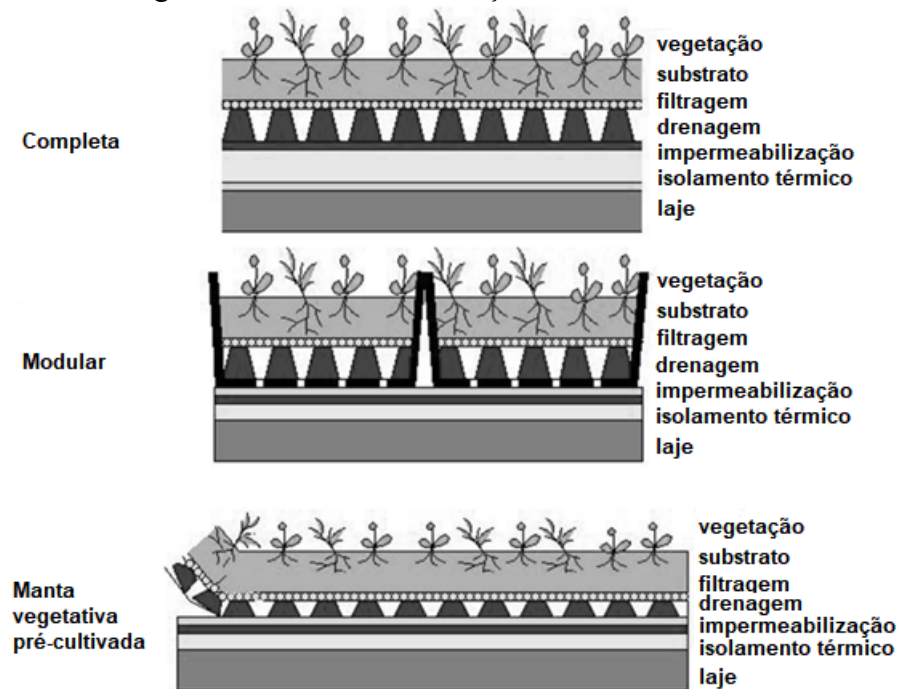
Tabela 1 - Principais características de telhado verde do tipo extensivo, semi-intensivo e intensivo

CARACTERÍSTICA	EXTENSIVO	SEMI-INTENSIVO	INTENSIVO
<b>Espessura do substrato</b>	Menor que 15 cm	em torno de 15cm	Maior que 15cm
<b>Acessibilidade</b>	Geralmente inacessível	Parcialmente acessível	Usualmente acessível
<b>Peso Saturado</b>	Baixo 70 a 170kg/m <sup>3</sup>	Moderado 170 a 290kg/m <sup>3</sup>	Elevado 290 a 970kg/m <sup>3</sup>
<b>Diversidade da vegetação</b>	Baixa	Moderada	Elevada
<b>Tipo e espessura da vegetação</b>	Musgos, <i>sedum</i> e gramíneas – 5 a 15 cm	Gramíneas e arbustivas – 5 a 100 cm	Gramíneas, arbustivas e arbóreas – acima de 250 cm
<b>Custo</b>	Baixo	Variado	Elevado
<b>Manutenção</b>	Mínima	Variada	Elevada

Fonte: adaptado de Hui (2016) e Rola (2008)

Em relação à forma de instalação desses sistemas, podem ainda ser classificados em (OBERNDORFER et al., 2007): completa, modular e manta vegetativa pré-cultivada. A Figura 1 ilustra essas três formas de instalação.

Figura 1 - Formas de instalação de um telhado verde



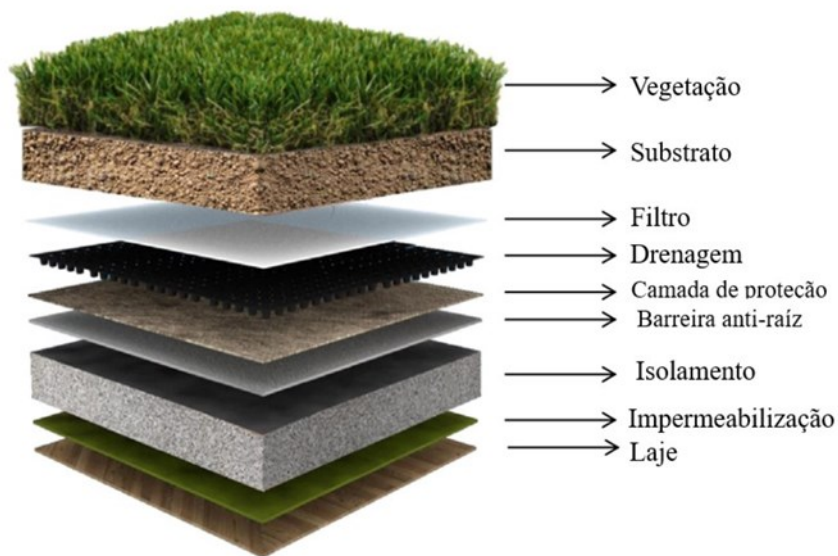
Fonte: traduzido de OBERNDORFER et al. (2007)

Nos sistemas com implantação completa, todos os componentes são instalados juntos com a laje; na modular, módulos com camadas de drenagem, filtração, substrato e vegetação são instalados sobre uma laje previamente impermeabilizada; e na manta vegetativa pré-cultivada, rolos contendo substrato, vegetação, camada drenante e barreira anti-raízes são aplicados sobre uma laje também impermeabilizada (OBERNDORFER et al., 2007).

### 2.1.1 Composição dos telhados verdes

Dependendo do local a serem implementados e dos resultados pretendidos, telhados verdes podem englobar uma série de camadas, conforme ilustra a Figura 2. Para que esses sistemas sejam soluções sustentáveis e capazes de atender às expectativas de seus usuários, é de extrema importância a correta seleção dessas camadas (VIJAYARAGHAVAN, 2016).

Figura 2 - Camadas constituintes de um telhado verde



Fonte: traduzido de Vijayaraghavan (2016)

No *design* do telhado verde, deve-se levar em consideração características como capacidade de receber sobrecarga e inclinação da laje, facilidade e segurança do acesso para manutenção, integração com demais equipamentos existentes (sistemas de ar-condicionado, painéis solares, por exemplo), condições ambientais (como microclima, radiação solar,

sombreamento e ação do vento), além das características inerentes às camadas que as constituem (BALLARD et al., 2015).

A seguir, são discutidas as funções assim como aspectos a serem consideradas nos principais componentes utilizados em um sistema de telhado verde.

A *camada de vegetação* é a camada superficial do telhado verde. Ela deve ser capaz de sobreviver em condições ambientais extremas como ação do vento, exposição solar, períodos com pouca pluviosidade e substrato com profundidade limitada (MARTIN, 2008; PARIZOTTO FILHO, 2010).

A vegetação, além de retardar o escoamento superficial, contribui para processos hidrológicos como interceptação, na qual parte da chuva é armazenada temporariamente sobre a vegetação e contribui para a evapotranspiração, onde parte da água é perdida para a atmosfera, aumentando o potencial de retenção da água no substrato (TASSI et al., 2014).

As suculentas, especificamente do gênero *Sedum*, são bastante utilizadas nos telhados verdes, especialmente do tipo extensivo, devido a sua alta resistência à seca e adaptabilidade a substrato de pequenas profundidades (GETTER; ROWE, 2006). No entanto, as plantas do gênero *Sedum* podem não ser nativas em diversas partes do mundo (VIJAYARAGVAN, 2016).

Nesse sentido, Getter e Rowe (2006) apontam que potenciais espécies podem ser encontradas cruzando as condições ambientais do telhado verde que se pretende instalar (profundidade do substrato, disponibilidade hídrica, por exemplo) com o habitat natural delas, sendo mais prováveis de serem encontradas em regiões com condições extremas como montanhosas, de altitude elevada, costeiras ou semidesérticas.

A *camada de substrato* tem a função de dar suporte às plantas, fornecendo nutrientes, água e condições para seu crescimento adequado (PARIZOTTO FILHO, 2010). Além disso, desempenha um papel importante na capacidade de armazenamento temporário da água em eventos de chuva (BERNDTSSON, 2010; TASSI et al., 2014)

O substrato ideal é aquele que engloba características de ser leve e estável ao longo do tempo, ter uma boa capacidade de drenagem, mas capaz de reter água e nutrientes para a sobrevivência das plantas e estar disponível localmente (GETTER; ROWEL, 2006).

Assim, na tentativa de obter tais características, a camada de substrato é normalmente composta por uma mistura de materiais, como pedra-pome, zeólita, escórias, vermiculita, perlita, turfa, resíduos da construção civil, argila expandida, serragem, entre outros (NOYA et al., 2017; VIJAYARAGHAVAN, 2016).

Tipicamente, o substrato dos telhados verdes é composto por 80% de materiais inorgânicos e 20% de materiais orgânicos com uma pequena quantidade de fertilizantes de liberação lenta (MARTIN, 2008). Uma maior proporção de materiais inorgânicos se faz necessário para garantir a estabilidade do substrato evitando a decomposição, encolhimento e lixiviação de nutrientes como fósforo e nitrogênio dela, além de ser impraticável e inviável a troca do substrato de forma frequente (GETTER; ROWEL, 2006).

A *camada de filtragem* tem como principal função de separar o substrato da camada de drenagem, evitando que materiais e nutrientes do substrato sejam carregados e que possam causar obstrução da camada de drenagem. Um dos materiais utilizados para essa função é uma manta fina, feita de material sintético como poliéster ou polipropileno, conhecido como geotêxtil (JOBIM, 2013).

Já a *camada de drenagem* tem como função direcionar a circulação da água em excesso para fora do sistema do telhado verde. Ela é uma parte crucial dos telhados verdes, pois permite um equilíbrio entre aeração e umidade no sistema, removendo o excesso de água do substrato, tornando o ambiente favorável ao crescimento das plantas (VIJAYARAGVAN, 2016).

Como o número de plantas que podem sobreviver às secas é limitado (condição que pode ocorrer nos telhados verdes, especialmente do tipo extensivo), somado a um possível encharcamento (devido à falta de uma correta drenagem), tornaria difícil a escolha da vegetação. Além disso, por facilitar a retirada de excesso da água no telhado, a camada de drenagem diminui as chances de ocorrerem vazamentos a partir da camada impermeável (MARTIN, 2008).

Segundo Vijayaraghavan (2016) usualmente dois tipos de camada de drenagem são utilizados nos telhados verdes:

- Painéis modulares: feitos com materiais de alta resistência (polietileno ou poliestireno) que podem tanto drenar o excesso de água, quanto armazená-la em seus compartimentos;

- Materiais granulares: materiais que possuem capacidade de reter umidade nos seus poros, como argila expandida, cascalhos e agregados graúdos.

Por fim, a *camada de impermeabilização*, embora não faça parte do telhado verde, é um importante aspecto desse. Com a elevada umidade presente no substrato, ou na camada de drenagem, uma correta impermeabilização da laje se faz necessária para evitar vazamentos e posteriores infiltrações que danifiquem a estrutura da laje. Caso ocorram vazamentos, todas as



camadas precisariam ser removidas para a localização de sua origem – o que dá suporte a uma ideia, incorreta, de que os sistemas de telhado verde aumentam as chances de vazamentos e infiltrações (VIJAYARAGHAVAN, 2016).

Uma grande variedade de materiais pode ser utilizada para esse propósito, como mantas ou membranas (asfálticas, termoplásticas, elastoméricas ou de betume) ou resinas e bases (JOBIM, 2013). Em alguns casos, especialmente em telhados do tipo intensivo, há a necessidade de se incluir uma barreira anti-raiz acima da impermeabilização, afim de evitar que a raiz da vegetação cause danos à camada de impermeabilização ou até mesmo à laje (VIJAYARAGHAVAN, 2016).

### **2.1.2 Comportamento hidrológico dos telhados verdes no Brasil**

Visando levantar o estado de arte sobre o comportamento hidrológico dos telhados verdes no cenário brasileiro, Bär e Tavares (2017) encontraram na sua revisão sistemática um total de 40 materiais acadêmicos. Desses materiais, cinco tópicos de pesquisa foram enumerados, algumas pesquisas abordando mais de um tópico, sendo: capacidade de armazenamento de águas pluviais (27 pesquisas); atraso no escoamento pluvial (7 pesquisas); qualidade das águas escoadas (13 pesquisas); características e composição do substrato (4 pesquisas); e simulação computacional de sua implementação (5 pesquisas).

Em relação ao controle quantitativo das águas pluviais, objeto que também se deseja estudar no presente trabalho, as principais conclusões foram que todos os estudos que analisaram o atraso no início e no pico do escoamento tiveram resultados positivos e que a capacidade de armazenamento dos telhados verdes está correlacionada a uma série de fatores internos e externos. Os fatores internos referem-se às características inerentes às camadas que compõem o telhado verde, variando de estudo em estudo. Já os fatores externos mais citados são: inclinação do sistema (quanto menor inclinação, maior capacidade de armazenamento); umidade do substrato (solos mais secos tendem a apresentar um maior potencial de retenção); e taxa de evapotranspiração (que recupera o potencial de retenção do substrato na medida em que a água é perdida para a atmosfera pela evapotranspiração).

Trabalhos feitos após a elaboração da referida revisão sistemática vão ao encontro das conclusões dela apresentadas. Uma breve descrição e as principais conclusões dos trabalhos

brasileiros mais recentes estão descritas abaixo, sendo os de Rincón (2018) e Arboit (2017) mais voltados para o estudo da evapotranspiração nos telhados verdes.

Noya et al. (2017) estudaram diferentes composições de substratos no desenvolvimento de duas espécies vegetativas herbáceas e perenes (*Sedum acre* Lineu e *Arachis repens* Handro) no centro de estudos experimentais da Universidade Federal de Paraná. Inicialmente, foram obtidos quinze tipos de substratos combinando materiais com disponibilidade local. Desses, quatro foram escolhidos após análise prévia de parâmetros físico-químicos deles. O substrato que teve um melhor resultado no que se refere ao desenvolvimento e cobertura vegetal após um ano de cultivo foi aquele composto por esterco de aves curtido e serragem na proporção 1:1.

Nesse sentido, Liberalesso (2018) objetivou o desenvolvimento de um substrato para telhados verdes extensivos que utilizasse matéria prima de resíduos da atividade rizícola e da construção civil. Foram instalados módulos nas dependências da Universidade Federal de Santa Maria, utilizando diferentes proporções desses materiais. O estudo obteve bons desempenhos de retenção do escoamento pluvial nos módulos em algumas composições. Mas observou-se que houve uma degradação da qualidade da água escoada em todos os módulos, evidenciando a dificuldade de se obter uma composição que atenda a múltiplas características desejáveis.

Savi e Tavares (2018) observaram que o tipo de vegetação pode influenciar na capacidade de retenção dos telhados verdes, em Curitiba (PR). Para a pesquisa, foram construídos cinco módulos de telhados verdes do tipo extensivo (10 cm de profundidade do substrato) com espécies perenes que realizam fotossíntese do tipo CAM (Metabolismo do ácido das crassuláceas), C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub>. Plantas com fotossíntese CAM possuem uma maior eficiência no uso d'água comparados com as C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub>, sendo mais bem adaptadas ao estresse hídrico. Dentro do período da pesquisa, os módulos com maiores percentagens de retenção foram os de *Bulbine frutescens* e de *Sedum mexicanum*, que retiveram, respectivamente, 69% e 62% do total precipitado de 13 eventos (total de 283mm). Os autores destacam que as referidas espécies possuem o processo de fotossíntese do tipo CAM, assim, armazenam água ao engrossarem as raízes, caules e folhas e possuem uma maior resistência a períodos de estiagem. No entanto, por elas necessitarem de menos água (até 100 gramas de água por grama de CO<sub>2</sub>, comparados com 300 e 500 gramas de outros tipos), em períodos com índice de precipitação maiores, caso o substrato não seja bem drenado, haveria uma maior chance das raízes apodrecerem pelo acúmulo de água nessa camada, podendo danificar a vegetação.

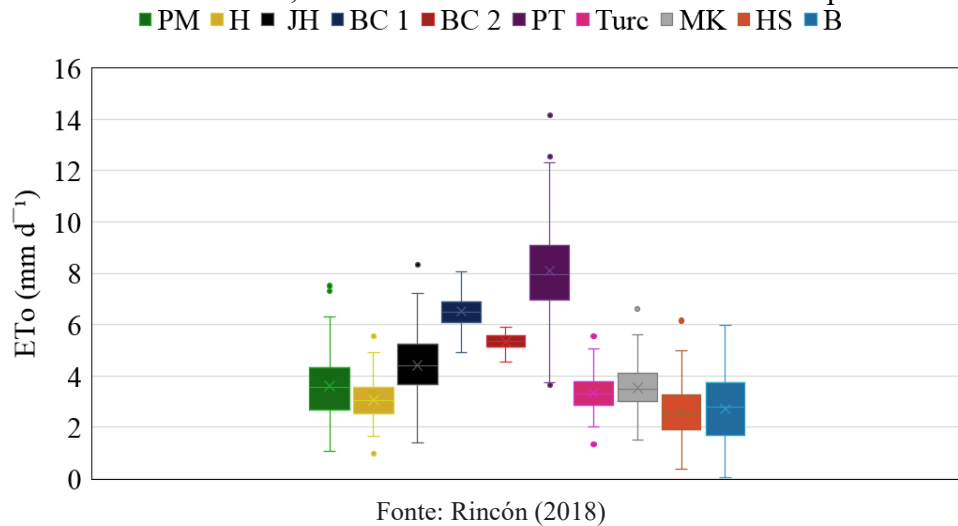
Castro et al. (2020) observaram a influência da inclinação do telhado verde no potencial de retenção por esses sistemas. No seu experimento, instalado em Porto Alegre (RS), quatro módulos foram analisados. Dois deles eram horizontais, sendo um vegetado e outro sem vegetação; e dois deles com as mesmas coberturas, porém, com uma inclinação de 15°. Os autores observaram uma maior capacidade de retenção e retardo do escoamento nos módulos com telhado verde, comparados com os módulos sem vegetação, assim como melhores desempenhos dos planos quando comparados com os inclinados.

Santos (2019) analisou a retenção de água e eficiência térmica de três diferentes coberturas: telhado de fibrocimento exposto, telhado de fibrocimento com argila expandida e telhado verde extensivo sobre telha de fibrocimento. Foi observado que a lâmina mediana total precipitada retida pelos telhados verdes foi de 70%, enquanto que a retenção mediana na argila expandida foi de 30% e das telhas de fibrocimento foi de 6%.

Com o intuito de investigar o efeito de diferentes escalas dos telhados verdes na redução do escoamento superficial, Persch (2019) monitorou no seu experimento quatro telhados verdes com características iguais, variando apenas a área deles (1 m<sup>2</sup>, 3 m<sup>2</sup>, 6 m<sup>2</sup> e 12 m<sup>2</sup>). O autor evidenciou o efeito escala desses sistemas, uma vez que foi observado, em um período de um ano, melhores desempenhos quanto à capacidade de retenção, de diminuição de vazão de pico e de atraso na geração do escoamento no módulo com a maior área.

Rincón (2018) analisou o comportamento térmico e hidrológico em um telhado verde instalado na cidade de Niterói (RJ). No seu estudo, foram avaliados os desempenhos de nove métodos empíricos que estimam a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) com o método padrão de Penman-Monteith (FAO-PM). Para a estimativa da ET<sub>o</sub> foram utilizados dados obtidos de uma estação meteorológica WS 1001 (Ambient Weather Observe) instalada sobre o telhado verde, por um período de quatro meses (out./2017 a jan./2018). Foi observada uma variabilidade nos diferentes métodos utilizados para estimar a ET e analisando em escala de tempo menor, também foi percebido uma variação em meses ou dias específicos resultantes dos diferentes métodos. A Figura 3 apresenta o comportamento dos métodos utilizados de todo o período estudado. O Penman-Monteith (PM) foi utilizado como método padrão, sendo Hargreaves (H), Jensen-Haise (JH), dois métodos de Blaney-Criddle (BC<sub>1</sub> e BC<sub>2</sub>) originalmente empregado em regiões áridas ou semiáridas; Turc, Priestley-Taylor (PT), Makkink (MK) para regiões úmidas e costeiras; e Hargreaves-Samani (HS) e Bristow-Campbell (B) para regiões diversas.

Figura 3 – Valores máximos, mínimos e as médias de ETo estimados por Rincón (2018)



A autora destaca que há uma forte dependência dos métodos à variação da temperatura e recomenda que sejam feitos estudos relacionados a ET real e que englobem um maior período de análise nos telhados verdes.

Arboit (2017), por sua vez, mensurou a ET real e ET potencial de módulos de telhado verde extensivo com *Sedum rupestre* instalados na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). A autora monitorou diariamente o peso desses módulos num período compreendido entre julho de 2016 a fevereiro de 2017, obtendo valores de ET em escala diária, mensal e sazonal e equações preditivas que melhor representavam valores de ET medidos para o telhado verde estudado. Esse estudo representa um dos poucos trabalhos brasileiros que investigou a relação da ET real com o comportamento hidrológico nos telhados verdes. Os principais resultados do trabalho da autora se encontram no tópico 2.2.1.

Souza (2019) realizou a modelagem hidráulica de um protótipo de telhado verde com bromélias localizado nas dependências do Centro Experimental de Saneamento Ambiental do Departamento de Engenharia Civil/UFRJ. O estudo resultou no ajuste do escoamento simulado pelo modelo HYDRUS-1D com os escoamentos observados no protótipo em treze eventos de precipitação, utilizando como dados de entrada, parâmetros levantados em literatura e resultados experimentais do módulo estudado. Alguns dos dados de entrada utilizados na modelagem foram: características do solo (tipos diferentes de solo, profundidade, conteúdo

volumétrico, parâmetros de retenção de água); características da vegetação (profundidade inicial e final das raízes, tempo de crescimento das raízes, taxa potencial de transpiração); precipitação e dados climáticos para o cálculo da evapotranspiração potencial. Após análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo, a autora concluiu que “os processos hidrológicos no protótipo são fortemente influenciados pelas propriedades hidráulicas do solo e pela condição inicial deste, definida em termos da carga hidráulica antes do início do evento, que depende fortemente da evapotranspiração real anterior ao evento”.

## 2.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A combinação dos processos de evaporação e transpiração é denominada de evapotranspiração. A evaporação refere-se à transformação da água em vapor, que ocorre em superfícies molhadas como solo e corpos d’água. Já a transpiração, ao processo fisiológico de plantas, que resulta na perda d’água dos estômatos das folhas. A quantificação desses dois processos em conjunto é muitas vezes necessária devido à dificuldade em se separar a parcela transpirada pela vegetação da parcela evaporada pelo solo e por outras superfícies molhadas (BRUTSAERT, 1982; NOURI et al., 2013).

A evapotranspiração é um processo importante dentro do ciclo hidrológico, pois através dela a água retorna forçosamente para a atmosfera em estado gasoso, permitindo a continuação do ciclo (CAMARGO; CAMARGO, 2000). No contexto global, estima-se que 60 a 65% da precipitação anual sobre a superfície terrestre é devolvida para a atmosfera por meio da evapotranspiração (BRUTSAERT, 1982). No território brasileiro, cerca de 75% da precipitação retorna para a atmosfera (ANA, 2020).

No contexto de bacia, Tucci (2001) destaca a importância de sua quantificação na resolução de problemas que envolvem o gerenciamento dos recursos hídricos. Nesse sentido, o planejamento de áreas agrícolas, a previsão de cheias ou a construção e operação de reservatórios requerem dados confiáveis de evapo(transpi)ração.

Nas técnicas compensatórias em drenagem urbana, a evapotranspiração também é expressiva e influencia nas características hidrológicas, como no caso da capacidade de retenção de água no solo. Feng (2018), na sua revisão, indica que estudos encontraram valores de evapotranspiração medidos de 2 a 9 mm/dia e 0,003 a 11,38 mm/dia, para unidades de

biorretenção e para telhados verdes, respectivamente. Esses valores representam uma remoção de 0,4 a 70 % (para unidades de biorretenção) e de 58 a 72 % (para telhados verdes) do volume total de entrada de água nas referidas estruturas.

Diversos aspectos interferem no processo de evapotranspiração. A transformação da água em estado líquido em vapor d'água para a atmosfera é condicionada pelo saldo de radiação à superfície, pela velocidade do vento, pela umidade do ar, dentre outros parâmetros meteorológicos. Ocorrendo a evapotranspiração, o ar circundante torna-se mais úmido, e o processo torna-se mais lento, podendo cessar se o teor de umidade na camada de ar justaposta à superfície evaporante não for substituída. Essa substituição, por sua vez, depende da velocidade do vento (VAREJÃO-SILVA, 2006; ALLEN et al., 1998)

Além de fatores meteorológicos, nas superfícies de água, a evaporação é ainda influenciada pelas propriedades físicas da água (salinidade, coloração, por exemplo). Já nas superfícies vegetadas, os fatores intervenientes são ainda maiores, pois há a introdução de variáveis biológicas (como espécie de planta, idade, fase de desenvolvimento, índice de área foliar), tornando os estudos dessa área ainda mais complexos (VAREJÃO-SILVA, 2006).

### **2.2.1 Quantificação da evapotranspiração**

Existem diferentes metodologias para quantificação da evapotranspiração, podendo ser feita por meio de estimativas ou de medições. Uma breve discussão sobre os principais métodos de quantificação desse processo é apresentada abaixo.

Diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração e definições dela são apresentados na literatura. Esses métodos se fundamentam em teorias de transferência de massas de ar, balanço energético ou combinações destas, assim como em equações com bases estatísticas-empíricas (JENSEN; ALLEN, 2016; NOURI et al., 2013).

Varejão-Silva (2006) lista alguns dos métodos empíricos para a estimativa da evapotranspiração de referência mais utilizados, como a Fórmula de Blaney-Cridle e a de Thornthwaite, que utilizam dados de temperatura do ar e fatores baseados em valores médios de fotoperíodo; a fórmula de Hargreaves, desenvolvida para condições climáticas do Nordeste brasileiro a partir de dados de temperatura e umidade do ar; e o uso de coeficientes empíricos que relacionam dados de evaporação, como as obtidas por um tanque Classe-A.

O método Penman-Monteith, adotado pela FAO-56, é considerado como método padrão para estimativa da evapotranspiração em estudos na área agrícola. Esse método utiliza os seguintes termos e definições (Allen et al., 1998):

- Evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ): definida como sendo a evapotranspiração de uma cultura de referência. Essa cultura (cuja evapotranspiração se aproxima à da grama, em condições ótimas) possui características definidas como cobertura completa do solo, altura de 12 cm, resistência da superfície de 70 s/m, albedo de 0,23 e não possui restrição hídrica ou nutricional. A  $ET_o$  pode ser calculada utilizando apenas dados climáticos por ser uma superfície hipotética e não considerar características como do solo ou da cultura. Desse modo,  $ET_o$  expressa o poder evaporativo da atmosfera em um dado espaço e tempo.

- Evapotranspiração sob condições padrão ( $ET_c$ ): corresponde à evapotranspiração de uma determinada cultura, livre de doença, bem irrigada, cultivada em grandes áreas, sob condições ótimas de umidade no solo, atingindo, portanto, máxima produção sob dada condição climática.  $ET_c$  pode ser calculada multiplicando o coeficiente de uma dada cultura ( $k_c$ ) pelo  $ET_o$  conforme a Equação 1.

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad \text{Equação 1}$$

O coeficiente  $k_c$  é um coeficiente adimensional que pode ser determinado experimentalmente e depende de características como altura, albedo, resistência do dossel da vegetação à transpiração e cobertura do solo de uma determinada cultura.

- Evapotranspiração em condições não-padrão ( $ET_{c \text{ adj}}$ ): refere-se à evapotranspiração de uma determinada cultura sob manejo e condições ambientais diferentes das definidas nas condições padrão. Ou seja, uma evapotranspiração menor que as condições ótimas devido a condições que podem ocorrer numa cultura como presença de pragas, doenças, baixa fertilidade, excesso ou falta de água, afetando a densidade e metabolismo da plantação. Alguns autores (VAREJÃO-SILVA, 2006; ANA, 2020) também a chama de ET real, pois representa o fenômeno onde as condições para o crescimento de uma determinada cultura não são ideais. A  $ET_{c \text{ adj}}$  pode ser calculada por meio de um coeficiente de estresse hídrico ( $K_s$ ) conforme a Equação 2:

$$ET_{c\ adj} = K_s \times K_c \times ET_o \quad \text{Equação 2}$$

No entanto, considerações feitas nas equações preditivas para cultivos agrícolas como cultura homogênea e boa disponibilidade hídrica diferem das condições existentes em um ambiente urbano, podendo haver diferentes tipos de vegetação, de microclima, de disponibilidade hídrica e composição do solo, por exemplo (NOURI et al., 2013).

Nesse sentido, Grimmond, Isrd e Belding (1992) afirmam que métodos de estimativa da evapotranspiração, que se baseiam na micrometeorologia, são adequados para áreas extensivas, uniformes e de pequena rugosidade. Esses métodos seguem a teoria de Monin-Obukhov, o qual considera uma camada atmosférica de fluxo constante, tendo homogeneidade de temperatura em uma dada área e direção do vento. Portanto, segundo os autores, quando o interesse não é estudar uma área extensa homogênea (como no caso das áreas urbanas), a lisimetria se torna uma alternativa interessante para o melhor entendimento do processo de evapotranspiração.

Desse modo, a aplicabilidade de modelos criados originalmente para estimar evapotranspiração em cultivos agrícolas para áreas urbanas, como no caso dos telhados verdes, deve ser investigada (DIGIOVANNI et al., 2013). Assim, valores mensurados de evapotranspiração em telhados verdes são de grande importância para a calibração ou validação desses modelos (VOYDE, 2010; FENG, 2018).

A evapotranspiração pode ser medida por métodos como (ALLEN et al., 2011): balanço de água no solo, lisimetria, covariância Eddy, razão de Bowen, balanço de água no solo, modelos de fluxo de seiva e sensoriamento remoto. No entanto, a lisimetria possui destaque por ser um método direto de medição e é considerado por diversos autores como método padrão para calibração ou validação de modelos para a estimativa de evapotranspiração (JENSEN; ALLEN, 2016; HOWELL; SCHNEIDER; JENSEN, 1991; CAMPECHE, 2002).

### **2.2.2 Evapotranspiração em telhados verdes**

Estudos feitos com telhados verdes visam, na sua maioria, ao entendimento e aprimoramento dos benefícios térmicos-energéticos e hidrológicos proporcionado por esses sistemas (OHNUMA JUNIOR; MARQUES; SILVA, 2017; SIMMONS et al., 2008). A investigação da evapotranspiração em telhados verdes está, por consequência, relacionada



principalmente àquelas áreas de estudo. No entanto, os estudos existentes ainda são insuficientes frente à complexidade do fenômeno em ambas as áreas (DIGIOVANNI et al., 2013; CASCONE et al., 2019).

Cascone et al. (2019), visando entender o efeito térmico-energético em telhados verdes com a evapotranspiração dessas estruturas, levantaram por meio de sua revisão estudos feitos nessa área. Dentre os trabalhos que estudaram analiticamente esse fenômeno, foram utilizados os seguintes modelos: FAO-Penman-Monteith; ASCE-Penman-Monteith; Hargreaves e Priestley-Taylor. Os trabalhos que quantificaram experimentalmente a evapotranspiração, utilizaram métodos como balanço de água no solo (por sensores de umidade do solo), lisimetria e sistema de câmaras. Os resultados experimentais dos estudos levantados pela revisão e dos estudos descritos neste tópico, assim como informações sobre os respectivos experimentos estão resumidos na Tabela 2.

Berghage et al. (2009) conduziram diversas pesquisas com telhados verdes a serviço da USEPA. Com o intuito de entender a evapotranspiração nessas estruturas, utilizaram oito lisímetros de pesagem de 0,5m<sup>2</sup>, em um ambiente controlado, com dois tipos de tratamento: (1) simulando telhado verde com *Delosperma nubigenum* e *Sedum álbum* e (2) replicando o tratamento anterior, porém sem a camada de vegetação. Foram encontrados valores médios de evapotranspiração para o tratamento (1) de 10,5 mm/d em condições de abundância hídrica, sendo reduzido ao valor médio de 0,36 mm/d após 21 dias de período seco. Os autores afirmam que os valores encontrados foram condizentes com estimativas feitas por equações comumente usados na previsão de ET como Penman-Monteith. Além disso, observaram uma perda de água inicial semelhante nos dois tratamentos (com e sem vegetação), mas devido às plantas possuírem a capacidade de extração da umidade do solo em profundidades maiores, a perda de água ao longo do período monitorado foi maior para o tratamento com vegetação.

Experimentos conduzidos em estufas, em Auckland (Nova Zelândia), por Voyde (2010) também mostraram que há uma redução na evapotranspiração quando as plantas são sujeitas a estresse hídrico. Valores médios de 3,58 mm/d para *Sedum mexicanum* e de 3,1 mm/d para *Delosperma australe* foram encontrados, quando água não era fator limitante e menores de 0,5 mm/d para ambas as espécies quando havia limitação de água no sistema. No entanto, foi percebido uma maior redução na evapotranspiração do *S. mexicanum* em resposta ao estresse hídrico, uma vez que essa espécie possui o metabolismo tipo CAM, diferente do *D. australe*,

que é do tipo C<sub>3</sub>. Desse modo, os autores sugerem como vantagem utilizar plantas tipo CAM por sua maior tolerância a períodos de seca.

Wadzuk et al. (2013), em estudo realizado em Villanova, na Pensilvânia, utilizando lisímetro de pesagem, quantificaram a evapotranspiração, durante 3 anos, para um telhado verde com oito espécies de *Sedum* do tipo extensivo (substrato com 10,2 cm de profundidade). A evapotranspiração representou 67,91%, 87,9% e 72,54% do volume anual precipitado em 2009, 2010 e 2011, respectivamente. Observou-se uma variação na média mensal ao longo das estações sendo a evapotranspiração média de 3 mm/dia para os anos de 2009 e 2010 e de 4 mm/dia para o ano de 2011.

DiGiovanni et al. (2013), em Nova Iorque (EUA), utilizaram valores medidos de evapotranspiração por lisímetros de pesagem para verificar a aplicabilidade de equações de evapotranspiração originalmente criados para agricultura na predição desse fenômeno em telhados verdes. O telhado verde estudado era composto por seis espécies de *Sedum* e substrato de 10 cm de profundidade. Durante um ano de monitoramento, a evapotranspiração variou de próximo a 0 mm/d a 7 mm/d, sendo estimado de forma satisfatória com o método ASCE-Penman-Monteith associado ao coeficiente de Thornthwaite-Mather para as condições do telhado verde estudado pelos autores.

Marasco, Culligan e McGillis (2015) mediram a evapotranspiração em dois telhados verdes na cidade de Nova Iorque (EUA) usando sistema de câmaras. Os dois sistemas possuem uma mistura de plantas do gênero *Sedum*, mas de espécies diferentes, sendo um deles com substrato de 32mm (denominado W118) e outro com substrato de 100 mm (denominado USPS). Além da profundidade, a capacidade de campo, capacidade de retenção hídrica e condutividade do substrato, assim como o método construtivo dos dois sistemas também foram diferentes. De julho/2009 a dezembro/2009 para W118 e de abril/2012 a outubro/2013 para USPS, monitorados não necessariamente de forma contínua, os autores encontraram um valor médio de evapotranspiração de 1,55 mm/dia e 1,93 mm/dia para W118 e USPS, respectivamente. Os valores mensurados foram correlacionados com equações preditivas de evapotranspiração potencial como Penman e ASCE-Penman–Monteith, Hargreaves e Priestley–Taylor, sendo a última a que teve melhores resultados após considerar um índice de precipitação antecedente que ajustou a evapotranspiração potencial à evapotranspiração mensurada (com limitação hídrica).

Jahanfar et al. (2018) propuseram um modelo de estimativa da evapotranspiração para intervalos de tempo menores que um dia. Com dados de evapotranspiração medidos por lisímetros de pesagem, modificaram o modelo da FAO-Penman-Monteith para estimar evapotranspiração em intervalo de tempo de 30 minutos. Assim, os autores melhoraram as estimativas de evapotranspiração em 8 a 9% e em 37% para condições sem e com estresse hídrico, respectivamente, quando comparados com valores do modelo original.

No Brasil, são poucos os estudos que mensuraram a evapotranspiração nos telhados verdes. Araújo et al. (2014) mediram a evapotranspiração de um protótipo de sistema modular de telhado verde com grama esmeralda (*Zoysia japonica*) em um estudo desenvolvido na Universidade Tecnológica Federal de Paraná. Para tanto, mediram diariamente o peso de três módulos de telhado verde, com uma balança eletrônica de capacidade de 30kg, assim como dos volumes de precipitação e/ou irrigação e os volumes escoados. Por meio de balanço de massa dos valores diários medidos, foram encontrados valores médios de 1,72 mm/d nos 35 dias de monitoramento (maio a junho de 2012).

Arboit (2017), na sua dissertação de mestrado, mensurou a evapotranspiração em telhados verdes do tipo extensivo com *Sedum rupestre*, identificou modelos de predição que foram capazes de estimar a evapotranspiração medida e calculou coeficientes de cultura ( $k_c$ ) e de estresse hídrico ( $k_s$ ) para as condições do telhado verde estudado. O experimento foi montado nas dependências da Universidade Federal de Santa Maria, e consistia na medição de variáveis climáticas; do peso e do volume de água escoada de dez módulos experimentais com quatro tipos de tratamento: três módulos vegetados irrigados; três módulos vegetados não irrigados, dois módulos não vegetados irrigados e dois módulos não vegetados não irrigados. Os módulos, por sua vez, eram compostos de bandejas de polipropileno, com área interna de 0,202 m<sup>2</sup> e dreno no fundo, preenchidos com camada de drenagem (geomembrana drenante), filtragem (manta geotêxtil), substrato (8 cm de espessura) e, nos módulos vegetados, camada vegetativa por meio do plantio de 50 mudas de *Sedum rupestre*. Conhecendo os volumes drenados e os pesos de cada módulo, foram calculados no período de 8 meses, compreendidos entre julho de 2016 e fevereiro de 2017, valores diários de evaporação dos módulos sem vegetação e de evapotranspiração dos módulos vegetados. A evapotranspiração mediana dos módulos foi de 2,6 mm/dia, com valores variando entre 0,2 mm/dia e 5,1 mm/dia, sendo possível estimar de forma razoável com algumas equações preditivas para evapotranspiração de referência e de forma substancialmente melhor após incorporar os coeficientes  $k_c$  e  $k_s$ . A evaporação mediana

encontrada foi de 1,9 mm/dia, com variações de 0,1 mm/dia a 9,5 mm/dia. Quanto ao controle do escoamento, os módulos vegetados e não vegetados, nas condições do experimento, resultaram em desempenhos próximos. Nesse sentido, a autora discute que essa constatação pode suscitar dúvida quanto à necessidade de ter a camada de vegetação nesses sistemas e pontua que a presença dessa camada pode trazer benefícios além dos hidrológicos. A autora também salienta que fatores como alta umidade relativa do ar, precipitações recorrentes e cobertura do solo nas condições do experimento podem ter influenciado nos resultados obtidos, sendo necessários mais investigações frente a esse tema por sua dependência com o clima local e especificidades do telhado estudado.

Tabela 2 – Valores de evapotranspiração de telhados verdes obtidos experimentalmente

Referência	Localidade	Clima <sup>1</sup>	Instrumentação / Tipo de medição	Ambiente <sup>2</sup>	Período de monitoramento	Prof. do substrato e Tipo de vegetação	Faixa de ET medido
Feng, Meng e Zang (2010)	Guangzhou - China	Cfa	Sens. Um. / Indireta	Externo	11 dias - verão	Extensivo (Prof. NI)– <i>Sedum lineare</i>	Dissipação de 58,4% do total da radiação incidente
Jim e Peng (2012)	Hong Kong – Hong Kong	Cwa	Sens. Um. / Indireta	Externo	2 meses - verão	Extensivo (Prof. NI) – <i>Arachis pintoi</i>	5,0 a 13,1 mm/d
Djedjig et al. (2012)	La Rochelle - França	Cfb	Sens. Um. / Indireta	Externo	3 semanas - verão	NI	NI
Takebayash e Moriyama (2007)	Kobe – Japão	Cfa	Sens. Um. / Indireta	Externo	1 mês - outono	Semi-intensivo (20cm) – gramínea	1,72 a 6,9 mm/d
Jim e Tsang (2011)	Hong King – Hong Kong	Cfa	Sens. Um. / Indireta	Externo	1 dia em cada estação do ano	Intensivo (90cm)– Vegetação NI	5 a 35 mol m <sup>-2</sup> s <sup>-2</sup> (transpiração)
Lazzarin, Castellotti e Busato (2005)	Vicenza - Itália	Cfa	Sens. Um. / Indireta	Externo	2 meses – verão e inverno	Semi-intensivo (20cm) - <i>Sedum</i>	Dissipação de 12 a 25% da radiação solar incidente
He et al (2016)	Shanghai – China	Cfa	Sens. Um. / Indireta	Externo	2 semanas - verão	Extensivo (4cm) - <i>Sedum lineare</i>	Responsável por até 63,93% do calor dissipado
Ayata et al (2011)	NI	-	Sens. Um. / Indireta	Interno	6 dias	Extensivo (9cm) – <i>Delosperma nubigenum</i>	NI
Tabares-Velasco e Srebric (2011) e Tabares e Srebric (2012)	Pensilvânia – Estados Unidos	NA	Sens. Um. e Lis. / Direta e indireta	Interno	2 a 6 dias - verão	Extensivo (9cm) - <i>Delosperma nubigenum</i> e <i>Sedum spurium</i>	<i>Sedum</i> s. 3,3 a 4,0 mm/d <i>Delosperma</i> n. 0,9 a 6,0 mm/d
Ouldboukhitine et al. (2012)	La Rochelle - França	NA	Lis. / Direta	Interno	7 dias	Prof. NI Gramma e <i>Sedum</i>	Até 8 mm/d (grama) e até 5 mm/d ( <i>Sedum</i> )

Referência	Localidade	Clima <sup>1</sup>	Instrumentação / Tipo de medição	Ambiente <sup>2</sup>	Período de monitoramento	Prof. do substrato e Tipo de vegetação	Faixa de ET medido
Coutts et al. (2013)	Melbourne - Austrália	Cfb	Sens. Um. e S. de câmaras / Direta e Indireta	Externo	4 dias - verão	Extensivo (15cm) - Sedum	0,7 a 7,4 mm/d
Schweitzer e Erell (2014)	Tel Aviv - Israel	NA	Lis. / Direta	Interno	1 dia	Extensivo (5cm) – <i>Pennisetum clandestinum</i> (a); <i>Aptenia cordifolia</i> (b); <i>Sesuvium verrucosum</i> (c) e <i>Halimione portulacoides</i> (d)	(a) 7,0 a 9,0mm/d (b) 3,0 a 6,0 mm/d (c) 6,5 a 7,5mm/d (d) 4,0 a 7,5 mm/d
Ouldboukhitine et al. (2014)	La Rochelle - França	NA	Lis. / Direta	Interno	2 dias	Semi-intensivo (15 cm) - <i>Vinca Major</i> (a) e <i>Lolium Perenne</i> (b)	(a) 0,5 a 5,0 mm/d (b) 0,5 a 3,5 mm/d
Tan et al. (2017)	Singapura - Singapura	Af	Sens. Um. e Lis. / Direta e Indireta	Externo	2 meses – verão e inverno	Intensivo (35 cm) <i>Cyathula prostrata</i>	2,0 a 7,0 mm/d
Berghage et al. (2009)	State College – Estados Unidos	NA	Lis. / Direta	Interno	Ciclos de 21 dias	Extensivo (9 cm) <i>Delosperma nubigenum</i> e <i>Sedum álbum</i>	0,36 a 10,5 mm/d
Voyde (2010)	Auckland – Nova Zelândia	NA	Lis. - Direta	Interno	29-38 dias	Extensivo (7 cm) <i>Sedum mexicanum</i> (a) e <i>Delosperma australe</i> (b)	(a) 0,12 a 3,05 mm/d (b) 0,09 a 3,58 mm/d
Wadzuk et al. (2013)	Filadélfia – Estados Unidos	Cfa	Lis. – Direta	Externo	3 anos	Extensivo (10,2 cm) - <i>Sedum</i>	3 a 4 mm/d (média anual)
DiGiovanni et al. (2013)	Nova Iorque – Estados Unidos	Cfa	Lis. – Direta	Externo	1 ano	Extensivo (10 cm) – <i>Sedum</i>	0 a 7mm/d
Marasco, Culligan e McGillis (2015)	Nova Iorque – Estados Unidos	Cfa	S. de câmaras/ Direta	Externo	500 dias	Extensivos - 3,2 cm (a) e 10 cm (b) - <i>Sedum</i>	(a) 0,002 a 6,94 mm/d

Referência	Localidade	Clima <sup>1</sup>	Instrumentação / Tipo de medição	Ambiente <sup>2</sup>	Período de monitoramento	Prof. do substrato e Tipo de vegetação	Faixa de ET medido
							(b) 0,003a11,38 mm/d
Jahanfar et al. (2018)	Toronto - Canadá	Dfb	Lis. – Direta	Externo	6 meses – verão e outono	Semi-Intensivo (20 cm) – gramíneas campestres	4 mm/dia (média)
Araújo et al. (2014)	Londrina – Brasil	Cfa	Lis. – Direta	Externo	35 dias - outono	Extensivo (Prof. NI) - <i>Zoysia japônica</i>	1,72 mm/d (média)
Arboit (2017)	Santa Maria - Brasil	Cfa	Lis. – Direta	Externo	8 meses – inverno a verão	Extensivo (8 cm) - <i>Sedum rupestre</i>	0,2 a 5,1 mm/d

Fonte: adaptado de Cascone et al. (2019)

Legenda: NI – Não informado; NA – Não se aplica; Sens. Um. – Sensor de umidade do solo; S. de câmaras – Sistema de câmaras; Lis. – Lisimetria; Prof. – Profundidade

<sup>1</sup> Clima segundo classificação climática de Köppen, onde: Cfa = clima temperado, sem estação seca e verão quente; Cwa = clima temperado com verão quente e úmido ; Cfb = clima temperado, sem estação seca e verão fresco; Af = clima quente, sem estação seca; Csa = clima temperado com verão quente e seco; Dfb = clima continental úmido de verão fresco.

<sup>2</sup> Ambiente interno refere-se a um ambiente como a de uma estufa, com condições (temperatura, umidade do ar, por exemplo) controladas. Já nos testes em ambiente externo, os experimentos estiveram sujeitos às condições climáticas da região.

## 2.3 LISÍMETROS

Lisímetros são equipamentos que vêm sendo utilizados há mais de 300 anos para determinar o uso da água pela vegetação, medir a percolação de água através de solos e realizar amostragem de água do solo para análises químicas (HOWELL et al., 1991).

A palavra “lisímetro” é derivada do grego “*lysis*”, que significa dissolução ou movimento, e “*metron*” que significa mensurar (HOWELL, 2005). Desse modo, são tanques ou recipientes preenchidos com solo, que possibilitam conhecer com detalhe alguns dos termos do balanço hídrico do volume amostrado (HOWELL et al., 1991; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007). Eles podem ser usados para determinar a evaporação do solo ou da evapotranspiração de um conjunto solo-planta (CAMPECHE, 2002; HOWELL, 2005).

Segundo Howell (2005), não existe um padrão a ser seguido para a construção de lisímetros, no entanto, há um princípio que guia as considerações na concepção desses dispositivos: “lisímetros precisam ser representativos para as condições de campo em que se deseja mensurar”.

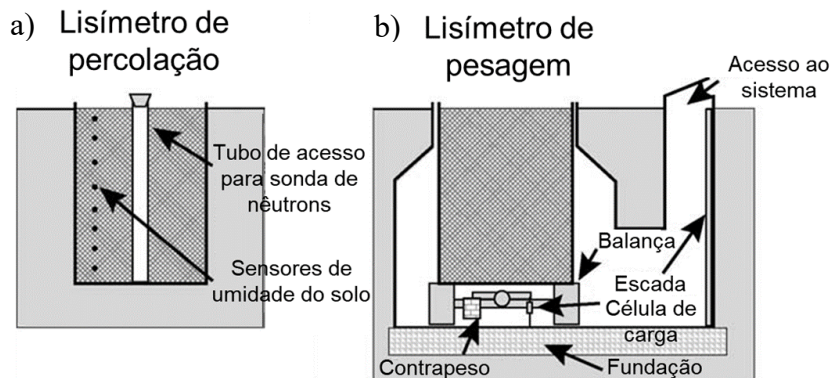
Diferentes lisímetros têm sido construídos, cada qual se baseando em requisitos específicos de acordo com o tipo de cultura, de solo e do clima; a disponibilidade de materiais e de tecnologia; e custos financeiros e de pessoal envolvidos (KHAN; MAINUDDIN; MOLLA, 1993). Entretanto, as principais características dos lisímetros são (MEISSNER; RUPP; HASELOW, 2020; HOWELL et al., 1991): o tipo de solo contido (monolítico ou reconstruído); método de medição do teor de água no solo (por pesagem ou não); tamanho do lisímetro; e tipo de drenagem do solo (por gravidade ou controlado por sucção).

Dentre os diferentes tipos de lisímetros, Howell (2005) define dois tipos amplamente utilizados: lisímetro de pesagem e lisímetros de percolação (ou de drenagem). A Figura 4 ilustra os principais componentes desses lisímetros, sendo a principal diferença deles, a forma em que o teor de água no solo é medido. Enquanto os de pesagem o determinam através de balanço de massa, os de percolação utilizam balanço hídrico. Os lisímetros de drenagem necessitam de métodos como tensiômetros, moderação de nêutrons ou reflectometria no domínio do tempo (TDR) quando se deseja medidas de evapotranspiração com melhor resolução temporal. Sem tais sensores, os lisímetros de drenagem determinam, de forma mais adequada, a evapotranspiração média



para intervalos maiores que cinco a dez dias (VAREJÃO-SILVA, 2006; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

Figura 4 - Principais componentes dos lisímetros de percolação (a) e de pesagem (b)



Fonte: traduzido de Howell (2005)

Como a evapotranspiração é determinada de forma direta por meio de balanço de massa nos lisímetros de pesagem, diversos autores os consideram como equipamentos excelentes para medição da evapotranspiração, assim como para calibrar e verificar modelos preditivos desse fenômeno (HOWELL et al., 1991; HOWELL, 2005; JENSEN; ALLEN, 2016; MEISSNER; RUPP; HASELOW, 2020; CAMPECHE, 2002).

Para Jensen e Allen (2016) é possível mensurar, por meio de lisímetros de pesagem mais simples, de forma precisa, valores de evapotranspiração em intervalos iguais ou superiores a 24 horas; já nos lisímetros mais precisos, valores de evapotranspiração em intervalos de uma ou de meia hora.

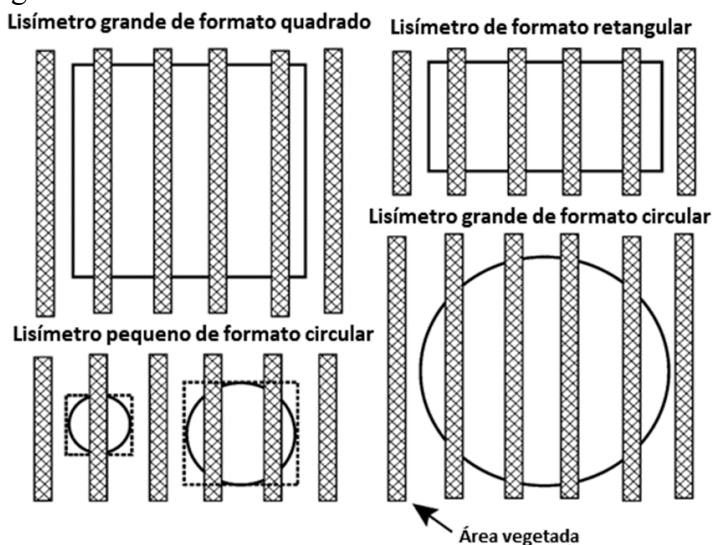
Além de ter alta resolução temporal e da medição da evapotranspiração ser de forma direta, o uso dos lisímetros de pesagem traz ainda vantagens como a possibilidade de automatização, a possibilidade de validar mecanicamente a calibração desses dispositivos e facilidade de inspeção (ALLEN et al., 2011; JENSEN; ALLEN, 2016).

Porém, desvantagens e limitações no uso desses dispositivos também existem, sendo as principais delas (ALLEN et al., 2011; JENSEN; ALLEN, 2016): alto custo de instalação, manuseio e operação; possíveis erros devido a extrapolação de dados pontuais medidos em uma pequena área; sensibilidade a condições ambientais locais; limitação do crescimento da planta devido a pouca profundidade do solo; e dificuldade de reproduzir fielmente as condições de campo.

Desse modo, com o intuito de contornar as limitações desses dispositivos, autores trazem recomendações, as quais devem ser observadas e levadas em conta para que os mesmos retratem, de forma mais fiel possível, as condições em que se desejam mensurar. Algumas das principais considerações a serem feitas no *design* de lisímetros estão descritas abaixo:

- *A vegetação* dentro do lisímetro deve ser análoga àquela que a rodeia, com mesma densidade, altura, área foliar, tipo de vegetação e estágio de desenvolvimento, assim como espaçamento e tratamento agrônômico. Já a circundante ao lisímetro necessita ser extensa o suficiente para evitar os efeitos de borda (também conhecido como efeito oásis) sobre aquela que se encontra dentro do tanque (VAREJÃO-SILVA, 2006). Para contornar o efeito oásis, Camargo (1962) recomenda irrigar uma área ao redor do lisímetro, a maior possível, em períodos secos para promover uma “área tampão”. Howell et al. (1991) e Allen et al. (2011) recomendam que a área tampão, no sentido predominante do vento, deve ser maior que 50 m e ter uma área de 1ha.
- O *formato* do lisímetro é outro fator a ser considerado. Lisímetros circulares tendem a ser mais resistentes que os de formato retangulares, porém, quando o plantio da cultura se dá em faixas e de forma espaçada, podem resultar em dimensões maiores devido à disposição da cultura. A Figura 5 ilustra como o formato do lisímetro pode não conter uma amostra representativa da cultura quando há a presença de superfícies não vegetadas, interferindo nas medições da evapotranspiração. No entanto, caso se deseja estudar plantas de menor porte como gramíneas, onde o cultivo é feito de forma mais homogênea, a forma do lisímetro não tende a afetar as medições da evapotranspiração da cultura (HOWELL et al., 1991; HOWELL, 2005).

Figura 5 - Influência da área e do formato de um lisímetro



Fonte: traduzido de Howell (2005)

- *A área* desses dispositivos, além de englobar uma parcela significativa da comunidade vegetal, deve ser grande o suficiente para minimizar os efeitos devido às paredes do tanque (VAREJÃO-SILVA, 2006). Dentre os efeitos da borda dos lisímetros, Carmeron et al. (1990) afirma que há diferenças significativas na condutividade hidráulica do solo, o qual pode interferir na evapotranspiração medida. Outro aspecto importante refere-se à área efetiva dos lisímetros, sendo aconselhado considerar a área do dossel da vegetação caso a mesma passe dos limites do lisímetro, evitando erros também conhecidos como “efeito bloom” (JENSEN; ALLEN, 2016; ALLEN et al., 2011). Para contornar o efeito *bloom*, caso ocorra, Howell (2005) recomenda que a área efetiva dos lisímetros de pesagem seja calculada considerando como limite a metade do espaçamento entre as paredes internas e externas.
- *A profundidade* dos lisímetros deve ser suficiente para proporcionar o desenvolvimento normal do sistema radicular das plantas neles situadas (VAREJÃO-SILVA, 2006; HOWELL 2005; HOWELL et al., 1991).
- *As características do solo* podem ser preservadas tal qual as encontradas no campo, amostrando um monólito de solo; caso isso não seja possível, o enchimento do tanque deve ser feito com cautela, em ordem inversa à escavação, visando reconstruir o perfil natural do solo (VAREJÃO-SILVA, 2006; HOWELL, 2005; HOWELL et al., 1991; BRUTSAERT, 1982).
- *As paredes* do lisímetro devem ser constituídas por materiais com baixa capacidade de condução térmica. Nos lisímetros de pesagem, também para evitar fluxos de calor não representativos à parede do lisímetro e por consequência ao conjunto amostrado, é possível realizar o cobrimento ou diminuir o espaçamento das paredes entre a parte interna e externa. Por outro lado, o espaçamento entre as paredes deve ser larga o suficiente para evitar contato entre elas (HOWELL et al., 1991; BRUTSAERT, 1982).

Além dos critérios de *design*, Campeche (2002) destaca a calibração do lisímetro como uma etapa igualmente importante para garantir a correta medição da evapotranspiração por esses dispositivos. Aspectos quanto a calibração e especificidades dos lisímetros de pesagem eletrônica estão apresentados no tópico a seguir.

### 2.3.1 Calibração e especificações de lisímetro de pesagem eletrônica

Dentre os lisímetros de pesagem eletrônica, diferentes mecanismos de pesagem podem ser usados: células de cargas posicionadas na parte superior do lisímetro, suspendendo-as; células de carga posicionadas na parte inferior do lisímetro; plataforma

de pesagem; e sistema de contrapesos acoplado a célula de carga com menor capacidade (PAYERO; IRMAK, 2008).

Lisímetros de pesagem eletrônica têm sido equipados com células de carga ou com plataformas de pesagens, sem o uso de mecanismos de contrapesos. Posicionando o mecanismo de pesagem embaixo do tanque, foram observadas menores interferências devido ao efeito térmico nas células de carga. Nessa configuração, com bons *dataloggers* e uma grande relação área/peso do conjunto lisimétrico, lisímetros com boa precisão para medição de evapotranspiração (na faixa de 0,1 a 0,05 mm) foram relatados (HOWELL, 2005).

Para Payero e Irmak (2008), lisímetros com uma boa sensibilidade (ou resolução) tendem a ter medidas mais precisas de evapotranspiração. Mecanismos de pesagem precisos e boa relação área/peso do lisímetro também tornam as medições mais precisas (HOWELL et al., 1991).

A forma em que é feita de conexão das células de carga com o sistema de aquisição de dados também pode interferir nas medições, causando incertezas e erros nas medições do lisímetro (AMARAL et al., 2018a). Segundo os referidos autores, existem algumas configurações de sistema de medição de peso aplicáveis aos lisímetros de pesagem: uma única célula de carga conectada ao *datalogger*; mais de uma célula de carga, cada uma conectada individualmente ao *datalogger*; células de carga conectadas a uma caixa de junção, que se conecta ao *datalogger*; e utilização de sistemas que condicionam o sinal e transmitem a informação digitalmente ao *datalogger*.

Com o intuito de verificar erros de medição assim como a incerteza dessas medidas, Amaral et al (2018a) testaram quatro configurações de sistema de medição de peso:

MS1 – células de carga conectadas a uma caixa de junção (cuja função é ligar as células em paralelo); que por sua vez é conectada a um módulo indicador de pesagem de 6 fios, sendo a função desse dispositivo compensar as perdas de excitação devido à resistência dos fios; o módulo indicador envia as informações ao *datalogger* por meio da interface de comunicação RS-232 (*Recommended Standard – 232*);

MS2 – células de carga conectadas à caixa de junção, que por sua vez está conectada por meio de 4 fios ao *datalogger*;

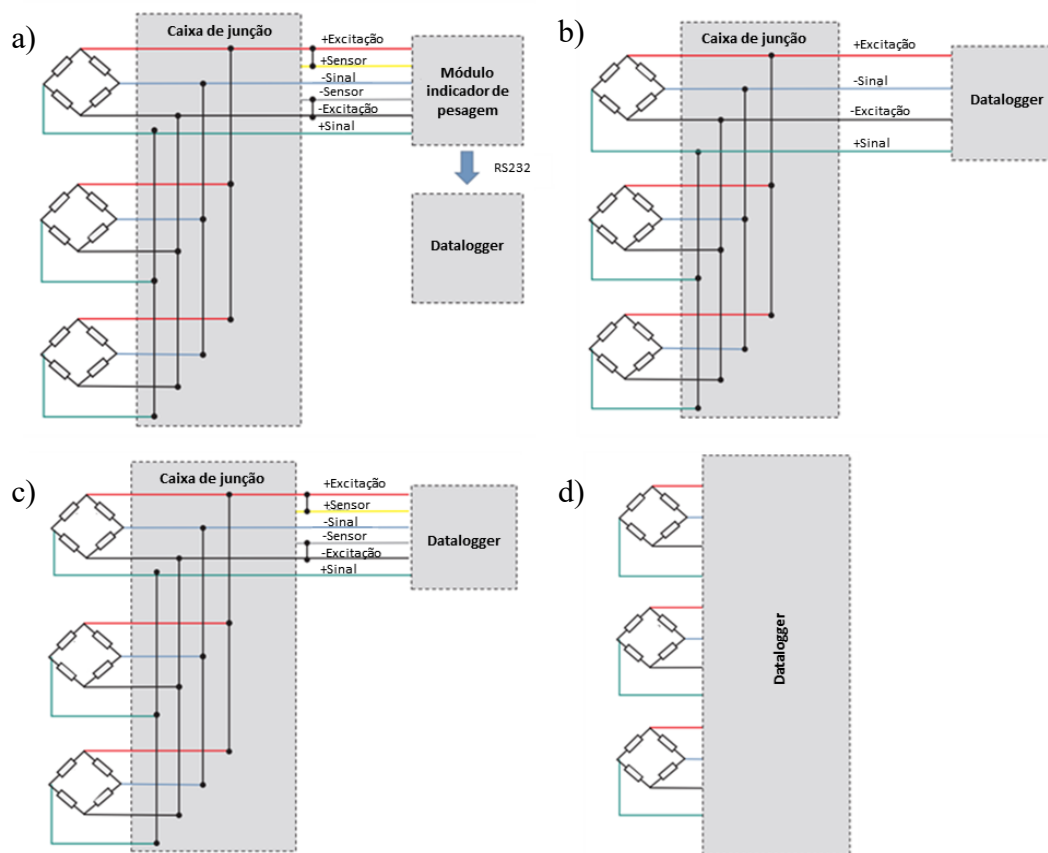
MS3 – configuração parecida com MS2, porém, a conexão entre a caixa de junção e o *datalogger* é feito por meio de 6 fios. A diferença entre a ligação de 4 e 6 fios

está na capacidade da ligação de 6 fios em compensar variações na resistência dos fios devido ao efeito da temperatura;

MS4 – células de carga conectadas diretamente ao *datalogger*.

A Figura 6 mostra os esquemas de ligações das quatro configurações testados por Amaral et al. (2018.a). Dentre as configurações, a MS1 apresentou menores erros e incertezas nas medições, seguido de MS2, MS3 e MS4, respectivamente.

Figura 6 - Configurações do sistema de sistema de medição de peso testadas por Amaral et al. (2018.a): MS1(a), MS2(b), MS3(c) e MS4 (d)



Fonte: adaptado de Amaral et al. (2018a)

Por outro lado, Schmidt et al. (2013) argumentam ser mais vantajoso realizar a ligação das células de forma individual ao *datalogger* a ligá-las em paralelo, pois nessa configuração é possível acompanhar a performance e estabilidade de cada célula de carga, tornando mais fácil a detecção caso uma delas falhe. O procedimento para verificar a configuração que resulte em menores erros de medição, pode ser feita de forma semelhante à calibração como feito por Amaral et al. (2018a). Procedimentos usuais de calibração de lisímetro de pesagem são descritos nos parágrafos a seguir.

Segundo Campeche (2002), a etapa de calibração dos lisímetros de pesagem é de extrema importância e possui três finalidades: (1) estabelecer uma relação entre o sinal de saída da célula de carga, normalmente expresso em mV, e a massa do sistema (essa relação também é conhecida como curva de calibração); (2) verificar a linearidade e a histerese da(s) célula(s) de carga; e (3) qualificar os dados medidos, assim como verificar os erros de medição.

A calibração dos lisímetros deve ser feita preferencialmente *in-situ*, nas mesmas condições climáticas do seu funcionamento, e recomenda-se realizá-la após cobrir a superfície dela para evitar que ocorra evaporação (perda de água e, por consequência, perda de massa) do solo durante o processo de calibração (HOWELL et al., 1985; HOWELL et al., 1995; CAMPECHE, 2002). Efeito do vento ou da temperatura nas medições também são reportados na literatura, sendo aconselhado realizar a calibração em momentos em que a velocidade do vento seja menor ou instalar sistema de quebra-ventos, assim como verificar a influência da temperatura nas medições (FARIA et al., 2006; AMARAL et al., 2018a; MARTIN et al., 2001).

Autores como Wheeler e Ganji (1996), CAMPECHE (2002) e Amaral et al. (2018a) trazem como procedimento para calibração de um sistema de medição de peso, ciclos de carga e de descarga, onde massas conhecidas (massas-padrão) são adicionadas e retiradas sucessivamente e os respectivos sinais lidos pelo sistema de medição são registrados. Com esse procedimento, constrói-se a curva de calibração (relação entre a massa medida e seu respectivo sinal medido) por regressão linear e avaliam-se as medições por meio de alguns parâmetros.

Os pesos utilizados nos ciclos de carga e descarga variam. Payero e Irmaky (2008) utilizaram dez pesos (total de 273 kg ou 117,5 mm ET) na calibração de um lisímetro quadrado de lados com 1,52 m e profundidade de 2,13 m. O valor de 117,5 mm ET foi obtido considerando 80% da máxima depleção da água no solo por uma cultura de milho. Howell et al. (1995), de forma semelhante, utilizaram pesos acumulados totais equivalentes a 336 mm ET (3024 kg) na calibração de um lisímetro de 9 m<sup>2</sup> com 2,3 m de profundidade, sendo a altura da lâmina de água evaporada baseada na máxima capacidade de extração da água no solo por diferentes cultivos.

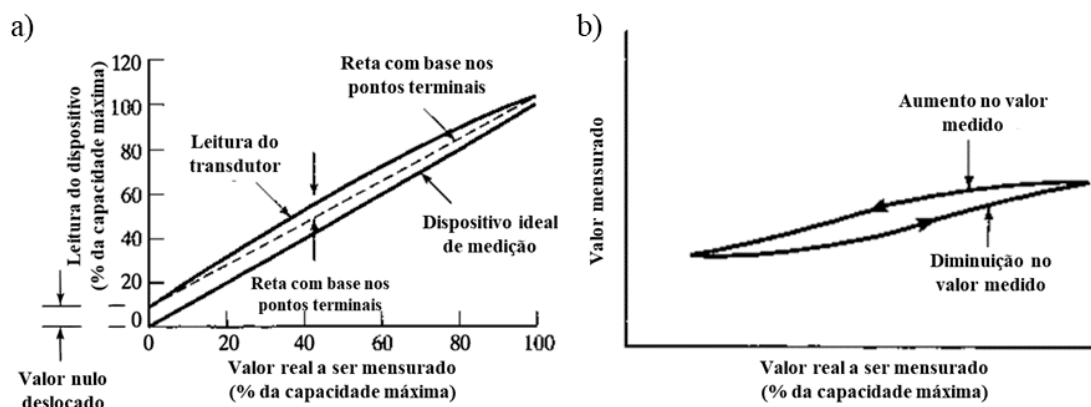
Os parâmetros mais utilizados para avaliar a calibração dos lisímetros são: erro máximo absoluto (EMA); histerese; repetitividade; não-linearidade; coeficiente de



determinação ( $R^2$ ); erro padrão da estimativa (SEE); resolução e sensibilidade do equipamento.

Erro máximo absoluto (EMA), histerese, repetitividade e não linearidade são parâmetros que verificam os desvios entre as massas-padrão adicionadas ou retiradas e seus respectivos valores medidos usando a curva de calibração. EMA refere-se ao maior desvio absoluto em todos os ciclos de calibração; histerese ao maior desvio considerando os ciclos de carregamento e de descarregamento separados; e erro de repetitividade, ao maior desvio, em sucessivas medições, nos ciclos de carregamento e descarregamento para a mesma massa de referência. Já a não linearidade é o maior desvio dos pontos em relação a uma linha traçada entre o maior e o menor valor utilizado na calibração. Por serem parâmetros baseados nos desvios das medições, normalmente são expressos em massa (kg) ou equivalente à lâmina de água evaporada (mm ET). A Figura 7 ilustra os comportamentos de não linearidade e de histerese.

Figura 7 - Representação gráfica da não linearidade (a) e histerese (b)



Fonte: traduzido de Wheeler e Ganji (1996)

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é um parâmetro que varia de 0 a 1 e mostra o quão próximos os dados estão da curva de calibração obtida pela regressão linear dos pontos obtidos nos ciclos de carregamento e/ou descarregamento. Já erro padrão da estimativa da regressão (SEE) indica o desvio padrão das variáveis dependentes (massa) ao redor da linha de regressão ou, no caso, a curva de calibração (sinal elétrico x massa). SEE pode ser expresso em massa (kg) ou equivalente a lâmina de água evaporada (mm ET), sendo reportados uso de lisímetros com SEE de até 0,66 mm ET para a determinação da evapotranspiração em culturas agrícolas (AMARAL et al, 2018a; CARVALHO et al., 2007). Segundo Wheeler e Ganji (1996), SEE é obtido pela Equação 3:

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$y_i$  = massa-padrão (unidade de peso ou mm ET)

$\hat{y}_i$  = massa obtida pela curva de calibração (unidade de peso ou mm ET)

$n$  = número de pontos para a confecção da curva de calibração

A resolução é influenciada pelas características inerentes do conjunto célula de carga- *datalogger* e a sensibilidade pode ser obtida de forma teórica por especificações dos componentes do lisímetro ou verificando os menores valores de mudança de massa que podem ser detectadas pelo dispositivo em um intervalo de tempo. Ambos podem ser expressos em unidades massa (kg) ou equivalente a lâmina de água evaporada (mm ET). Lisímetros com resolução de 0,02 a 0,05 mm ET podem ser utilizados para a determinação da evapotranspiração em intervalos horários (HOWELL et al., 1985; MAREK et al., 1988)

Após a calibração, caso seja percebido uma grande variabilidade nas medições devido ao efeito da temperatura, é possível criar uma função para corrigi-la (BELLO; RENSBURG, 2017) ou considerar o período noturno, sempre no mesmo horário, para contabilizar a ET diária (FELLER, 2011). Já para diminuir a interferência do vento nas medições, aconselha-se fazer uma maior amostragem para o mesmo intervalo de medição, suavizando as variações instantâneas devido a oscilações de massa causadas pelo vento, portanto, diminuindo possíveis erros devido ao efeito do vento sobre a medição (HOWELL et al., 1995; FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006).

### 2.3.2 Custos da instrumentação de lisímetros e eletrônica aberta

Para Campeche (2002), o uso dos lisímetros de pesagem eletrônica, cenário distante para a maioria das instituições de ensino e pesquisa há algumas décadas, foi possível nos dias atuais pelo desenvolvimento da microeletrônica. Embora tenha um maior acesso desses equipamentos devido ao avanço tecnológico, os custos envolvidos



na instalação e manutenção ainda dificultam a sua utilização, especialmente em países em desenvolvimento como no caso do Brasil (FELTRIN et al., 2017).

Algumas tentativas de tornar os lisímetros de pesagem eletrônica mais acessíveis são observadas nos trabalhos de Allen e Fisher (1990), Fisher (2012), Bello e Rensburg (2017) e Israilev (2017). Os autores relatam os custos envolvidos na construção desses dispositivos, auxiliando no entendimento dos valores que são envolvidos na aquisição dos mesmos.

Allen e Fisher (1990) citam que o custo de construção de dois lisímetros de pesagem eletrônica em Utah (EUA), incluindo mão de obra, foi de USD 11000. Os lisímetros tinham área de 1m<sup>2</sup> e profundidade de 1,2 m, com quatro células de carga, uma em cada vértice, suspendendo o tanque interno. Fisher (2012), por sua vez, relatou que os custos de material para a construção de dois lisímetros com largura de 1m, comprimento de 1,5m e profundidade de 1,5m em Mississipi (EUA) foi, para cada lisímetro, USD 1700, sendo: USD 700 para a parte estrutural dos tanques; USD 820 para as quatro células de carga, USD 100 para o sistema de nivelamento; e USD 30 para tubos e conexões de PVC (do sistema de drenagem).

Bello e Rensburg (2017) utilizaram pequenos lisímetros de baixo custo para monitoramento de evapotranspiração e evaporação em Bloemfontein (África do Sul). No total, foram montados 42 lisímetros feitos de material plástico de 0,31m de diâmetro e 2 m de profundidade. Cada lisímetro era apoiado sobre célula de carga Tedeo-Huntleigh model 1260 e todas as células de carga eram conectadas a um multiplexador (AM 16/32B) antes de se conectarem ao *datalogger* (Campbell scientific CR1000). O custo total de material para 41 lisímetros foi de USD 21.171, sendo cerca de USD 520 para cada lisímetro.

Israilev (2017) desenvolveu um lisímetro de pesagem portátil com 0,4m de comprimento, 0,25 m de largura e 0,4 m de profundidade. As paredes do lisímetro foram construídos em acrílico isolado por uma camada de poliestireno expandido e manta asfáltica reflexiva. O sistema de medição de peso era constituído por uma célula de carga com capacidade de 300kg (marca Líder, modelo PLA) e a aquisição de dados foi através da plataforma Arduino, utilizando componentes eletrônicos (como amplificador de sinal, módulo *datalogger*, regulador de tensão) também de baixo custo. Segundo o autor, os custos de material para a construção do referido lisímetro foram de menos de R\$ 1500.

Embora os trabalhos apresentados tenham objetivos, características construtivas e tecnológicas diferentes, assim como diferentes custos regionais de mão-de-obra ou de materiais, é possível perceber que, com o passar dos anos e o avanço na microeletrônica, os custos envolvidos na aquisição de lisímetros de pesagem tende a diminuir.

O uso de plataforma de prototipagem eletrônica aberta, como no caso do Arduino por Israilev (2017) também possibilitou uma redução nos custos de instrumentação do lisímetro construído. Embora não tenham levantados os custos dos projetos, autores como Machado (2019), Encinas (2019) e Merino (2016) também utilizaram plataformas de prototipagem de eletrônica aberta no desenvolvimento de sistemas de medição de peso com o intuito de diminuir os custos desses equipamentos.

Apesar do termo “eletrônica aberta” ou eletrônica de *open source* existir a algum tempo, seu uso tem crescido somente nos últimos tempos devido às placas e plataformas de desenvolvimento a um custo relativamente baixo que adentraram ao mercado (ORTIZ, 2019). Dentro do contexto da eletrônica de *open source*, ainda é possível dividi-la em *open source software* (*softwares* ou programas de fontes abertas) e em *open source hardware* (*hardwares* de fonte aberta). Ambos compartilham de filosofias semelhantes, de serem livres e de irrestrita utilização, assim como terem o código ou esquemáticos abertos para modificação.

A Open Source Hardware Association (OSHWA) define *open source hardware* como um termo utilizado para “artefatos tangíveis (máquinas, dispositivos ou outros objetos físicos) cujo projeto foi disponibilizado ao público de modo que qualquer um pode construir, modificar, distribuir e utilizar estes artefatos” (OSHWA, 2013). Entretanto, para a fabricação do hardware, é necessário um investimento na placa de desenvolvimento e nos componentes que serão utilizados para a montagem da mesma (ORTIZ, 2019).

As plataformas de desenvolvimento de projetos eletrônicos que têm se destacado e que se tornaram populares, justamente por serem de eletrônica aberta, são (COSTA; DURAN-FAUNDEZ, 2018): Raspberry Pi; BeagleBoard; e Arduino. Elas compartilham de características semelhantes, como versatilidade e economicidade, sendo úteis para criar virtualmente qualquer tipo de dispositivo por serem normalmente de design simples e modular (COSTA; DURAN-FAUNDEZ, 2018; URBAN, 2015)

Segundo Costa e Duran-Fernandez (2018), a plataforma Arduino, diferente da Raspberry Pi e da BeagleBoard, não funciona como um computador em miniatura. Seu

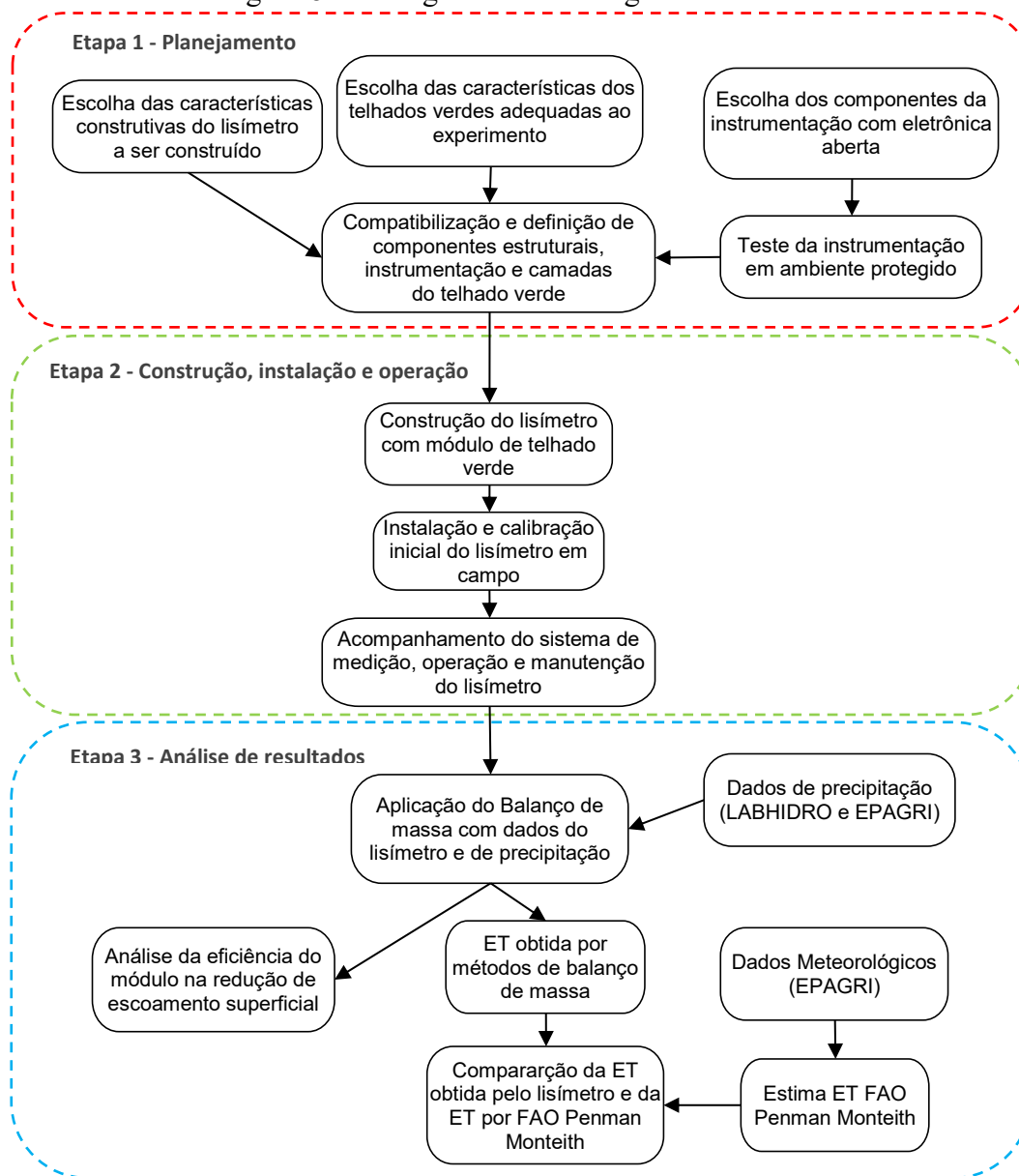
uso é voltado para automação e projetos eletrônicos que exigem execução repetida de algumas tarefas, assim, são munidos de recursos de software e de hardware mais limitados. Por possuírem microcontroladores mais simples, memória RAM e velocidade de processamento menores, as placas da plataforma Arduino normalmente são mais baratas quando comparadas com as outras plataformas citadas.

Nesse sentido, diversos equipamentos que normalmente seriam custosos e inacessíveis para muitas instituições de ensino e pesquisa, especialmente em países em desenvolvimento como no caso do Brasil, podem ser desenvolvidos por meio da eletrônica aberta, ampliando as possibilidades de pesquisas em diversas áreas do conhecimento. No que se refere ao monitoramento hidrológico e, no caso deste estudo, a evapotranspiração em telhados verdes por meio de lisimetria, o uso de eletrônica aberta também se apresenta ser uma possibilidade pelos sensores e componentes disponíveis.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do presente trabalho, foi prevista a execução de três etapas metodológicas principais, conforme ilustrado na Figura 8, sendo: (1) planejamento dos componentes do lisímetro de pesagem eletrônica de baixo custo para determinação da evapotranspiração em telhados verdes do tipo extensivo; (2) construção, instalação e operação do lisímetro com instrumentação de baixo custo; (3) análise dos resultados obtidos pelo lisímetro considerando seu comportamento hidrológico, manejo de águas pluviais e comparação com a evapotranspiração estimada por FAO Penman Monteith (Allen et al., 1998).

Figura 8 - Fluxograma metodológico do trabalho



Fonte: elaborada pelo autor

A Primeira Etapa visou o planejamento de um lisímetro de pesagem eletrônica de baixo custo para determinar a evapotranspiração em telhados verdes do tipo extensivo. Para isso, foi necessário o levantamento na literatura sobre características e recomendações construtivas desses dispositivos, bem como dos telhados verdes. Ainda, fez-se necessário conciliar tais características levantadas com a disponibilidade de materiais e de instrumentação com eletrônica aberta, tendo em vista o baixo custo.

Após a seleção dos componentes do dispositivo, foram realizados testes dos componentes constituintes e sua calibração em ambiente protegido, a fim de averiguar a qualidade e os erros de medição frente a possíveis configurações do sistema de medição de peso. Tendo compatibilizados a melhor configuração do sistema de medição de peso com as características do lisímetro e do telhado verde, assim como definido o local para instalação do dispositivo, avançou-se para a etapa de construção e operação.

Na Segunda Etapa, o lisímetro de pesagem eletrônica de baixo custo foi construído conforme resultados da Primeira Etapa. Uma calibração in-loco foi feita inicialmente para abranger melhor as condições de funcionamento em campo do dispositivo. Durante a operação do lisímetro, calibrações e manutenções também foram feitas para certificar o correto funcionamento do dispositivo.

Por fim, na Terceira Etapa, com os dados obtidos do conjunto lisimétrico, foram estimados balanços de massa, junto com os dados de precipitação local, obtendo a evapotranspiração mensurada e o comportamento do módulo de telhado verde na redução do escoamento superficial.

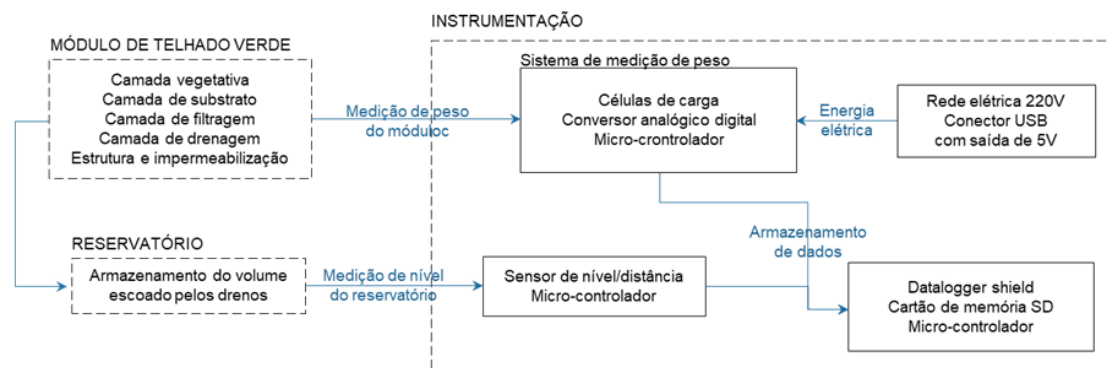
Ainda, com os dados climáticos da estação meteorológica da EPAGRI (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina), foi feita a estimativa de evapotranspiração utilizando o método FAO Penmann-Montheit para verificar se os valores estimados se aproximam dos valores medidos, assim como a necessidade de coeficientes de cultura ou de estresse hídrico para ajuste da estimativa.

### 3.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO LISÍMETRO

No planejamento do lisímetro proposto neste trabalho, seguiu-se tanto orientações e recomendações levantados em literatura de lisímetro de pesagem, quanto as de telhado verde do tipo extensivo, além de observar a capacidade máxima de medição do sistema de pesagem e os materiais com disponibilidade local.

A Figura 9 apresenta os principais elementos constituintes do lisímetro. As características gerais do conjunto lisimétrico e especificidades do módulo de telhado verde são apresentadas neste tópico e as especificidades da instrumentação eletrônica são apresentadas no tópico 3.2.

Figura 9 – Principais elementos constituintes do lisímetro



Fonte: elaborada pelo autor

As orientações no que tange à construção de lisímetros como de evitar transferência de calor pelas paredes do lisímetro (HOWELL et al., 1991), de obter uma relação área/profundidade grande (HOWELL, 2005; HOWELL et al., 1991) foram conciliadas com as diferentes camadas e especificações dos telhados verdes (vegetação, substrato, drenagem e declividade do fundo, por exemplo).

Tomou-se cuidado para que o lisímetro projetado tivesse o peso máximo dentro da capacidade de medição das células de carga, evitando que elas fossem danificadas com o aumento do peso do conjunto medido, além de que sua construção utilizasse materiais e instrumentação com custos reduzidos.

As características do telhado verde foram escolhidas seguindo especificações e recomendações para telhados verdes e seguindo observações durante sua construção:

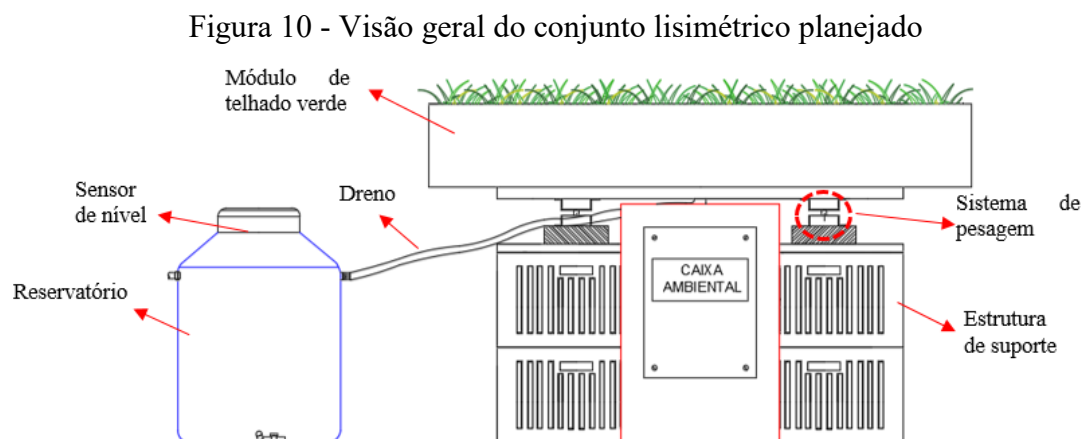
- Vegetação: baixa diversidade (HUI, 2016; e ROLA, 2008), sendo escolhida grama do tipo São Carlos por ser uma vegetação nativa e se adaptar a condições climáticas e de telhados verdes, sem necessidade de irrigação durante o estudo KLEIN (2017);
- Substrato: disponibilidade no mercado, com profundidade de 10 cm (HUI, 2016);
- Drenagem: em argila expandida, conforme indicado por Vijayaraghavan (2016);
- Camada Filtrante: manta geotêxtil, conforme citado por Jobim (2013);
- Declividade do fundo: de 1%, permitindo o escoamento e direcionamento da água do fundo do lisímetro para o dreno; e
- Camada impermeabilizante: lona plástica e silicone, pela facilidade de aplicação e disponibilidade no mercado.

- As orientações seguidas, no que tange à construção de lisímetros, foram:
- Evitar transferência de calor pelas paredes do lisímetro (HOWELL et al., 1991), utilizando madeira para a construção das paredes do lisímetro.
- Obter uma relação área/profundidade grande (HOWELL, 2005; HOWELL et al., 1991).
- Ainda, para diminuir efeitos de borda, foi levada em consideração na escolha do local da instalação do dispositivo, um local cuja área ao redor possuísse vegetação gramínea, semelhante à do lisímetro (CARMERON et al., 1990; VAREJÃO-SILVA, 2006).

Em adição, tomou-se cuidado para que o conjunto lisimétrico utilizasse materiais e instrumentação com custos reduzidos, bem como, o peso máximo do conjunto lisimétrico deveria estar dentro da capacidade de medição das células de carga, evitando que estas fossem danificadas com o aumento do peso do conjunto medido.

A Figura 10 apresenta a visão geral do conjunto lisimétrico planejado. Neste trabalho, o conjunto caixa lisimétrica e as camadas simulando um telhado verde do tipo extensivo foi denominado de “módulo de telhado verde”. O módulo de telhado verde durante/após um evento de chuva, direciona água para o reservatório, através do dreno. O sistema de pesagem contém células de carga que enviam o peso medido ao datalooger, instalado dentro da caixa ambiental. O módulo é elevado através de estruturas de suporte, para que a água escoe ao reservatório apenas pela ação gravitacional. Dentro do reservatório, está instalado um sensor de nível, permitindo a medição do nível da água drenada pelo fundo do módulo de telhado verde experimental.

Para o reservatório, escolheu-se utilizar uma bombona, em detrimento a uma caixa d’água. Isto, se justifica em função de ocupar uma área menor, podendo resultar em erros de leitura de volume menores caso ocorram erros nas leituras no nível d’água dentro do reservatório.

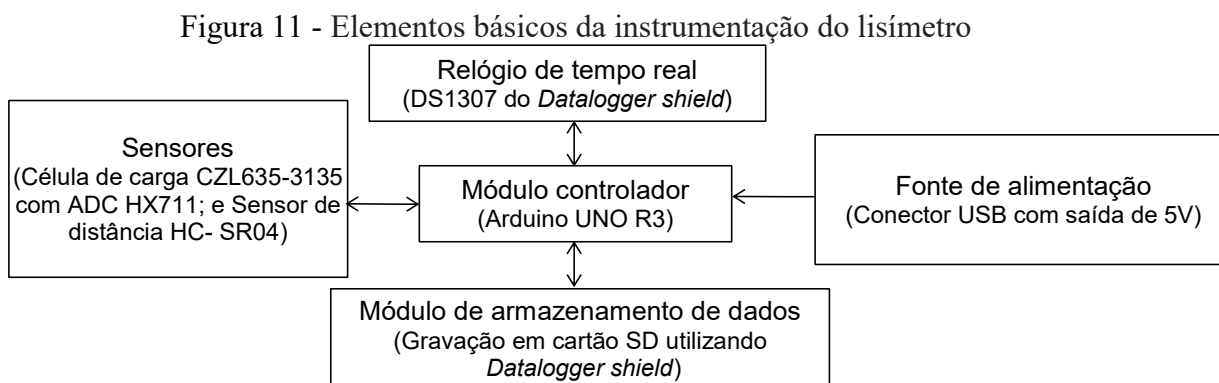


Fonte: elaborada pelo autor

### 3.2 INSTRUMENTAÇÃO DO LISÍMETRO

O sistema de medição de peso foi criado utilizando-se plataformas de desenvolvimento de projetos eletrônicos do tipo *open-source*. A escolha dos elementos formadores do dispositivo desenvolvido (como células de carga, amplificadores de sinais elétricos, módulo armazenamento de dados) também foi feita com base nos custos de aquisição, além do atendimento às funções requisitadas e facilidade de aquisição pela disponibilidade no mercado.

Os elementos básicos que compõem a instrumentação do lisímetro proposto estão apresentados, de forma resumida, na Figura 11.



Fonte: elaborada pelo autor

A fonte de alimentação fornece energia elétrica para o funcionamento do dispositivo, o qual foi montado sobre a plataforma Arduino (Módulo controlador). A escolha dessa plataforma foi motivada pela existência de uma comunidade virtual ativa que compartilha seus diagramas de circuito, esquemas de ligações e códigos de projetos de diversas áreas; além da existência de emuladores e programas gratuitos que permitem o teste virtual antes de obter e montar os componentes de forma física.

A placa do Arduino controla os sensores (de nível no reservatório, células de carga para medição do peso dos módulos e sensores de temperatura e umidade para verificar a influência destes parâmetros na medição do peso e realizar correções), cujos dados foram obtidos em intervalos de tempo definidos de 5 minutos, com a ajuda do Relógio de tempo real e armazenados para posterior acesso aos dados no módulo de armazenamento de dados.

A seguir, são apresentadas informações e especificidades de cada elemento básico que compõe a instrumentação dos lisímetros.



### 3.2.1 Arduino UNO R3

Arduino é uma plataforma de eletrônica aberta, constituído por *hardware* e *software* livres e simples de usar, com placas capazes de suportar desde projetos para o uso cotidiano até instrumentos científicos complexos (ARDUINO, 2018). Para que o microcontrolador do Arduino execute os comandos implementados, é possível utilizar o ambiente integrado de desenvolvimento (IDE) do Arduino, software livre baseado na linguagem Processing.

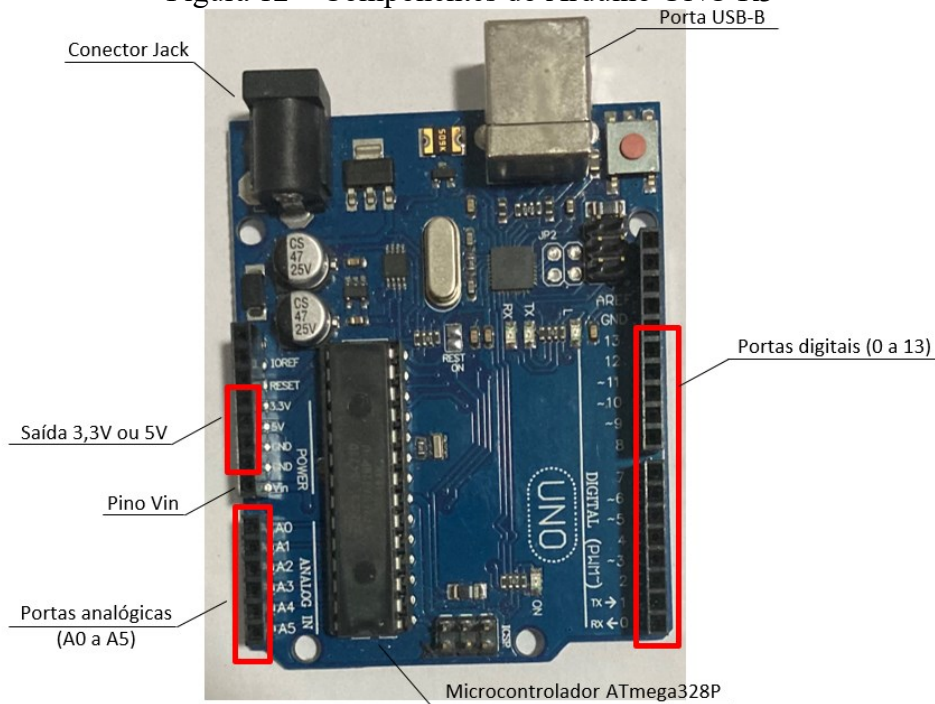
Por meio do IDE do Arduino, é possível programar, corrigir os erros de softwares e gravar o programa na placa Arduino. No ambiente IDE o *sketch* (bloco de códigos/programa) é inserido para que o mesmo seja convertido em uma linguagem compreensível pelo microcontrolador (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013).

O sketch inserido no IDE se assemelha à linguagem de programação C e muitas vezes existem códigos já criados para certos componentes ou funções (chamados de Biblioteca). Assim, o desenvolvedor não é obrigado a criar o programa do zero para um projeto em específico, facilitando o processo de desenvolvimento caso o usuário opte por usá-las (MCROBERTS, 2011). O IDE do Arduino é pré-carregado de diversas bibliotecas e é possível carregar uma biblioteca externa caso seja disponibilizada por terceiros.

Existem diferentes placas Arduino, cada qual com diferentes características, como poder de processamento, memória, microcontrolador, quantidades de portas digitais e analógicas. Arduino UNO, Arduino Leonardo, Arduino Nano, Arduino Micro, Arduino Mega e Arduino due são exemplos de modelos existentes no mercado (ARDUINO, 2021).

A placa Arduino UNO R3 foi selecionada para o presente trabalho devido ao seu baixo custo; à facilidade de aquisição no mercado nacional; ao número suficiente de portas de entrada e saída para os elementos constituintes previstos para os lisímetros; e pelos *shields* disponíveis no mercado. A palavra *shield* é utilizado para denominar placas especializadas que podem ser conectadas sobre a placa do Arduino e sobre outros *shields*, expandindo a funcionalidade básica do Arduino (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013). Na Figura 12 é possível visualizar a placa do Arduino UNO e os componentes dela mencionados.

Figura 12 – Componentes do Arduino UNO R3



Fonte: elaborada pelo autor

O Arduino UNO R3 possui o microcontrolador ATmega328P, 14 portas que podem funcionar como pinos de entradas ou saídas, sendo 6 delas de entrada analógicas. A placa é alimentada por meio do Conector Jack, pela porta USB ou pelos pinos VIN e GND e pode alimentar componentes eletrônicos de 5 ou 3,3V. As especificações da placa usada são (ARDUINO, 2021):

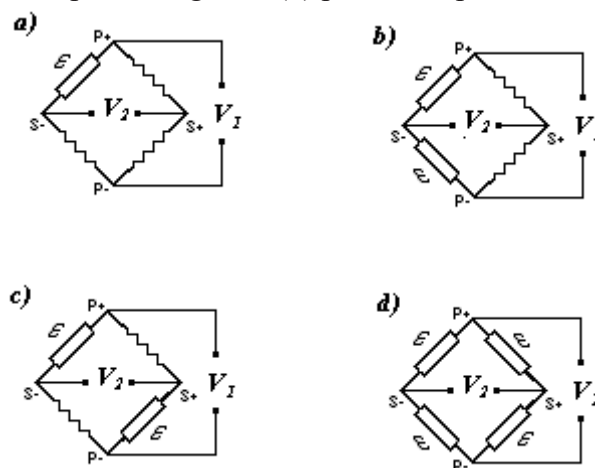
- Microcontrolador: ATmega328P.
- Voltagem Operacional: 5V;
- Voltagem de entrada (recomendada): 7-12V;
- Voltagem de entrada (limites): 6-20V;
- Portas de entradas/saídas digitais: 14 (desses, 6 podem ser saídas PWM);
- Portas de entrada analógica: 6;
- Corrente CC por porta E/S: 40 mA;
- Corrente CC para o pino 3,3V: 50 mA;
- Memória Flash: 32 KB (ATmega328P);
- SRAM: 2 KB (ATmega328P);
- EEPROM :1 KB (ATmega328P);
- Velocidade de Clock: 16 MHz;
- Dimensões: 68,6 mm x 53,4 mm;
- Peso: 25 g.

### 3.2.2 Célula de carga CZL635-3135

Células de carga são sensores que, por meio de sua deformação, convertem informações como força, tensão mecânica e/ou pressão, em sinais elétricos. Células de carga piezoelétricas são capazes de gerar tensão elétrica por resposta a uma pressão mecânica, sendo mais utilizados em situações dinâmicas. Em função das células de carga com piezoelétricos serem caras e com grau de eficiência elevada, células de carga com extensômetros elétricos do tipo resistivos, ligadas em ponte de *Wheatstone* são mais utilizadas para medir grandezas físicas como força ou pressão (VIEIRA, 2016).

Dependendo do número de extensômetro utilizado, a célula de carga pode possuir configuração de um quarto de ponte, meia ponte, ponte diagonal ou ponte completa, conforme ilustra a Figura 13. Segundo Grante (2004), extensômetros mais comuns são os metálicos de resistência elétrica variável, os quais se baseiam na mudança de sua resistência elétrica quando submetidos a tensões mecânicas. Na referida figura, aplica-se uma tensão ( $V_1$ ) entre os pontos P+ e P- e mede-se a tensão de saída da ponte  $V_2$  nos pontos S+ e S-, sendo a resistência dos extensômetros ( $\varepsilon$ ) influenciada pela sua deformação, variando a tensão  $V_2$ .

Figura 13 - Configurações das pontes de Wheatstone (a)  $\frac{1}{4}$  de ponte; (b)  $\frac{1}{2}$  ponte; (c) ponte diagonal; (d) ponte completa



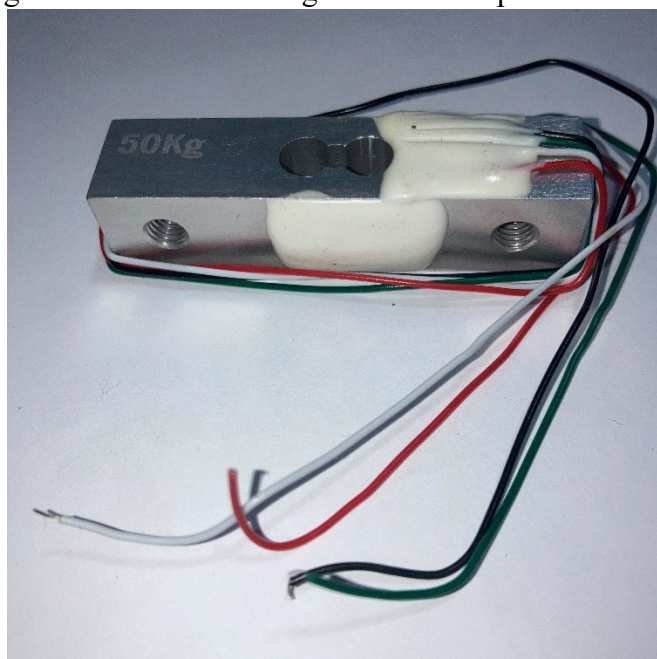
Fonte: Grante (2004).

Assim, as células de carga com extensômetros do tipo resistivo são comumente utilizados em balanças eletrônicas, medindo o peso de um objeto por meio da deformação causada nas células de carga. A deformação, por sua vez, altera o sinal elétrico de saída da ponte, sendo a variação de sinal elétrico lido pelo sistema de aquisição de dados, o qual é interpretado como a variação de peso do sistema devido ao peso do objeto (SLATTERY; NILE, 2005; GRANTE, 2004).

Tendo em vista a disponibilidade no mercado nacional e em lojas especializadas em eletrônica aberta, a sua capacidade de medição e a facilidade na montagem, foram selecionadas para a presente pesquisa as células de carga do modelo CZL635-3135 (PHIDGETS, 2016).

A célula de carga selecionada (Figura 14) tem capacidade de medição de até 50 kg, possibilita a fixação por meio de parafusos do tipo M5 e possui extensômetros na configuração de ponte completa. A célula de carga possui quatro fios, sendo: vermelho (excitação – E+); preto (excitação – E-); verde (Sinal – S+); e branco (sinal – S-).

Figura 14 – Célula de carga selecionada para o lisímetro



Fonte: elaborada pelo autor

Segundo Vieira (2016) as células de carga do tipo ponte completa possuem vantagens sobre as demais por terem maior sensibilidade nas medições e, tal como as de meia ponte, podem ter compensação de temperatura devido a sua configuração. As informações técnicas da célula de carga utilizada, informadas na folha de dados do fornecedor, podem ser encontradas no ANEXO A.

### 3.2.3 Sensor de temperatura e umidade AM2302

Devido a possibilidade das medições do sistema de medição de peso serem influenciados pela temperatura e pela umidade (Amaral et al., 2018a; Martin et al., 2001;

BELLO; RENSBURG, 2017; VIEIRA, 2016), esses parâmetros foram monitorados para verificar seu possível efeito nas medições feitas pelos lisímetros de pesagem.

Para a coleta de dados de temperatura e umidade relativa do ar, foi utilizado o módulo/sensor AM2302, também chamado de DHT22 (Figura 15). O módulo possui um sensor capacitivo de umidade e um sensor de temperatura de alta precisão calibrado em fábrica e opera com tensão de 3,3 a 5,5V, sendo 5V recomendado pelo fabricante. AM2302 necessita de um tempo de resposta de 2 segundos e opera na faixa de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$  e 0 % a 100%, com precisão de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  e  $\pm 2\%$  e resolução de  $0,1^{\circ}\text{C}$  e 0,1% para temperatura e umidade relativa do ar, respectivamente (AOSONG, 2020).

Figura 15 – Sensores de temperatura e umidade DHT22/AM2302



Fonte: elaborada pelo autor

Os sensores são conectados a uma placa com quatro terminais, sendo apenas três utilizados: VCC (alimentação); Data (dados); e GND (alimentação). O sinal de saída é digital, sendo necessário para a comunicação entre AM2302 com o Arduino, um resistor de 10 k $\Omega$  conectando os terminais VCC e Data, com função de pull-up (THOMSEN, 2015).

### 3.2.4 Conversor analógico-digital (ADC) HX711

Conversores analógico-digitais (ADCs) são componentes responsáveis em transformar grandezas do mundo real, que são analógicas (temperatura, distância, pressão) em sinais digitais, sendo os últimos mais fáceis de serem processados (ANJOS, 2014).

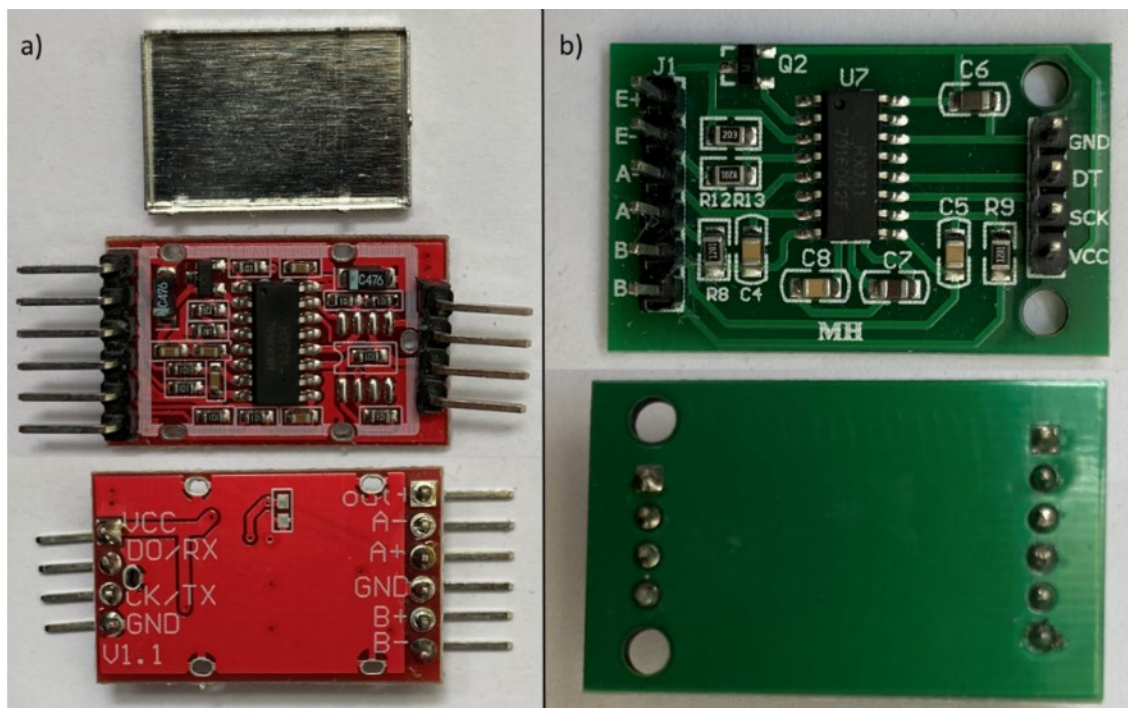
Uma das características mais importantes que auxiliam na escolha de um ADC é a sua resolução de *bits* (MERINO, 2016). No Arduino UNO, os pinos de entrada analógica são de 10 *bits*, assim, usando uma tensão de referência 5V, a resolução de leitura dos pinos é de cerca de 4,9 mV/bit ( $5 \text{ V}/2^{10} \text{ bit}$ ). É possível mudar a tensão de referência para uma menor que 5V por meio da função “analogReference” (ARDUINO, 2020). No entanto, mesmo mudando a tensão de referência, devido à baixa resolução dos pinos analógicos, é necessário o uso de um ADC externo com maior resolução para realizar leituras dos sinais de saída das células de carga.

Para possibilitar a leitura dos sinais das células de carga, que pela folha de dados seria cerca de 0.5mV/kg quando excitadas por 5 VDC, foi selecionado o ADC HX711 (AVIA-Semiconductor). O HX711 que conta com 24 bits de resolução, foi criado para ser utilizado junto com células de carga em balanças eletrônicas e em processos industriais. Opera com uma alimentação de 2.6V a 5.5V, possui dois pares de canais diferenciais (canal A e B) e amplificação de ganho programável de 32, 64 e 128. A comunicação do referido ADC com o Arduino se dá por meio de dois pinos (DOUT e PD\_SCK). A folha de dados contendo as especificações do HX711 se encontra no ANEXO B.

Pelo HX711 ser um Hardware de *open-source*, é possível encontrar placas confeccionadas por diferentes fabricantes, o que implica em preços e qualidades distintos. Foram testados dois modelos de HX711, sendo o verde e o vermelho (Figura 16). Além da diferença na coloração, os componentes da placa vermelha aparentam ser mais robustos, de melhor qualidade e segundo o fornecedor, a placa vermelha possui um mecanismo de blindagem. Segundo Encinas (2019), utilizando HX711 com 5V de referência, o canal A e ganho de 128, é possível realizar leituras na ordem de  $\frac{1 \text{ mV}}{\text{V}} * 5\text{V} * 128$   
 $= 38,15 \text{ nV}$ .



Figura 16 – ADCs utilizados a) HX711 vermelho (com blindagem) e b) HX711 verde



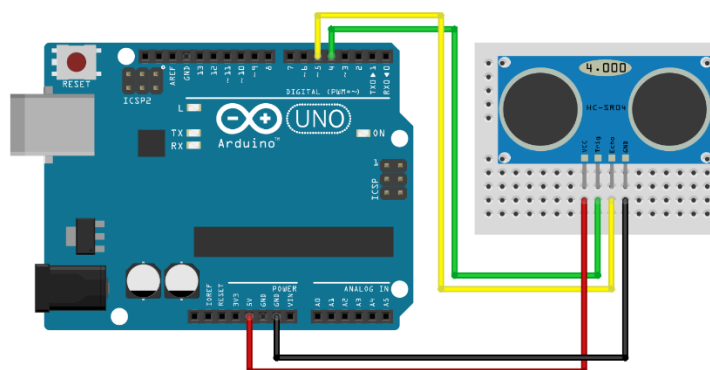
Fonte: elaborada pelo autor

### 3.2.5 Sensor de distância HC-SR04

O sensor de distância ultrassônico HC-SR04 foi utilizado para medir o nível do reservatório que capta a água escoada pelo dreno do módulo de telhado verde (ou tanque lisimétrico). As distâncias são obtidas por meio da medição do tempo em que um pulso ultrassônico emitido é recebido pelo sensor, sendo seu uso relatado em trabalhos para medição de nível de água em reservatórios e em condições dinâmicas (MINETTO et al., 2020; PERSCH, 2019).

O sensor necessita de uma alimentação de 5 V e opera a uma corrente elétrica de 2 mA. Ele possui um alcance de 2 cm a 4 m com precisão de medição de 3 mm, sendo necessário dois pinos digitais para seu funcionamento (THOMSEN, 2011), conforme o esquemático da Figura 17.

Figura 17 - Sensor de distância HC-SR04 conectado ao Arduino UNO

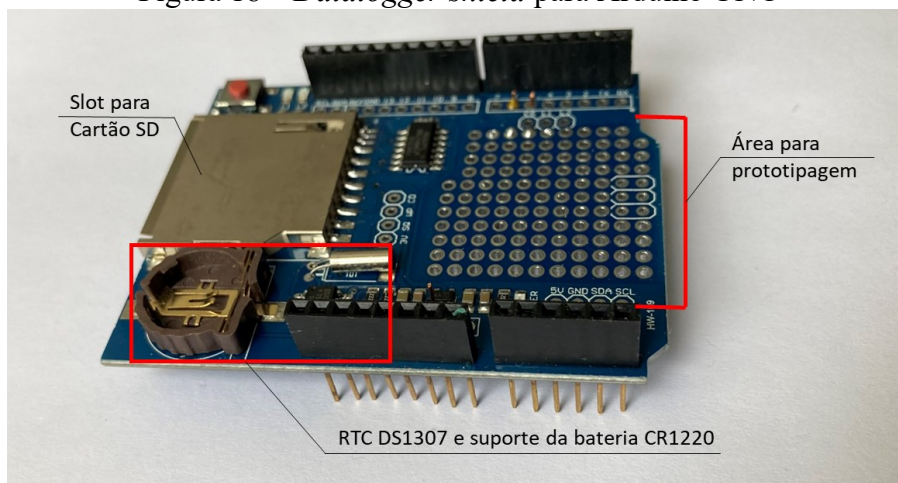


Fonte: Thomsen (2011)

### 3.2.6 Datalogger Shield

O Datalogger shield (Figura 18) foi utilizado para armazenar as medições do lisímetro em um cartão SD. O Datalogger shield possui um Relógio em Tempo Real (RTC) DS1307 e um slot para leitura e gravação de cartão SD integrados a uma placa com uma área de prototipagem. Uma bateria CR1220 mantém as informações de data e hora, do RTC mesmo que o Arduino seja desprovido de alimentação.

Figura 18 – Datalogger shield para Arduino UNO



Fonte: elaborada pelo autor

### 3.2.7 Fonte de Alimentação

Como fonte de alimentação foi utilizado a saída USB de um carregador de celular, conectado à porta USB do Arduino. O carregador transforma a tensão alternada



de 220V da rede em tensão contínua nominal de 5V. Além da tensão, também foi verificado o atendimento da corrente consumida pela placa de Arduino e dos demais componentes básicos do lisímetro listados anteriormente.

### 3.3 TESTES E PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO EM AMBIENTE PROTEGIDO

Nesta seção, estão descritos os testes e calibrações realizados no sistema de aquisição de peso e no sensor de nível, em ambiente protegido, a fim de conhecer e evitar possíveis erros sistemáticos das medições do lisímetro desenvolvido. Os procedimentos de testes e calibrações foram realizados com o intuito de possibilitar o planejamento e ajustes da instrumentação utilizados do lisímetro. Os objetivos pretendidos com a condução deles e uma breve descrição dos testes são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Testes realizados com os componentes do lisímetro desenvolvido

<b>Procedimento</b>	<b>Objetivo do teste</b>	<b>Descrição sumária do teste</b>
Calibração eletrônica dos conversores analógicos digitais	Aferição das tensões lidas pelo ADC na placa Arduino	Aplicação de tensões (sinais) conhecidas no ADC substituindo a célula de carga por uma fonte de tensão constante com diferentes configurações de divisor de tensões.
Calibração de células de carga e sensores de distância em ambiente protegido	Verificação dos valores medidos pelo sistema de medição de peso.	Montagem de plataformas de pesagens com 04 (quatro) células de carga ligadas a 01 (um) ou 04 (quatro) ADCs. Utilização de pesos conhecidos para montagem da curva de calibração.
	Verificação dos valores medidos pelo sensor de distância	Variação da distância entre o sensor de distância e uma superfície plana para montagem da curva de calibração
Testes de repetitividade de células de carga e sensores de distância em ambiente protegido	Verificação dos valores medidos pelo sistema de medição de peso ou pelo sensor de distância ao longo do tempo	Medição de um mesmo peso sobre a plataforma de pesagem ou de uma mesma distância pelo sensor de distância

Fonte: elaborada pelo autor

Os procedimentos de calibração elencados nesta seção foram avaliados através de  $R^2$ , EMA, SSE e RMSE. Já os testes de repetitividade, avaliados em relação a Repetitividade e EMA.

### 3.3.1 Calibração eletrônica dos ADCs

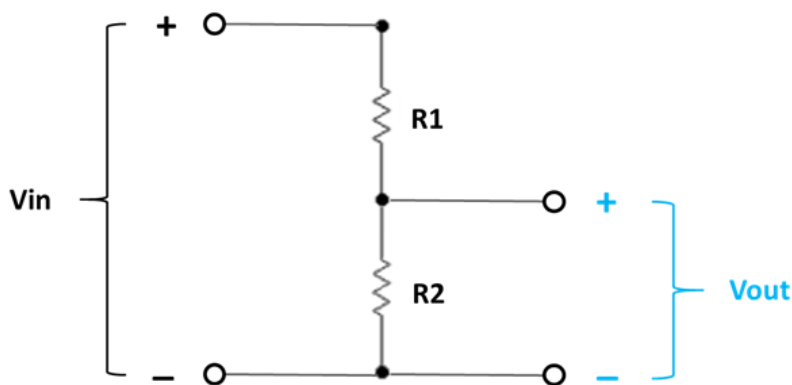
A calibração eletrônica consistiu na leitura de tensões conhecidas provenientes diferentes configurações de divisor de tensões. Esse procedimento substituiu as células de carga do sistema de medição de peso, permitindo verificar se os sinais de saída das células de carga são lidos de forma correta pelo conjunto Arduino + ADC.

Foram utilizadas combinações de resistências variando de  $12\Omega$  a  $60\text{ k}\Omega$ , as quais dividiram a tensão de entrada ( $V_{in}$ ) de valor constante de  $5,15\text{V}$  para a tensão de saída ( $V_{out}$ ) entre  $1,03\text{mV}$  a  $8,48\text{ mV}$ , segundo a Equação 4 (NETTO, 2023):

$$V_{out} = \left( \frac{R2}{R2 + R1} \right) \times V_{in} \quad \text{Equação 4}$$

A Figura 19 ilustra o divisor de tensão utilizado para a calibração eletrônica. As resistências  $R1$  e  $R2$  utilizadas e os valores de tensão de saída do divisor de tensão encontram-se no APÊNDICE A.

Figura 19 – Representação do divisor de tensões utilizado

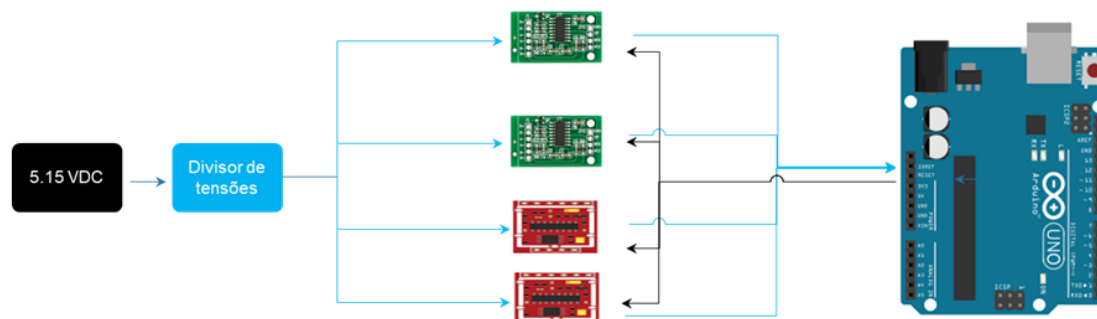


Fonte: elaborada pelo autor

A Figura 20 ilustra os elementos utilizados na calibração eletrônica, sendo o sinal elétrico representado pelas setas azuis e a alimentação, pelas setas pretas. Foram

realizados os procedimentos de calibração eletrônica em 4 ADCs verdes e 4 ADCs vermelhos.

Figura 20 – Esquema representando a calibração eletrônica



Fonte: elaborada pelo autor

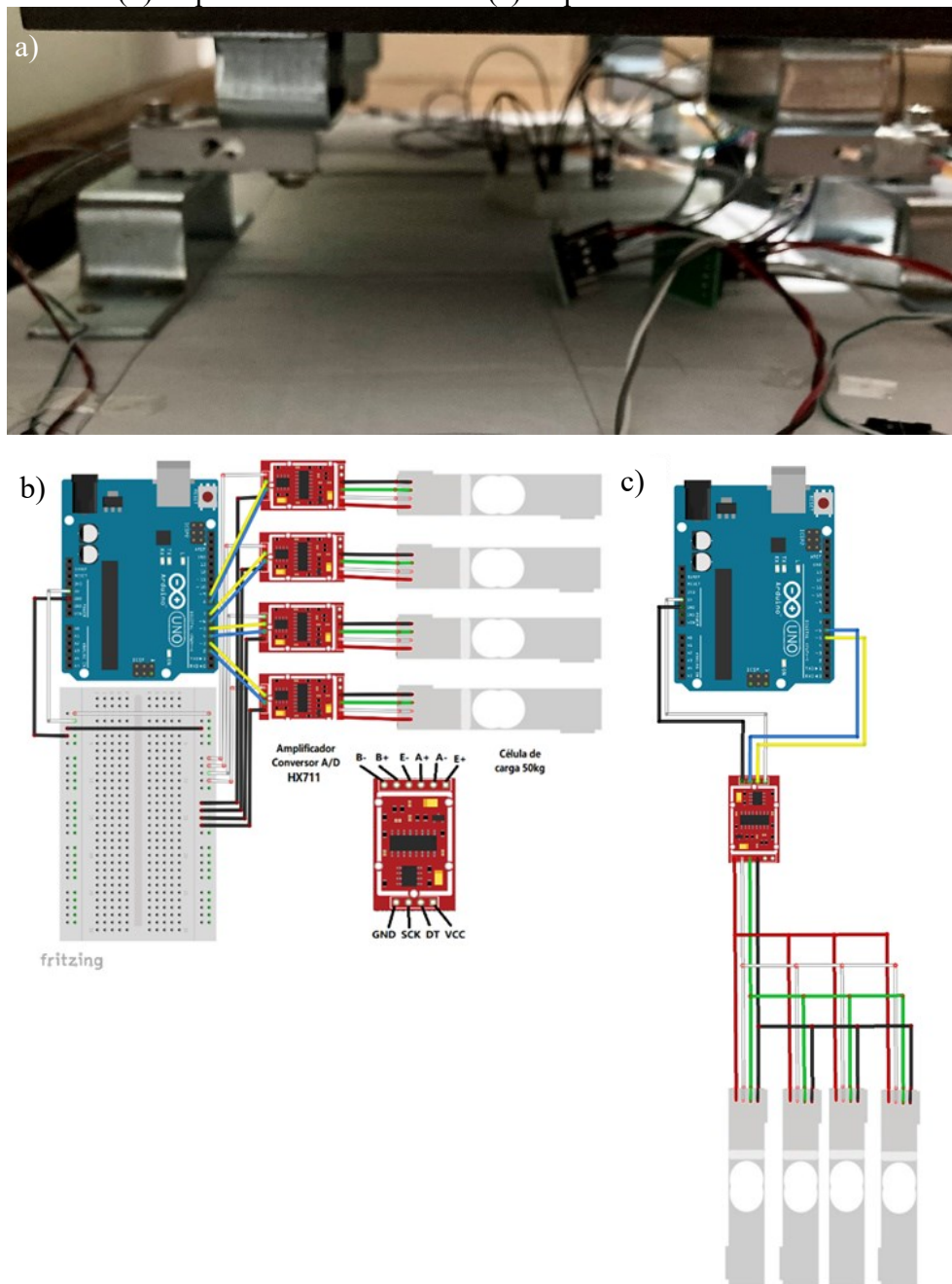
### 3.3.2 Calibração do sistema de pesagem em ambiente protegido

Para a calibração do sistema de pesagem, foram montadas duas plataformas de carga utilizando quatro células de carga, sendo a leitura e excitação delas feitos por 4 ADC do tipo HX711 (Configuração SP-1) ou por 1 ADC (Configuração SP-2). Os ADCs por sua vez, foram conectados aos pinos digitais do Arduino UNO.

Na configuração SP-2, as quatro células de carga são ligadas em paralelo, formando o equivalente a uma ponte de Wheatstone unificado, sendo excitado e lido por apenas um ADC. A Figura 21 apresenta registro fotográfico de uma das plataformas e os esquemas de conexão das configurações SP-1 e SP-2. Em ambas as configurações, procedimentos de calibração (ciclos de carregamento e descarregamento) foram feitos a fim de verificar possíveis erros de medição.

Os ciclos de carregamento e descarregamento consistiram no carregamento da plataforma com pesos conhecidos e a retirada dos mesmos pesos, na ordem em que foram adicionados. Foram utilizados uma série de massas com peso aferido em uma balança doméstica com capacidade de até 10 kg e precisão de 1 g (Figura 22).

Figura 21 – Plataforma de carga utilizada na calibração, com (a) imagem da plataforma (b) esquema de conexão SP-1 (c) esquema de conexão SP-2



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 22 – Obtenção de objetos com pesos conhecidos para a calibração



Fonte: elaborada pelo autor

Os procedimentos de calibração do sistema de pesagem em ambiente protegido estão apresentados na Tabela 3. Por exemplo, em um ciclo com 9 pares de pontos de Peso x Sinal, foram adicionados, sucessivamente, 8 massas conhecidas e foram lidos os valores registrados no sistema de pesagem. Após a oitava massa colocada, cada uma delas foi, retirada na ordem em que foram colocadas sobre a plataforma de carga, obtendo-se 9 pares de pontos de Peso x Sinal, considerando duas medições da plataforma no seu peso inicial.

Tabela 3 – Procedimentos das calibrações do sistema de pesagem em ambiente protegido

Calibração	Sistema Pesagem	Peso inicial/ pesos utilizados nos ciclos
01	SP-1 / Plataforma de carga	0kg / 5 ciclos com 11 pares de pontos. Peso incrementado 11,14 kg
02	SP-1 / Plataforma de carga	Aprox. 50 kg/ 1 ciclo 9 pares de pontos. Peso incrementado 7,27 kg
03	SP-1 / Plataforma de carga	Aprox. 65 kg/ 5 ciclos 9 pares de pontos. Peso incrementado 7,27 kg
04	SP-1 / Plataforma de carga	Aprox. 65 kg/ 5 ciclos 11 pares de pontos. Peso incrementado 9,55 kg
05	SP-1 / Plataforma de carga	Aprox. 50 kg/ 5 ciclos 9 pares de pontos. Peso incrementado 7,27 kg
06	SP-2 / Plataforma de carga	0 kg / 5 ciclos 9 pares de pontos cada. Peso incrementado 12,3 kg
07	SP-2 / Plataforma de carga	0 kg / 1 ciclo 9 pares de pontos. Peso incrementado 7,8 kg
08	SP-2 / Plataforma de carga	0 kg / 5 ciclos 9 pares de pontos cada. Peso incrementado 7,8 kg
09	SP-1 / Lisímetro	2 ciclos de 9 pontos e 2 ciclos de 5 pontos. Caixa lisimétrica como peso inicial. Peso total carregado = 8.33 kg
10	SP-1 / Lisímetro	2 ciclos de 9 pontos e 2 ciclos de 5 pontos. Caixa lisimétrica como peso inicial. Peso total carregado = 8.33 kg

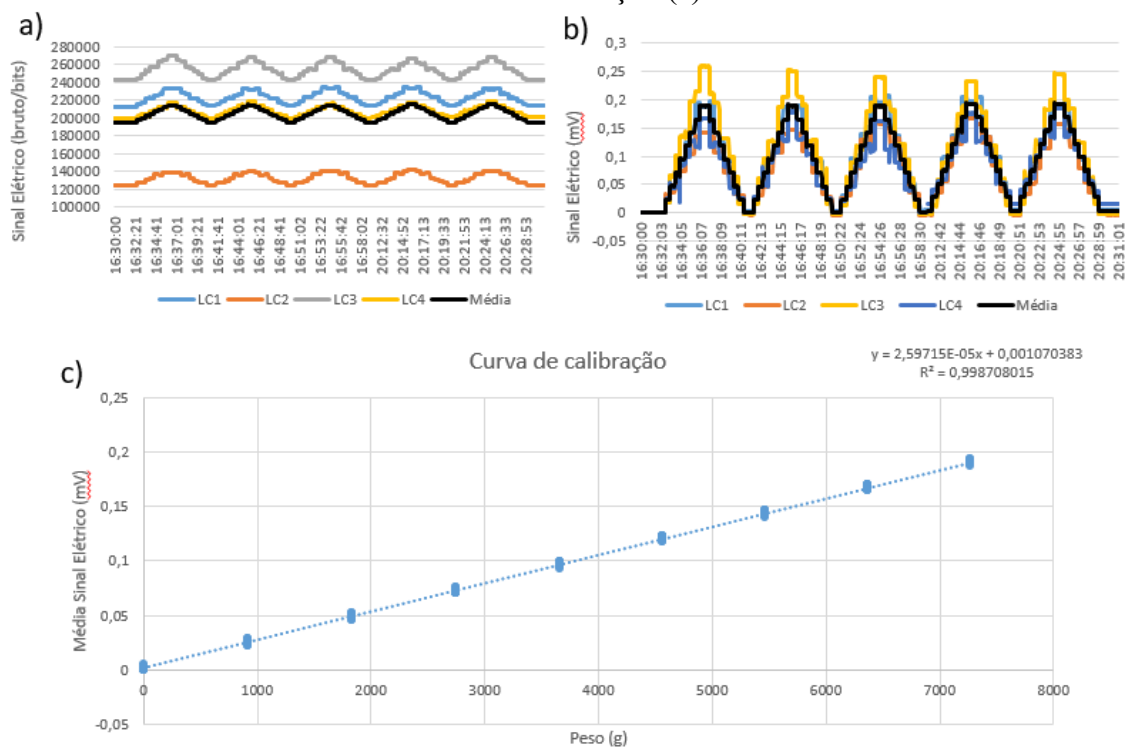
Fonte: elaborada pelo autor

Para a construção da curva de calibração, foi considerada a média dos sinais lidos individualmente pelos ADCs das quatro células de carga e o peso sobre a plataforma (configuração SP-1) ou o sinal único lido pelo ADC e seu peso (configuração SP-2).

A Figura 23 apresenta um exemplo de (a) leitura dos sinais brutos (em bits) obtido dos ADCs durante os ciclos de carregamento e descarregamento na configuração SP-01. Em (b) são mostrados os sinais convertidos para mV e em (c) um exemplo de curva de calibração relacionando o sinal elétrico com o peso sobre a plataforma.

Ao longo dos procedimentos de calibração, foi percebido que quanto maior a duração do teste de calibração, piores os resultados. Assim, pesos conhecidos foram colocados sobre a plataforma por períodos maiores (dias), cujas medições foram armazenadas em um cartão SD pelo *datalogger shield*. Tais procedimentos estão descritos no tópico 3.3.4 Teste de repetitividade.

Figura 23 – Montagem da curva de calibração. Ciclos de carregamento e descarregamento com sinais brutos (a) e sinais convertidos para mV (b). Exemplo de curva de calibração (c)



Fonte: elaborada pelo autor

### 3.3.3 Calibração do sensor de distância em ambiente protegido

Para o correto funcionamento do sensor de nível utilizado para a medição dos volumes escoados pelos drenos dos módulos de telhado verde, procedimentos de calibração foram realizados nos sensores de distância ultrassônico HC-SR04.

As calibrações consistiram na medição de distâncias conhecidas pelos sensores. Para tal, os sensores foram fixos em suportes e foram realizadas medições da distância entre o sensor e uma superfície plana e uniforme. Essa superfície foi afastada ou aproximada em distâncias conhecidas, previamente marcada com o auxílio de uma trena. Nesse sentido, considerando a menor divisão da escala da trena (TOGINO FILHO, Zapparoli, Pantoja, 2012), o erro na medida das distâncias conhecidas será na ordem de até 1 milímetro.

Pelas especificações do sensor de distância, é possível realizar medições entre 2 cm e 4 m. No entanto, as distâncias utilizadas no procedimento de calibração variaram de 10 cm a 55 cm, considerando que a altura do reservatório é de 59 cm e a distância máxima



do sensor (posicionado na tampa do reservatório) ao fundo do reservatório é de cerca de 55 cm.

Após a calibração, foi feita a cubagem do reservatório e construída a sua curva cota/volume, conforme descrito por Persch (2019). Assim, foi possível estabelecer o nível e o volume do reservatório que coleta o excedente escoado pelo dreno do lisímetro.

### 3.3.4 Teste de repetitividade

Para investigar o comportamento das células de carga e do sensor de distância ao longo do tempo, foram feitos testes de repetitividade desses sensores. Tais testes consistiram na medição de um peso ou de uma distância constante ao longo do tempo.

O Quadro 2 resume testes de repetitividade realizados, indicando o período total e informações sobre a condição em que o teste foi conduzido.

Quadro 2 - Testes de repetitividade dos sistemas de medição em ambiente protegido

<b>Componentes testados</b>	<b>Período</b>	<b>Condição do teste</b>
LC1 a LC4	14 dias	Teste da célula de carga em ambiente protegido. Sem peso sobre a célula de carga, apenas posicionada na plataforma. Com monitoramento da Temperatura do ar em todo o período
LC5 a LC12	14 dias	Teste da célula de carga em ambiente protegido. Sem peso sobre a célula de carga, apenas posicionada na plataforma. Com monitoramento da Temperatura do ar nos últimos 7 dias
LCs melhores	19 dias	Teste da célula de carga em ambiente protegido. Células de carga montadas sob caixa lisimétrica, com peso morto de cerca de 60 kg na caixa lisimétrica
Sensor de distância	6 dias	Sensor de distância em ambiente protegido posicionado dentro do reservatório com nível d'água na cota da geratriz inferior do extravasor

Fonte: elaborada pelo autor

O objetivo da realização dos testes de repetitividade nas células de carga foi de verificar a influência da temperatura na medição do peso, assim como erro de repetitividade desses sensores.



O erro de repetitividade foi calculado utilizando a Equação 5 (ALBERTAZZI JÚNIOR; ROBERTO DE SOUZA, 2008):

$$Re = \pm t \times u \quad \text{Equação 5}$$

Sendo

$Re$  = Erro de repetitividade

$t$  = coeficiente  $t$  de *Student* para 95,45% de probabilidade e  $n - 1$  graus de liberdade

$u$  = incerteza-padrão obtida a partir da amostra com  $n - 1$  graus de liberdade, conforme Equação 6.

$$u = \sqrt{\frac{\sum(I_i - \bar{I})^2}{n - 1}} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

$I_i$  =  $i$ -ésima medição

$\bar{I}$  = média das medições

$n$  = número de medições repetitivas efetuadas

Com os resultados desses testes, foram escolhidas células com menores erros de repetitividade e que possuísem comportamentos inversos quando do aumento ou da diminuição da temperatura na medição do peso. Assim, combinando tais células, os erros se compensariam e o peso medido pelo lisímetro sofreria uma menor influência pela variação da temperatura.

### 3.4 CONSTRUÇÃO DO LISÍMETRO

O lisímetro foi construído seguindo a idealização das características construtivas e na melhor configuração do sistema de medição de peso, conforme resultados das investigações da Etapa 1.

Na Figura 24 a seguir, estão representadas as principais etapas de construção da estrutura da caixa lisimétrica, com a instalação da declividade do fundo de cerca de 1% e sua impermeabilização com uso de duas camadas de lonas plásticas de hidroponia.

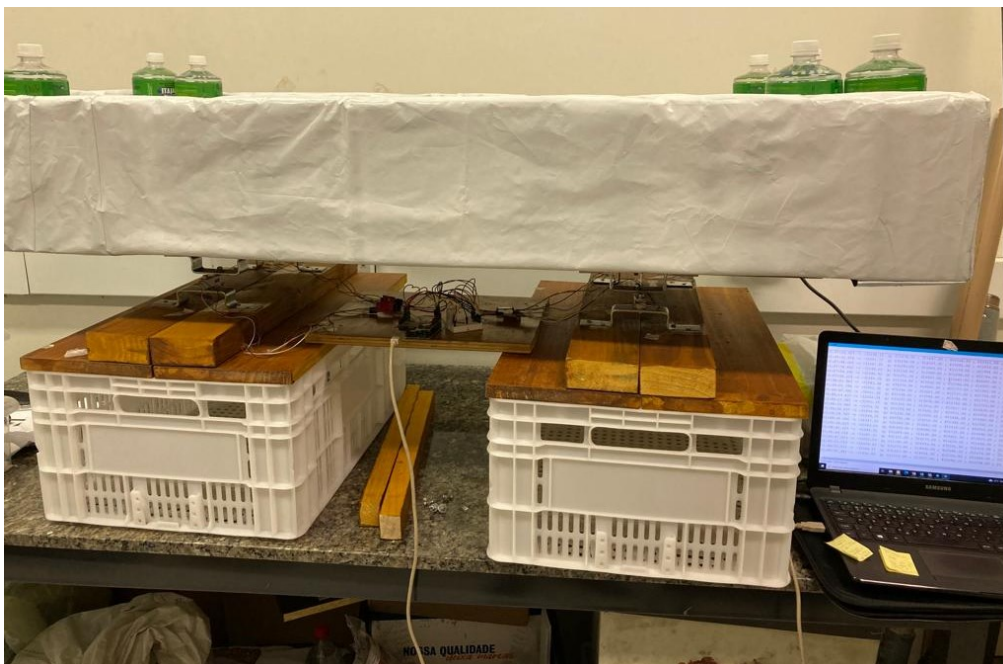
Figura 24 - Montagem da estrutura do lisímetro



Fonte: elaborada pelo autor

Após construção da caixa lisimétrica, foi instalada a instrumentação do sistema de medição de peso, assim como parte da estrutura de sustentação do lisímetro. A Figura 25 registra o processo de calibração do sistema de medição de peso em ambiente protegido, configuração semelhante à instalada em campo, porém ainda sem a proteção dos componentes eletrônicos pela caixa ambiental.

Figura 25 - Calibração do sistema de medição de peso do lisímetro em ambiente protegido



Fonte: elaborada pelo autor

Os sensores que tiveram melhores resultados nos testes realizadas na etapa anterior (4 das 12 células de carga e 1 dos 4 sensores de distância) foram conectados ao Arduino por meio de uma placa contendo bornes para os fios dos sensores e LED indicativo de gravação. A placa, seus componentes e circuitos encontram-se no APÊNDICE B.

Na configuração do sistema de medição de peso, optou-se por conectar cada célula de carga ao seu respectivo ADC (SP-1) ao invés de conectar as quatro células de carga a um ADC (SP-2). Essa escolha deve-se ao fato de os resultados das calibrações na configuração SP-1 terem sido melhores e porque com essa forma de conexão seria possível detectar mais facilmente a ocorrência de avaria ou dano em alguma das células de carga.

### 3.5 INSTALAÇÃO DO LISÍMETRO EM CAMPO E SUA OPERAÇÃO

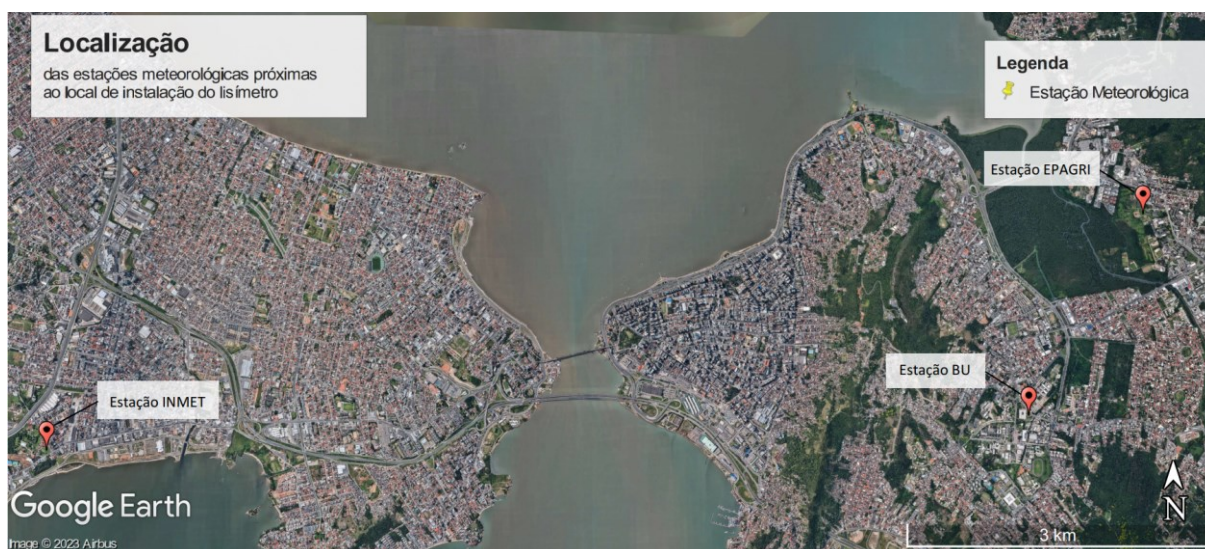
O experimento foi conduzido no município de Florianópolis, capital do estado de Santa Catarina, cuja localização está entre os paralelos 27°22' e 27°51' latitude sul e entre os meridianos 48°20' e 48°37' longitude oeste. Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o município localiza-se na região climática Cfa, correspondendo ao grupo

mesotérmico úmido, no qual as chuvas são bem distribuídas ao longo do ano e os verões são quentes (NASCIMENTO, 2002).

O local escolhido para a instalação do lisímetro foi uma área externa, anexa à biblioteca central da Universidade Federal de Santa Catarina, onde já existentes outros dispositivos de medição, dentre eles a estação meteorológica do Laboratório de Hidrologia (LABHIDRO). Neste trabalho, essa área foi denominada como Estação meteorológica da BU.

A escolha do local foi devido à proximidade com a estação meteorológica do LABHIDRO (poucos metros) e da estação do CETRE/EPAGRI (cerca de 2,8 km), conforme Figura 26, por ser de acesso restrito e cercada, por possuir tomada elétrica, por apresentar uma área ao redor com vegetação predominante gramínea e por apresentar poucos obstáculos que possam interferir na precipitação ou causar sombreamento.

Figura 26 - Localização das estações meteorológicas próximas ao lisímetro



Fonte: adaptado de Google Earth

A construção do lisímetro iniciou em novembro de 2022, sendo instalado na Estação Meteorológica da BU em fevereiro de 2023, após a chegada dos materiais das camadas do telhado verde. A Figura 27 traz os registros da montagem das camadas do módulo de telhado verde na Estação Meteorológica da BU.



Figura 27 - Registros fotográficos da montagem das camadas do módulo



Fonte: elaborada pelo autor

Nota: (a) impermeabilização; (b) camada de drenagem; (c) camada de filtragem; (d) substrato; e (e) vegetação.

A camada de drenagem foi composta por 5 cm de argila expandida com granulometria de 15 a 22mm (equivalente a Brita 1), densidade aparente de 500kg/m<sup>3</sup>, da marca CINEXPAN.

Para camada de filtragem, foi utilizada a manta de drenagem de poliéster com cerca de 3 mm de espessura, marca Geolia. O substrato utilizado foi um substrato comercial para telhados verdes, marca Mogifertil, formado por mistura de vermiculita, casca de pinus, pó de coco e casca de arroz torrifada. E para a camada vegetativa, foi utilizada a grama da espécie São Carlos, adquiridas em leivas.

Após construído e instalado o dispositivo, foram feitas calibrações em campo no sistema de medição de peso, assim como verificação da repetitividade da medição do nível, cujos procedimentos estão descritos no tópico 3.6 ACOMPANHAMENTO DA INSTRUMENTAÇÃO EM CAMPO. O monitoramento do peso do lisímetro iniciou em fevereiro de 2023, e o registro dos volumes escoados pelo dreno, em março, devido à necessidade de ajustes no sistema de coleta do volume drenado, assim como na sua instrumentação.

A operação do lisímetro foi realizada através da conferência rotineira e na coleta de dados do dispositivo. Semanalmente eram feitas as seguintes atividades:

- Esvaziamento do reservatório;
- Inspeção do estado do dreno do lisímetro para prevenir obstruções;
- Inspeção visual do módulo para verificar estado da vegetação e presença de algum objeto estranho sobre ele;
- Verificação da alimentação elétrica do sistema;
- Coleta de dados medidos
- Atualização do RTC (*Real Time Clock*) do sistema.

Pela necessidade de atualizar o RTC (que possui uma defasagem média no tempo de cerca de 38s por semana) e para garantir o acesso do Arduino ao cartão SD, optou-se em coletar os dados armazenados no cartão SD via conexão serial na placa do Arduino, por meio do IDE instalado em um notebook e um cabo USB.

Para a leitura dos valores de pesos do módulo e de nível do volume escoados pelos drenos, os sistemas de medição foram configurados para coletarem dados de sinal elétrico a cada 5 minutos, armazenando os dados em um arquivo de texto (.txt) no cartão

SD após as leituras. Posteriormente esses sinais foram convertidos em valores de peso por meio da curva de calibração.

A programação utilizada para a configuração da placa Arduino, contendo os comandos para leitura dos sensores, assim como do armazenamento dos valores lidos no cartão SD e a coleta desses dados armazenados encontram-se no APÊNDICE C.

Nos meses de maio e junho, pelas chuvas se tornarem mais escassas, foi percebida uma mudança na coloração e aspecto da vegetação do telhado verde. Para evitar a morte da vegetação devido ao baixo teor de umidade no substrato, foi adotado o procedimento de regar o módulo de telhado verde caso não houvesse registro de precipitação nos últimos 5 dias nem previsão de precipitação no próximo dia.

### 3.6 ACOMPANHAMENTO DA INSTRUMENTAÇÃO EM CAMPO

Após a instalação do lisímetro em campo, foram feitos procedimentos de calibração do sistema de pesagem e verificação da repetitividade de nível do reservatório do volume escoado pelo dreno.

As calibrações em campo foram feitas no sistema de medição de peso do lisímetro na configuração SP1, onde cada célula de carga foi conectada a um ADC. Foram feitas calibrações iniciais com o lisímetro vazio e com as camadas do telhado verde, a fim de obter curvas de calibração. Periodicamente também foram feitas calibrações para aferir as medições do sistema de medição de peso ao longo de seu uso. A Tabela 4 sintetiza os procedimentos de calibração realizados no lisímetro em campo.

Tabela 4 - Procedimentos de calibração realizados no lisímetro em campo

Calibração	Condição da calibração	Peso inicial/ pesos utilizados nos ciclos
1 – 03/02/23	Caixa lisimétrica vazia	2 ciclos de 4 pontos, com incrementos e decrementos de cerca de 1kg (total 3.14 kg) e 1 ciclo de 2 pontos, com incremento e defremento de 3.14kg.
2 – 12/02/23	Caixa lisimétrica com todas as camadas	3 ciclos de 6 pares de pontos, com 5 incrementos de cerca de 1kg (total 5.23 kg)
3 – 19/02/23	Caixa lisimétrica com todas as camadas	3 ciclos de 6 pares de pontos, com 5 incrementos de cerca de 1kg (total 5.23 kg)
4 – 02/03/23	Caixa lisimétrica com todas as camadas	3 ciclos de 6 pares de pontos, com 5 incrementos de cerca de 1kg (total 5.23 kg)
5 – 06/05/23	Caixa lisimétrica com todas as camadas	3 ciclos de 6 pares de pontos, com 5 incrementos de cerca de 1kg (total 5.23 kg)

Fonte: elaborada pelo autor

Não foi verificada a repetitividade em campo do sistema de medição de peso pelo módulo estar exposto a condições climáticas, sendo feita apenas a verificação da repetitividade em campo do sensor de distância do reservatório que armazena os volumes escoados pelo dreno do módulo. Tal verificação foi possível por haver um período longo sem precipitação e sem rega de 21 dias no mês de maio, analisando as medições do nível no reservatório durante o referido período.

### 3.7 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS NO LISÍMETRO

Os dados de peso do módulo de telhado verde e de nível do volume escoados pelos drenos, com medições a cada 5 minutos, passaram por um filtro de mediana abrangendo as últimas seis medições (ou últimos 30 minutos). A utilização desse filtro teve como objetivo eliminar mudanças de peso ou de nível que não estivessem relacionadas a entradas e saídas de água, como erros de medição, rajada de vento ou repouso de pequenos pássaros no módulo.

Após o tratamento dos dados, foram feitas as seguintes estimativas e análises:

- i. Estimativa da Evapotranspiração através de balanço de massa utilizando os dados do lisímetro e dados de precipitação da região, através de 3



- diferentes métodos, a fim de compreender o comportamento da evapotranspiração do módulo de telhado verde construído.
- ii. Comparação da evapotranspiração obtida por balanço de massa com a evapotranspiração estimada pelo método de FAO Penman-Monteith, a fim de verificar sua aderência com os dados obtidos pelo lisímetro, assim como obter coeficientes para ajuste da estimativa.
  - iii. Análise da eficiência do módulo de telhado verde na redução do escoamento superficial, a fim de analisar o potencial de seu uso como estrutura de drenagem urbana sustentável para a redução de vazões.

### 3.7.1 Estimativa da evapotranspiração por balanço de massa

Como o lisímetro foi submetido a condições climáticas da área de estudo e pelo período final de monitoramento ter havido necessidade de irrigação, devido ao longo período de seca, o balanço de massa do módulo de telhado verde pode ser representado pela Equação 7 (DIGIOVANNI et al., 2013; WADZUK et al., 2013; ARBOIT, 2017):

$$P + I - D - ET = \Delta S \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

$P$  = Precipitação, obtida das estações pluviométricas do LABHIDRO (periodicidade de 5 minutos, distância aproximada de 5 metros) e da CETRI/EPAGRI (periodicidade de 1 hora, distância aproximada de 2,8 km),

$I$  = Irrigação

$D$  = Escoamento pelos drenos

$ET$  = Evapotranspiração

$\Delta S$  = Armazenamento do sistema

Nos testes de repetitividade do sensor de nível de água do reservatório para estimar o escoamento ocorrido pelos drenos do módulo de telhado verde, houve um erro EMA e de repetitividade de 3.32 mm e 1.38 mm respectivamente, considerado elevados. Em adição, não foi identificado um padrão no comportamento de medição/erro associado ao dreno que permitisse realizar a correção ou ajustar tal erro, foi optado por não computar a evapotranspiração nos dias em que tiveram escoamento pelos drenos.

Portanto, do período monitorado no trabalho (de 17 de março a 23 de junho, totalizando 99 dias), foram desconsiderados da estimativa da evapotranspiração por balanço de massa 25 dias (ou 25,2% dos dias monitorados). Os dias descartados tiveram

precipitação acima de 0,5 mm ou que foram observados escoamento pelo dreno após irrigação.

Eliminando os termos Precipitação, Escoamento pelos drenos e Irrigação da Equação 7, se torna:

$$ET = -\Delta S \quad \text{Equação 8}$$

Rearranjando a Equação 8 e considerando a área do lisímetro, assim como a densidade da água sendo 1kg/L e que as variações na massa do conjunto lisimétrico correspondem à quantidade de água perdida para a atmosfera, temos:

$$ET = -\left(\frac{M_i - M_{i-1}}{A \times \Delta t}\right) \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

$ET$  = Evapotranspiração (mm/tempo)

$M_i$  = Massa do lisímetro no tempo atual (kg)

$M_{i-1}$  = Massa do lisímetro no tempo anterior (kg)

$A$  = área do lisímetro (m<sup>2</sup>)

$\Delta t$  = Intervalo de tempo

Partindo do balanço de massa anterior, porém, desconsiderando dias com registro de escoamento pelo dreno dos lisímetros, Campeche (2002) utilizou três métodos para o cálculo de valores de evapotranspiração diária na análise dos dados de peso obtidos por lisímetros, sendo:

**Método 1** - somatório de todas as diferenças de massa dos intervalos de integração ao longo de um dia, descontando valores de precipitação ou irrigação diária

$$ET1 = -\left(\frac{\sum_{i=1}^{288} M_i - M_{i-1}}{A \times \Delta t}\right) + P + I \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

$ET1$  = Evapotranspiração computada pelo método 1 (mm/dia)

$M_i - M_{i-1}$  = Diferença de massa entre o tempo atual e o tempo anterior, com intervalo entre medições de 5 minutos (kg)

$\Delta t$  = Período de tempo (dia)

**Método 2** - somatório das diferenças de massa negativas dos intervalos de integração ao longo de um dia

$$ET2 = - \left( \frac{\sum_{i=1}^{288} M_i - M_{i-1}}{A \times \Delta t} \right); \text{ quando } (M_i - M_{i-1}) < 0 \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

$ET2$  = Evapotranspiração computada pelo método 2 (mm/dia)

$M_i - M_{i-1}$  = Diferença de massa negativa entre o tempo atual e o tempo anterior, com intervalo entre medições de 5 minutos (kg)

**Método 3** - diferença de massa registrada à meia noite do dia atual e da massa registrada à meia noite do dia anterior, também descontando a precipitação e irrigação.

$$ET3 = - \left( \frac{M_{24:00 \text{ do dia}} - M_{24:00 \text{ do dia anterior}}}{A \times \Delta t} \right) + P + I \quad \text{Equação 12}$$

Sendo:

$ET3$  = Evapotranspiração computada pelo método 3 (mm/dia)

$M_{24:00}$  = Massa registrada à meia noite (kg)

### 3.7.2 Comparação da evapotranspiração obtida por balanço de massa com a estimada pelo método de FAO Penman-Monteith

Foi feita a estimativa da evapotranspiração através do método FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998), a fim de verificar o quanto os valores estimados se aproximam dos valores medidos, assim como a necessidade de coeficientes de cultura ou de estresse hídrico para ajuste da estimativa.

Para tanto, quantificou-se a Evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) utilizando dados climáticos, os quais foram comparados com a evapotranspiração monitorada (Evapotranspiração em condições não-padrão –  $ET_{c \text{ adj}}$ ) i.e., para o caso de substrato raso, com camada de drenagem no fundo, simulando um telhado verde extensivo e com limitação de disponibilidade hídrica.

A Equação 13 foi utilizada para o cálculo da  $ET_o$  por FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998):

$$ET_o = \frac{0,408 (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

$ET_o$  = evapotranspiração de referência ( $\text{mm d}^{-1}$ );

$\Delta$  = inclinação da curva de saturação do vapor de água ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$R_n$  = radiação solar líquida total ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );

$G$  = fluxo de calor no solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );

$T$  = temperatura média do ar ( $^\circ\text{C}$ );

$\gamma$  = constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$u_2$  = velocidade do vento a altura de 2m ( $\text{m s}^{-1}$ );

$e_s$  = pressão de vapor de saturação ( $\text{kPa}$ );

$e_a$  = pressão de vapor real ( $\text{kPa}$ ).

Com os dados de hora em hora de radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar provindos da estação meteorológica da EPAGRI foram estimados valores de evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ). Os valores foram convertidos para base diária por meio da média horária, excetuando os da radiação solar, os quais tiveram os valores horários somados para obter valores de radiação solar diário.

O coeficiente combinado de estresse hídrico e de cultura, por meio da Equação 14 obtida por rearranjo da Equação 2:

$$K_s \times K_c = \frac{ET_{c \text{ adj}}}{ET_o} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

$K_s$  e  $K_c$  = coeficientes de estresse hídrico e de cultura, respectivamente;

$K_s \times K_c$  = coeficientes de estresse hídrico e de cultura combinados;

$ET_{c \text{ adj}}$  = evapotranspiração de cultura em condições não padrão, obtidos pelo lisímetro de pesagem ( $\text{mm d}^{-1}$ );

$ET_o$  = evapotranspiração de referência estimada por FAO-Penman-Monteith ( $\text{mm d}^{-1}$ ).

A aderência da ETo estimada por FAO Penman-Monteith com a  $ET_c$  adj (mensurada pelos lisímetros), foi avaliada por meio de Raiz do Erro quadrático médio (RMSE), Nash-Sutcliffe (NSE), Kling-Gupta Efficiency (KGE) e Coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Para o RMSE, quanto mais próximo de zero estiver o valor resultante, maior a aderência entre os dados observados e estimados. Para  $R^2$ , que varia entre 0 e 1, quanto mais próximos a 1, melhor os valores simulados se ajustam aos observados. Já para NSE e KGE, uma classificação da qualidade de ajuste desses índices está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação do desempenho dos índices KGE, NSE

<b>Avaliação</b>	<b>KGE</b>	<b>NSE</b>
Muito bom	0,71 – 1,00	0,60 – 1,00
Bom	0,61 – 0,70	0,41 – 0,60
Razoável /Satisfatório	0,51 – 0,60	0,21 – 0,40
Ruim	< 0,50	< 0,20

Fonte: Adaptado de Norouzi et al., (2020) e Moriasi et al. (2007)

### 3.7.2 Comportamento hidrológico do módulo de telhado verde monitorado

Foi feita uma análise do comportamento hidrológico do módulo por evento de chuva, utilizando os dados de precipitação da estação do LABHIDRO. Os eventos foram separados considerando um período sem registro de precipitação maior ou igual a 30 minutos.

Considerando o peso inicial e o peso final do módulo, assim como a precipitação registrada no pluviógrafo, foi calculado o percentual da precipitação retida por evento de precipitação no módulo de telhado verde.

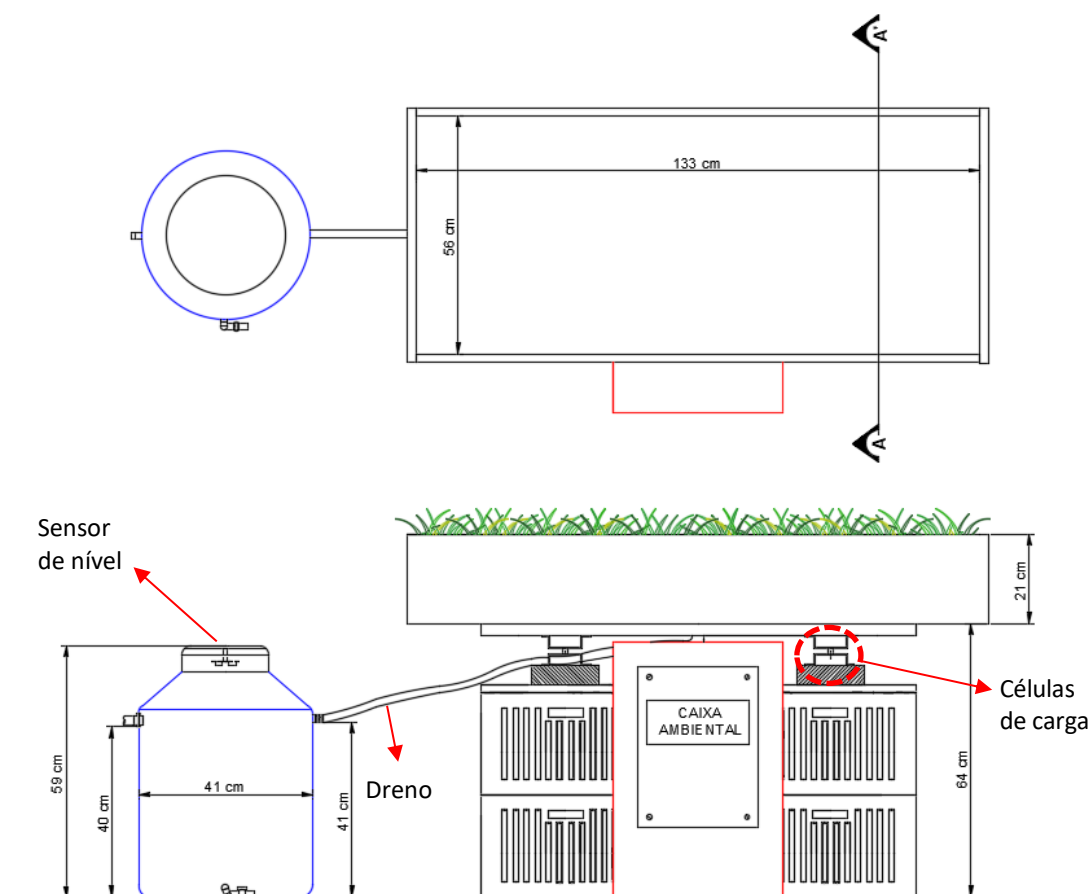
Ainda, verificando o início do aumento do peso do módulo e o início do aumento do volume armazenado pelo reservatório do dreno, foram estimados os tempos de retardo de escoamento em alguns eventos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 VISÃO GERAL DO LISÍMETRO CONSTRUÍDO

Neste trabalho, o conjunto caixa lisimétrica e as camadas simulando um telhado verde do tipo extensivo foi denominado de “módulo de telhado verde”. A caixa lisimétrica possui uma área interna de  $0,74 \text{ m}^2$  ( $0,56 \text{ m} \times 1,33 \text{ m}$ ), cuja parte inferior foram instaladas quatro células de carga, cada qual com capacidade nominal de 50 kg, permitindo a medição do peso do módulo ao longo do tempo. O volume escoado pela camada de drenagem é conduzido do dreno ao reservatório que coleta o volume escoado por meio de uma mangueira transparente de PVC de  $\frac{3}{4}$ ” e cerca de 1 m de extensão. A Figura 28 ilustra as vistas superior e frontal do lisímetro, com enfoque na conexão hidráulica entre reservatório e o módulo de telhado verde, assim como na disposição desses e da caixa ambiental utilizada para proteger parte dos componentes eletrônicos do lisímetro.

Figura 28 – Vistas superior e frontal do lisímetro



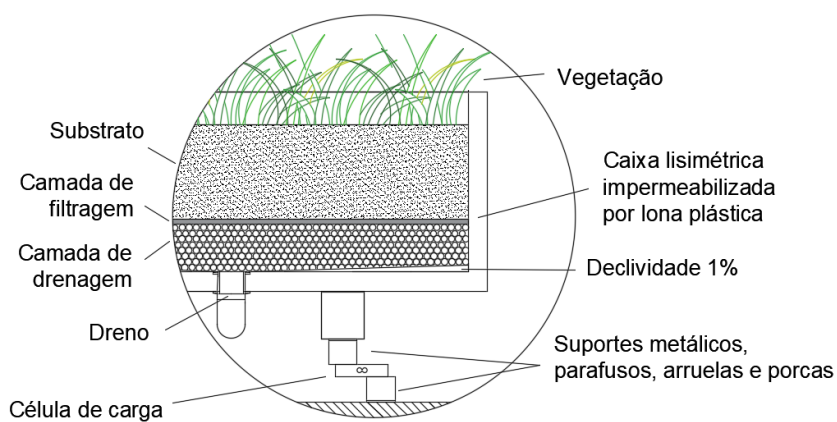
Fonte: elaborada pelo autor

A estrutura que sustenta as células de carga é composta por caixas plásticas vazadas de horti-fruti, vigas e tábuas de madeira tratada e peças metálicas (suporte metálico, parafusos, arruelas e porcas) para auxiliar na fixação e possibilitar nivelamento do tanque lisimétrico. Em caso de desnivelamento do módulo, o que acarretaria em uma distribuição não uniforme do peso sobre as células de carga, é possível ajustar o parafuso de fixação das células de carga ou calçar os suportes metálicos com chapas metálicas.

A escolha de utilizar caixas de horti-fruti se deve a elas serem leves, resistentes a umidade e a carregamentos, sendo possível empilhar pesos maiores que 200 kg (CAIXAPLAST, 2020), disponíveis localmente e terem dimensões compatíveis com as dos módulos de telhado verde. Outra característica do sistema provinda da utilização das caixas plásticas é a modularidade do sistema, podendo este ser expandido adicionando módulos necessários para um possível estudo envolvendo diferentes composições do telhado verde (característica do substrato, tipo de vegetação, por exemplo).

A Figura 29 mostra o corte A-A', detalhando as camadas do módulo de telhado verde e a fixação das células de carga.

Figura 29 - Corte A-A' com detalhes dos módulos de telhado verde e do lisímetro



Fonte: elaborada pelo autor

O módulo de telhado verde possui paredes constituídas de tábuas de madeira de pinus tratado com cerca de 2 cm de espessura, impermeabilizadas por meio de lona plástica de 150 micras utilizada em hidroponia. A utilização de madeira como parede do módulo (ou parede da caixa lisimétrica) se deve a sua grande disponibilidade local, custo relativamente baixo e baixa condutividade térmica desse material, retardando a transferência de calor pelas paredes do lisímetro.

Simulando um sistema de telhado verde do tipo extensivo, o módulo prevê um fundo com declividade de 1%, camada de drenagem composta por argila expandida com profundidade de 5 cm, manta geotêxtil como camada de filtragem, substrato comercial para telhado verde com profundidade de 10 cm e uma camada de vegetação gramínea. Também foi prevista a instalação de dreno na parte central do módulo, possibilitando a saída da água excedente do sistema.

O reservatório para armazenamento do volume escoado pelos drenos da caixa lisimétrica foi implantado através do uso de uma bombona de 50 L, com diâmetro de 41 cm e altura de 59 cm. A escolha de utilizar uma bombona em detrimento de uma caixa d'água se justifica em função de ocupar uma área menor, podendo resultar em erros de leitura de volume menores caso ocorram erros nas leituras no nível d'água dentro do reservatório.

Além da conexão para coletar o volume escoado pelos drenos, foram instalados um dreno de fundo, assim como um extravasor no reservatório. O sensor de distância foi instalado na tampa do reservatório, distante em cerca de 12 cm da cota máxima permitida pelo extravasor. Considerando a cota máxima referida, o reservatório possui um volume útil de cerca de 40 L ou equivalente a 57 mm de lâmina d'água escoada pelo lisímetro.

No layout proposto, as células de carga e o sensor de distância, assim como os fios que os conectam ao restante do sistema são expostos a condições ambientais (umidade e temperatura do ar, principalmente). Os demais componentes eletrônicos do sistema de medição estão acondicionados em uma caixa ambiental evitando o máximo possível a umidade e condições ambientais que possam interferir na medição.



## 4.2 TESTES PARA PLANEJAMENTO E AJUSTES DA INSTRUMENTAÇÃO

### 4.2.1 Resultados da calibração eletrônica dos ADCs

A calibração eletrônica dos ADCs foi realizada por meio de divisores de tensão no lugar das células de carga, a fim de aferir as tensões lidas pelo conjunto Arduino + ADC e de verificar os erros associados ao uso dos ADCs do tipo verde ou do tipo vermelho.

Os resultados das calibrações eletrônicas de 8 ADCs do tipo HX711 estão compilados na Tabela 6, sendo ADC1 a ADC4 do tipo verde e ADC5 a o ADC do tipo vermelho. As curvas de calibração encontram-se no APÊNDICE D.

Tabela 6 - Avaliação das calibrações eletrônicas

ADC	R2	RMSE	EMA
1	1.000	0.460	0.947
2	1.000	0.344	0.727
3	1.000	0.466	0.991
4	1.000	0.438	0.935
5	1.000	0.127	0.237
6	1.000	0.158	0.304
7	1.000	0.186	0.362
8	1.000	0.147	0.300

Fonte: elaborada pelo autor

Todos os ADCs testados apresentaram excelentes coeficientes de determinação, indicando ajuste linear entre o sinal aplicado e o sinal medido. No entanto, os ADCs vermelhos tiveram valores médios de erro (RMSE e EMA) em cerca de 1/3 menores que os ADCs verdes.

Assim, os ADCs vermelhos foram escolhidos para comporem o sistema de medição de peso do lisímetro.

### 4.2.2 Resultados das calibrações em Ambiente protegido

Com o intuito de conhecer e evitar possíveis erros sistemáticos das medições do sistema de pesagem e do sensor de distância, assim como de auxiliar na decisão quanto a forma de conexão entre as células de carga e o(s) ADC(s), foram realizadas calibrações desses componentes inicialmente em ambiente protegido.

### Calibrações do sistema de pesagem

Para a calibração do sistema de pesagem, foram utilizadas plataformas de carga com a configuração SP-1 (quatro células de carga lidas e excitadas por quatro ADCs) e com a configuração SP-2 (quatro células de carga lidas e excitadas por um ADC). A Tabela 7 apresenta os resultados das calibrações realizadas nas referidas configurações do sistema de pesagem.

Tabela 7 - Resultado das calibrações do sistema de pesagem em ambiente protegido

Calibração	Resultados	Sistema Pesagem	Peso inicial/ pesos utilizados nos ciclos
01	$y = 38829x - 17504$ $R^2 = 0,999$ EMA = 92,3 g SEE = 26,5 g	SP-1 / Plataforma de carga	0kg / 5 ciclos com 11 pares de pontos. Peso incrementado 11,14 kg
02	$y = 43147x - 66547$ $R^2 = 0,999$ EMA = 58,5 SEE = 37 g	SP-1 / Plataforma de carga	Aprox. 50 kg/ 1 ciclo 9 pares de pontos. Peso incrementado 7,27 kg
03	$y = 178551x - 81037$ $R^2 = 0,999$ EMA = 183,4 g (0,25 mmET) SEE = 57,4 g (0,08 mmET)	SP-1 / Plataforma de carga	Aprox. 65 kg/ 5 ciclos 9 pares de pontos. Peso incrementado 7,27 kg
04	$y = 176523x - 82144$ $R^2 = 0,999$ EMA = 352,1 g (0,48 mm ET) SEE = 187,8 g (0,25 mmET)	SP-1 / Plataforma de carga	Aprox. 65 kg/ 5 ciclos 11 pares de pontos. Peso incrementado 9,55 kg
05	$y = 179037x - 71626$ $R^2 = 0,999$ EMA = 163,2g (0,22 mmET eq) SEE = 86,2 g (0,12 mmET eq)	SP-1 / Plataforma de carga	Aprox. 50 kg/ 5 ciclos 9 pares de pontos. Peso incrementado 7,27 kg
06	$y = 44599,3x - 7184,04$ $R^2 = 0,999$ EMA = 202 g (0,27 mm ET eq) SEE = 24,4 g (0,03 mmET eq)	SP-2 / Plataforma de carga	0 kg / 5 ciclos 9 pares de pontos cada. Peso incrementado 12,3 kg
07	$y = 44872,5x - 1556,31$ $R^2 = 0,998$ EMA = 140 g (0,2 mm ET eq) SEE = 96,9 g (0,1 mmET eq)	SP-2 / Plataforma de carga	0 kg / 1 ciclo 9 pares de pontos. Peso incrementado 7,8 kg
08	$y = 44828,6x - 16819,22$ $R^2 = 0,999$ EMA = 99 g (0,2 mm ET eq)	SP-2 / Plataforma de carga	0 kg / 5 ciclos 9 pares de pontos cada. Peso incrementado 7,8 kg

	SEE = 14,8 g		
09	$y = 45575x - 40276$ $R^2 = 0.99998$ EMA = 48.8 g SEE = 22.53 g	SP-1 / Lisímetro	2 ciclos de 9 pontos e 2 ciclos de 5 pontos. Caixa lisimétrica como peso inicial. Peso total carregado = 8.33 kg
10	$y = 45533x - 39777$ $R^2 = 0.999979$ EMA = 26.3 g SEE = 12.04 g	SP-1 / Lisímetro	2 ciclos de 9 pontos e 2 ciclos de 5 pontos. Caixa lisimétrica como peso inicial. Peso total carregado = 8.33 kg

Fonte: elaborado pelo autor

Notas: (1) nas equações de calibração, “x” se refere ao peso em gramas e “y” ao sinal elétrico médio lido em mili-volt; (2) mm ET equivalente considerando lisímetro com uma área superficial de 0,74 m<sup>2</sup>.

Resultados satisfatórios de R<sup>2</sup>, EMA e SEE foram obtidos utilizando peso inicial nulo e realizando as cargas e descargas com pesos totais de até 11,1kg. Os resultados das calibrações com a configuração SP-2 foram piores que os realizados, com maiores valores de EMA (202 g ou 0,3 mm ET na Calibração 06) e de SEE (96,9g ou 0,1 mmET na Calibração 07).

Nas calibrações com pesos iniciais sobre a plataforma maiores (de 50 a 65 kg), foram observados os piores resultados da calibração, podendo ser devido a erros do sistema de medição de peso (conjunto ADC e célula de carga), à montagem da plataforma de carga ou à distribuição não uniforme dos pesos durante a calibração.

No entanto, mesmo na calibração 04, com piores resultados dentre as calibrações, as métricas continuam dentro do recomendado por AMARAL et al (2018a) ou CARVALHO et al. (2007), com SEE menores que 0.66 mm ET.

### **Calibrações do sensor de distância no reservatório**

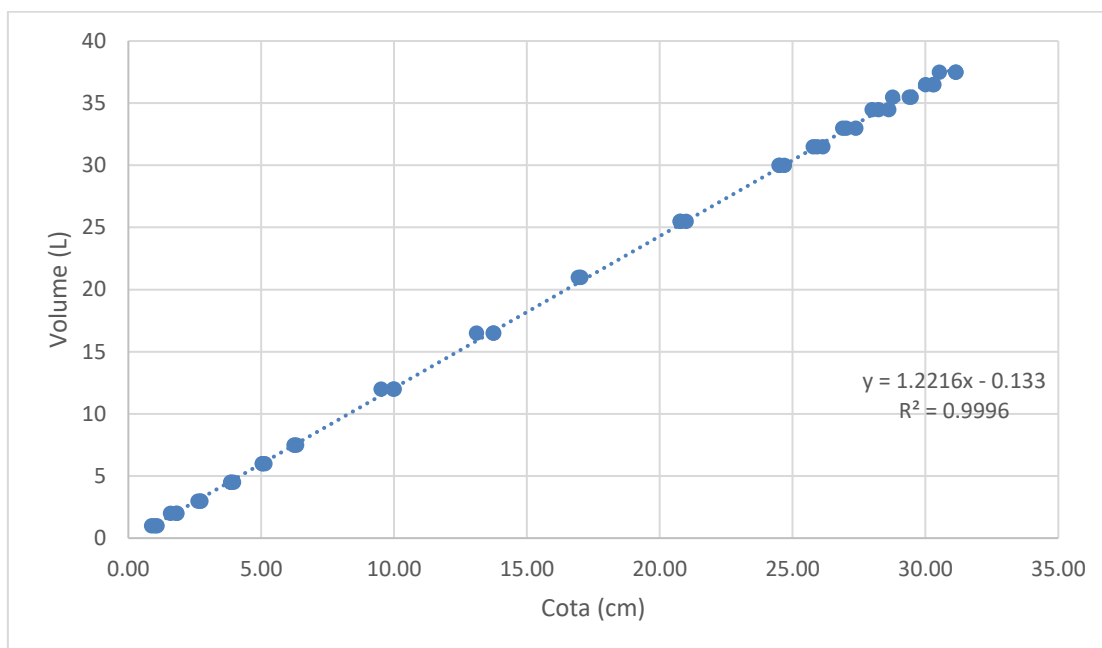
As calibrações dos sensores de distância instalado no reservatório, para medir o nível de água drenada pelo módulo do telhado verde, resultaram em curvas relacionando as distâncias conhecidas com as distâncias medidas pelos sensores. As curvas de calibração e as correções nas distâncias medidas pelo sensor com essas curvas se encontram no APÊNDICE E e no APÊNDICE F, respectivamente.

Os resultados da calibração dos sensores de distância mostraram uma excelente linearidade entre a distâncias conhecidas e medidas. Após a correção dos valores medidos, os resultados das medições foram semelhantes, sendo a diferença entre EMA e

RMSE dos sensores na ordem de 0,1 cm (magnitude do erro da trena utilizada para marcação das distâncias conhecidas).

Por possuir o menor EMA, o Sensor 4 foi utilizado para confeccionar a curva cota-volume apresentado na Figura 30. O mesmo sensor foi selecionado para ser utilizado no reservatório que armazena os volumes escoados pelo dreno do módulo de telhado verde.

Figura 30 - Curva cota-volume do reservatório de saída do lisímetro



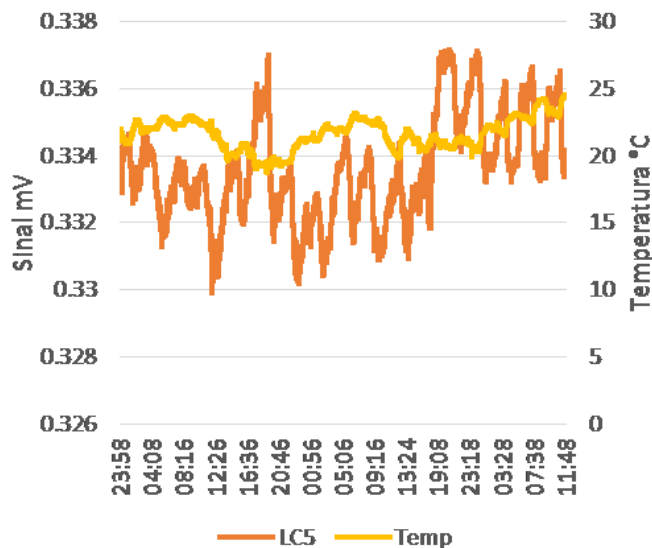
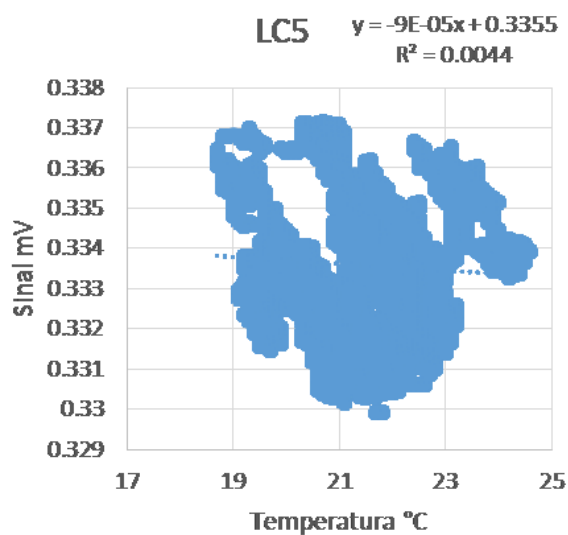
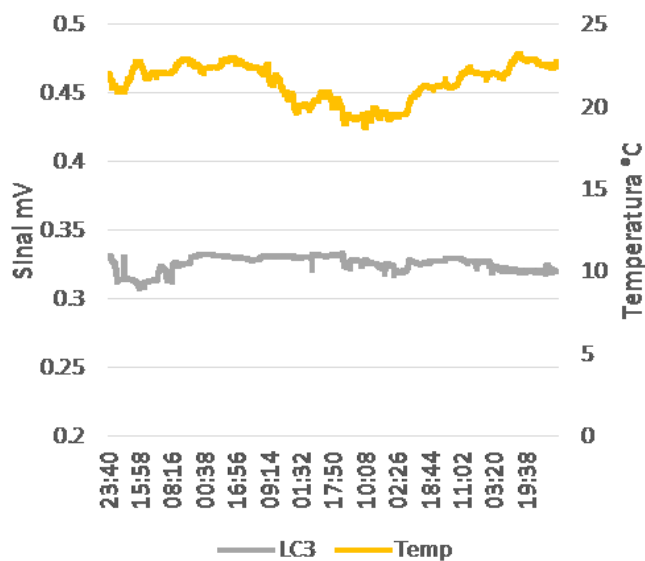
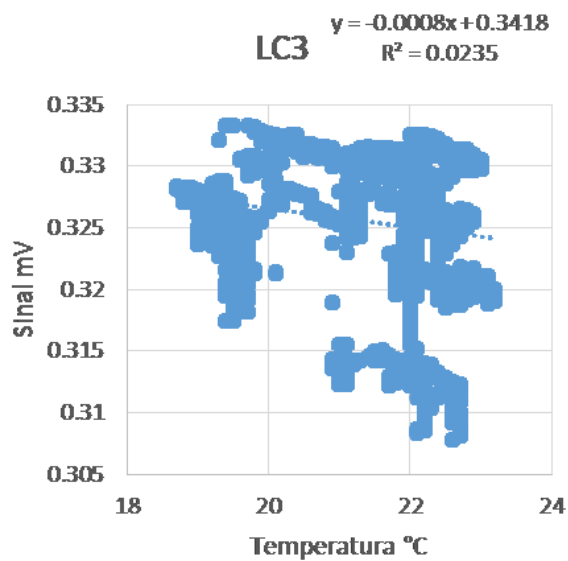
Fonte: elaborada pelo autor

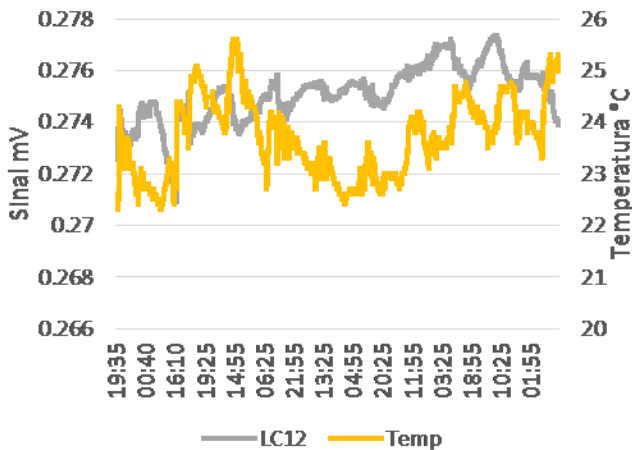
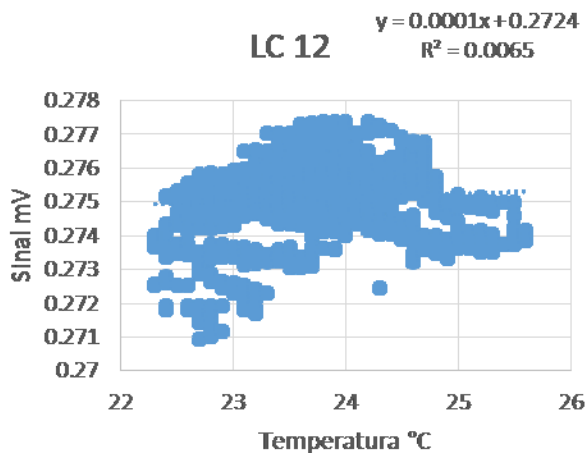
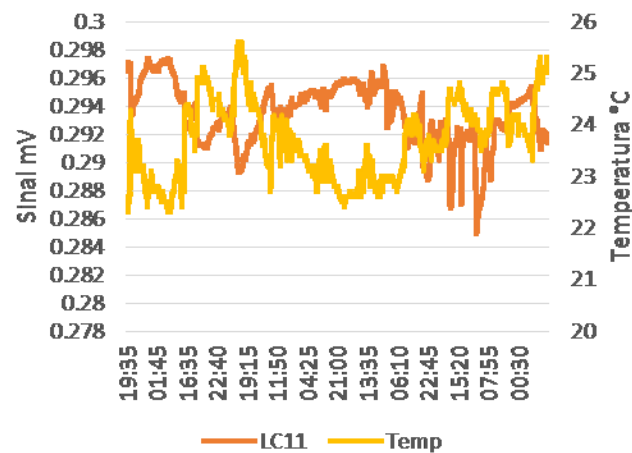
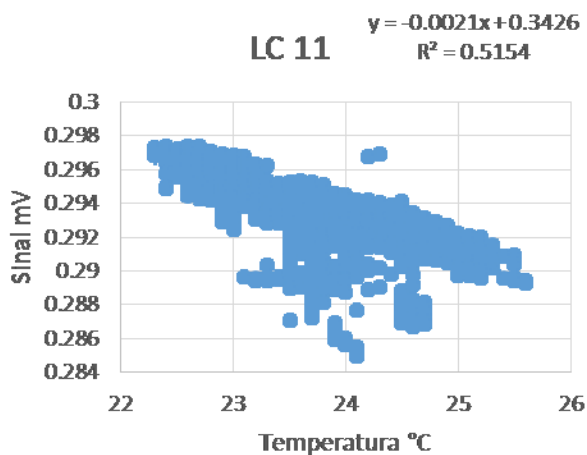
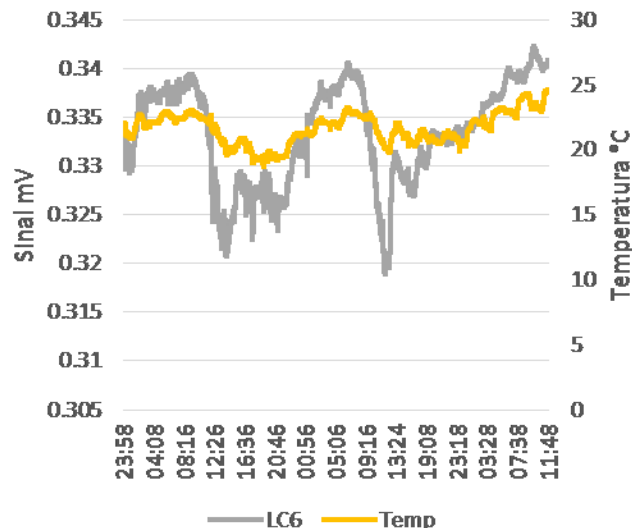
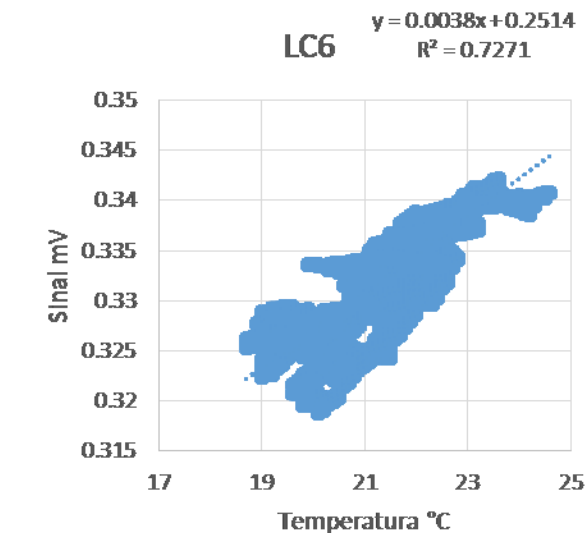
### **4.2.3 Resultados dos testes de repetitividade (LCs separadas, LC no lisímetro e sensor de distância)**

A repetitividade indica se, ao longo de um tempo maior, o sensor segue medindo os valores da variável dentro do mesmo padrão inicial. Os resultados dos testes de repetitividade, em ambiente protegido, das doze células de carga, assim como do sistema de medição de peso com as células selecionadas e do sensor de distância, podem ser visualizados no APÊNDICE G. As células LC3, LC5, LC6, LC11 e LC12 foram selecionadas e consideradas aprovadas para serem utilizados no sistema de pesagem do lisímetro, por terem apresentado os menores erros de repetitividade. Dentre as células aprovadas, a célula LC12 ficou como reserva caso ocorresse alguma avaria nas demais células de carga.

As curvas dos testes de repetitividade das células de carga aprovadas são mostradas na Figura 31. Dentre este conjunto de curvas percebe-se que as células LC6 e LC11 possuem respostas inversas a mudança de temperatura. Portanto, combinando tais células, o lisímetro terá uma menor influência na medição do peso pela variação da temperatura do ambiente.

Figura 31 - Comportamento das células LC3, LC5, LC6, LC11e LC12 no teste de repetitividade com monitoramento da temperatura





Fonte: elaborada pelo autor

As demais células não foram aprovadas para o lisímetro, sendo as células de carga LC1 e LC2 foram consideradas inadequadas para o uso no lisímetro. As curvas dos testes de repetitividade das células reprovadas se encontram no APÊNDICE H. A célula

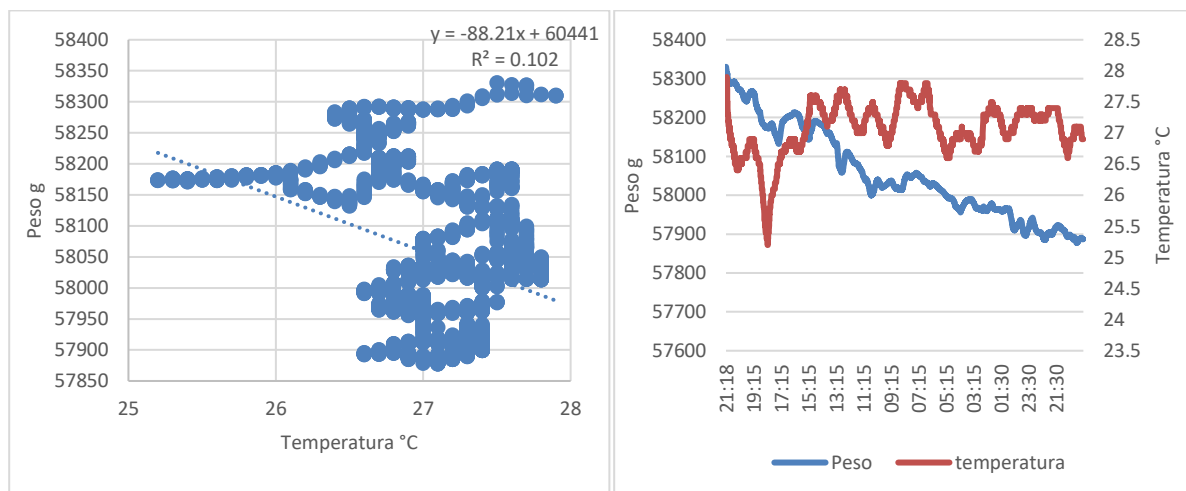
de carga LC1 apresentou aumento no sinal medido e maiores erros de repetitividade. Já a célula LC2, apresentou oscilações no sinal, também sem relação com temperatura.

Embora com menores erros de repetitividade e amplitude relativamente baixa entre valores máximos e mínimos, as células de carga LC4, LC7, LC8, LC9 e LC10 também não foram selecionadas. As células de carga LC4, LC8 e LC10 possuem sinais com magnitude inferiores e as células LC7 e LC9, superiores às células de carga selecionadas, podendo interferir na calibração, pois é utilizada a média dos sinais das quatro células de carga na confecção da curva de calibração.

Após instalação das células de carga selecionadas no lisímetro (na configuração SP-1), foram feitas as calibrações em ambiente protegido (conforme descrito no tópico 3.3.2) e obtida a curva de calibração do lisímetro (apresentado no tópico 4.2.2).

O teste de repetitividade do lisímetro em ambiente fechado, com duração de 12 dias resultou nos valores de amplitude da medição e erro de repetitividade em mV apresentados na APÊNDICE G. Os sinais das células de carga convertidos em peso, resultaram nas relações de peso x temperatura apresentados na Figura 32.

Figura 32 - Comportamento do teste de repetitividade do lisímetro utilizando as células de carga LC3, LC5, LC6, LC11



Fonte: elaborada pelo autor

Percebe-se que o lisímetro não possui o sistema de pesagem influenciada pela variação da temperatura do ambiente, porém, há um decréscimo de cerca de 400g (equivalente a 0,5 mm ET) no decorrer dos 12 dias. Esse decréscimo de peso, embora seja um erro do equipamento, é aceitável, tendo em vista a magnitude da evapotranspiração (na ordem de milímetros por dia).



Por fim, do teste de repetitividade do sensor de nível em ambiente protegido, foi observada uma amplitude entre os valores máximos e mínimos de um nível d'água constante de 0.51 cm e um erro de repetitividade de 0.12 cm, o equivalente a uma lâmina d'água de 0.84 mm e 0.19 mm, respectivamente, considerando a curva cota-volume do reservatório e área do módulo de 0.74 m<sup>2</sup>.

#### 4.2.4 Resultados das calibrações e aferições dos sistemas de medição em campo

A Tabela 8 sintetiza os resultados das calibrações feitas no sistema de pesagem do lisímetro em campo (calibração inicial e aferições). As calibrações do sistema de pesagem resultaram em curvas de calibração com coeficiente angular, EMA e SEE com magnitudes semelhantes

Tabela 8 - Resultado das calibrações do sistema de pesagem do lisímetro em campo

Calibração	Condição da calibração	Peso inicial/ pesos utilizados nos ciclos	Resultados
1 – 05/02/23	Caixa lisimétrica vazia sem camadas do telhado verde	2 ciclos de 4 pontos, com incrementos e decrementos de cerca de 1kg (total 3.14 kg) e 1 ciclo de 2 pontos, com incremento e decremento de 3.14kg.	Curva mV x g - y = 45153 x - 42674 R <sup>2</sup> = 0,9994 EMA = 59,9 g SEE = 28,4 g
2 – 12/02/23	Caixa Lisimétrica com todas as camadas do telhado verde	3 ciclos de 6 pares de pontos, com 5 incrementos de cerca de 1kg (total 5.23 kg)	Curva mV x g - y = 45094 x - 112038 R <sup>2</sup> = 0,9997 EMA = 73,05g SEE = 30,63 g
3 – 19/02/23	Caixa Lisimétrica com todas as camadas do telhado verde	3 ciclos de 6 pares de pontos, com 5 incrementos de cerca de 1kg (total 5.23 kg)	Curva mV x g - y = 44799 x - 118275 R <sup>2</sup> = 0,9972 EMA = 167,35 g SEE = 85,65 g
4 – 02/03/23	Calibração Periódica Caixa Lisimétrica	3 ciclos de 6 pares de pontos, com 5 incrementos de cerca de 1kg (total 5.23 kg)	Curva mV x g - y = 45087 x - 121148 R <sup>2</sup> = 0.99842 EMA = 120,1 g SEE = 68,7 g
5 – 06/05/23	Calibração Periódica Caixa Lisimétrica	3 ciclos de 6 pares de pontos, com 5 incrementos de cerca de 1kg (total 5.23 kg)	Curva mV x g - y = 45262 x - 115447 R <sup>2</sup> = 0.9997 EMA = 94,9 g SEE = 58,28 g

Fonte: elaborada pelo autor

Nota: nas curvas de calibração, “x” se refere ao peso em gramas e “y” ao sinal elétrico médio lido em mili-volt.

A calibração 3 apresentou maiores erros EMA e SEE devido a presença de vento neste dia, durante a calibração. Autores como Campeche (2002) observaram situação semelhante em seus experimentos e indicaram evitar calibração de lisímetros em dias com vento ou utilizar uma estrutura corta-vento. No entanto, os referidos erros EMA e SEE, 167 g (0,23 mmET) e 86 g (0,12 mmET) respectivamente, não são significativos quando comparados com as magnitudes da evapotranspiração diária de vegetação gramínea.

Analisando os coeficientes angulares das curvas de calibração, o máximo foi obtido na calibração 5 e o mínimo, na calibração 3. Considerando um aumento de peso de 1 kg, pela curva 5, esse aumento seria lido por um aumento de 0.02209 mV. Essa variação de tensão, por sua vez, pela curva 3 equivaleria a uma variação de 989 g, resultando em uma variação máxima de 1% com as diferentes curvas obtidas.

Já em relação à repetitividade do sensor de distância no reservatório do volume drenado em campo, no período seco e sem rega entre os dias 05/05/23 e 26/05/23 (21 dias), foram observados erros de EMA e de repetitividade equivalente em lâmina d'água equivalente a 3,32 mm e 1,38 mm, respectivamente. Tais erros podem, portanto, superar a evapotranspiração diária quando em condições não favoráveis, não podendo se utilizar os dados obtidos pelo sensor de distância para o cálculo da evapotranspiração.

Como o sensor de distância teve uma melhor performance em ambiente protegido, esta variação observada no campo deve estar relacionada a variação de temperatura, de pressão ou vapor d'água dentro da bombona exposta ao sol.

#### 4.3 DADOS CLIMÁTICOS NO PERÍODO MONITORADO

Os dados de precipitação foram obtidos das estações da EPAGRI e do LABHIDRO. De 03/03/2023 a 13/04/2023, foram usados dados do LABHIDRO por terem resolução melhor (de 5 em 5 minutos) e pela distância dessa estação ao lisímetro (poucos metros). Depois desta data, a estação começou a apresentar dados inconsistentes e passou-se a usar os dados da estação da EPAGRI, que se situa a cerca de 2,5 km do lisímetro, e que apresenta dados acumulados de hora em hora. O monitoramento se estendeu até 23/06/2023.

Na Figura 33 e Tabela 9, são apresentados os valores de precipitação diária no período monitorado, a tabela sintetiza alguns comportamentos da precipitação ao longo

dos meses monitorados. Foi considerado dia sem precipitação, os dias que tiveram registro de acumulado diário menor que 0,5 mm.

Figura 33 - Precipitação no período monitorado

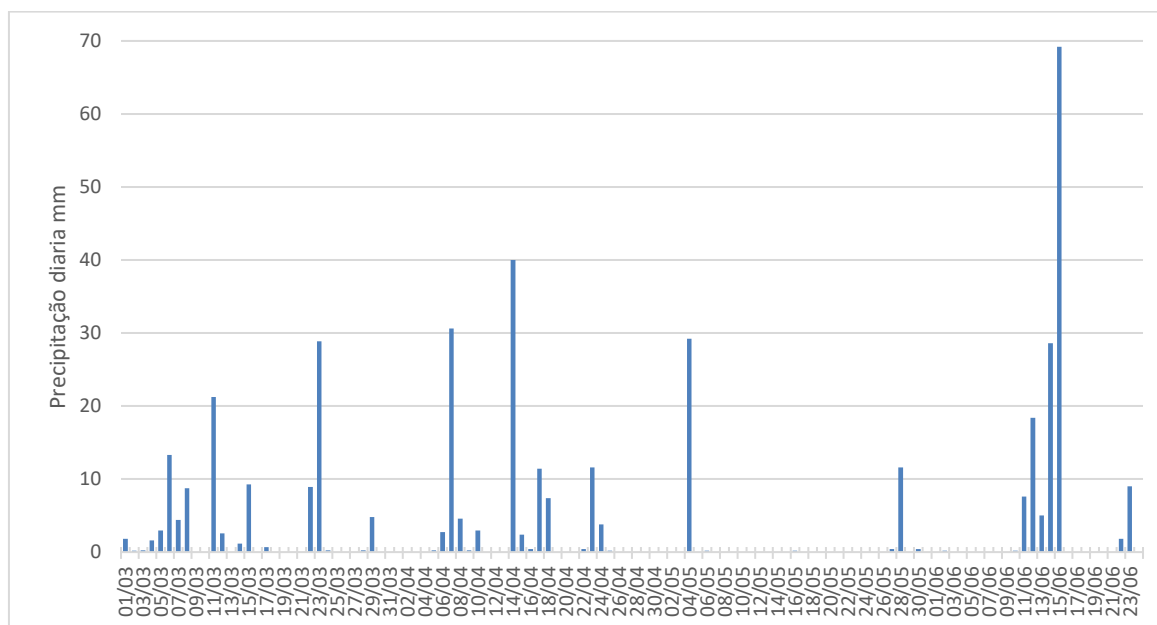


Tabela 9 - Comportamento mensal das precipitações no período monitorado

Mês	Dias / Mês	Precipitação observada (mm)	Normal climatológica INMET (mm)	Dias com precipitação	Dias sem precipitação	Maior período sem precipitação (dias)
Março	31	131	180	14	17	5
Abril	30	118	116	10	20	6
Maiο	31	42	126	2	29	23
Junho	30	140	86	7	23	10

A precipitação mensal dos meses de março e de abril tiveram magnitudes semelhantes. Porém, ao longo dos dias, o mês de março apresentou chuvas com distribuição mais uniforme que abril. Em abril, houve aumento no número de dias sem precipitação e alguns dias com precipitações mais intensas elevaram o acumulado mensal.

No mês de maio houve uma diminuição considerável no acumulado mensal em relação aos meses anteriores, com apenas dois dias com precipitação acima de 0,5 mm. Esse mês teve um longo período sem precipitação (23 dias), sendo necessário a rega do sistema para evitar que o substrato atingisse o ponto de murcha e conseqüentemente a morte da vegetação.

Já em junho devido à passagem de um ciclone extratropical na região, foram registrados grandes volumes de precipitação durante os dias 14/06 e 15/06, com registros de acumulados diários de 28,6 mm e 69,2 mm, respectivamente.

Comparando a precipitação acumulada mensal observada com a Normal Climatológica do INMET (1991 a 2020), percebe-se que os meses de março e maio foram menos chuvosos que a Normal; o acumulado de abril teve magnitude semelhante ao normal, sendo ligeiramente superior; e o mês de junho foi mais chuvoso que a Normal. Em relação à evapotranspiração, é esperado que com a diminuição da precipitação, menos água estará disponível no sistema, acarretando em menores taxas de evapotranspiração.

É possível perceber que houve uma diminuição, ao longo do período monitorado, da radiação solar e da temperatura média do ar, conforme mostrado nas Figura 34 e Figura 35. Tais variáveis influenciam na evapotranspiração por estarem relacionados à energia para conversão da água no estado líquido para o gasoso. Portanto, o comportamento da temperatura do ar e da radiação solar monitorado também corrobora com a hipótese de que haja diminuição da evapotranspiração ao longo do período monitorado, em especial no mês de maio, devido a pouca disponibilidade de água no sistema.

Figura 34 – Temperatura do ar no período monitorado

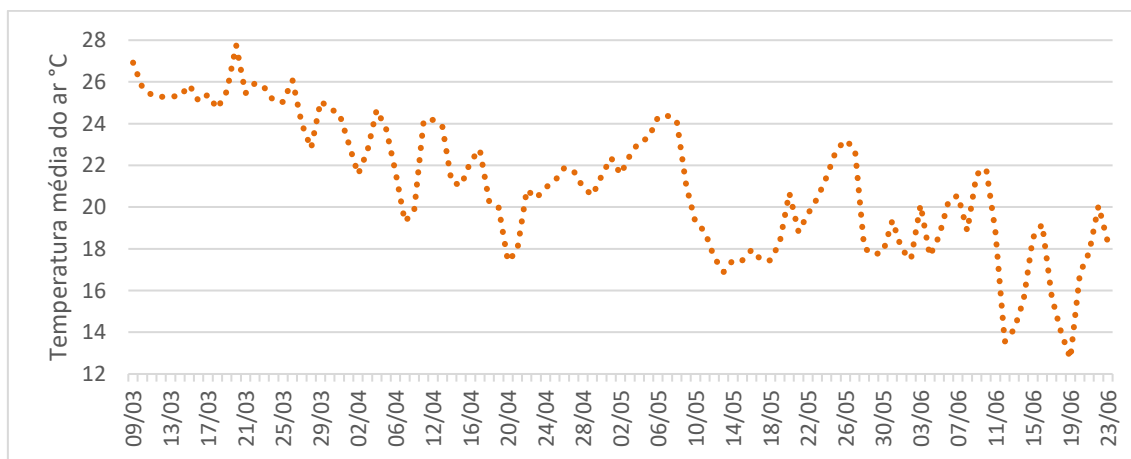
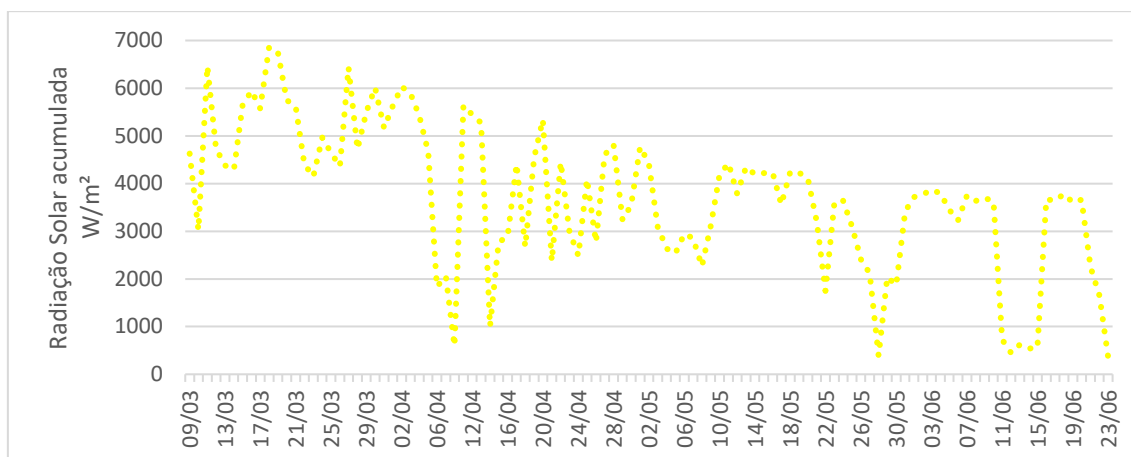


Figura 35 – Radiação solar no período monitorado



A velocidade do vento e a umidade do ar são variáveis que também podem interferir na evapotranspiração. Porém, não foi observado uma tendência de aumento ou diminuição dessas variáveis ao longo do tempo, conforme apresentado nas Figura 36 e 37.

Figura 36 – Velocidade do vento no período monitorado

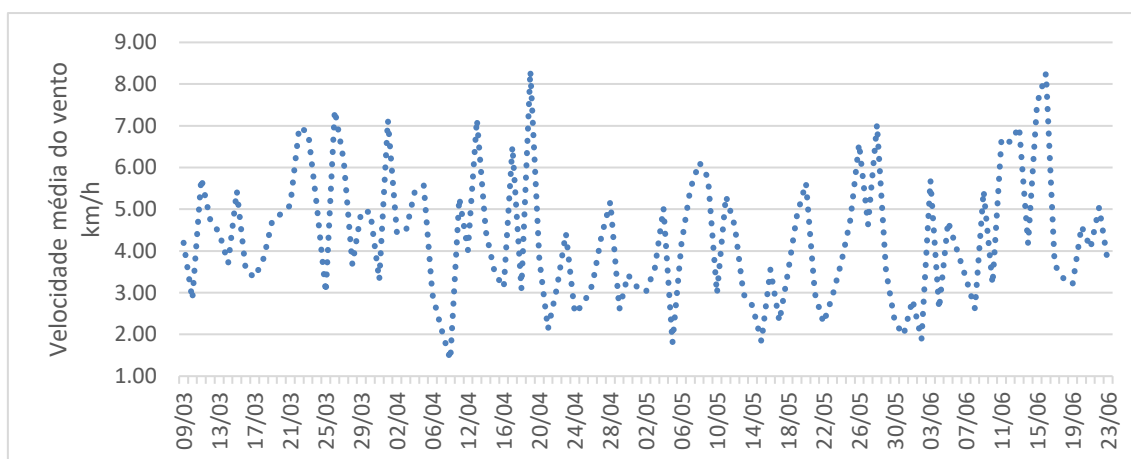
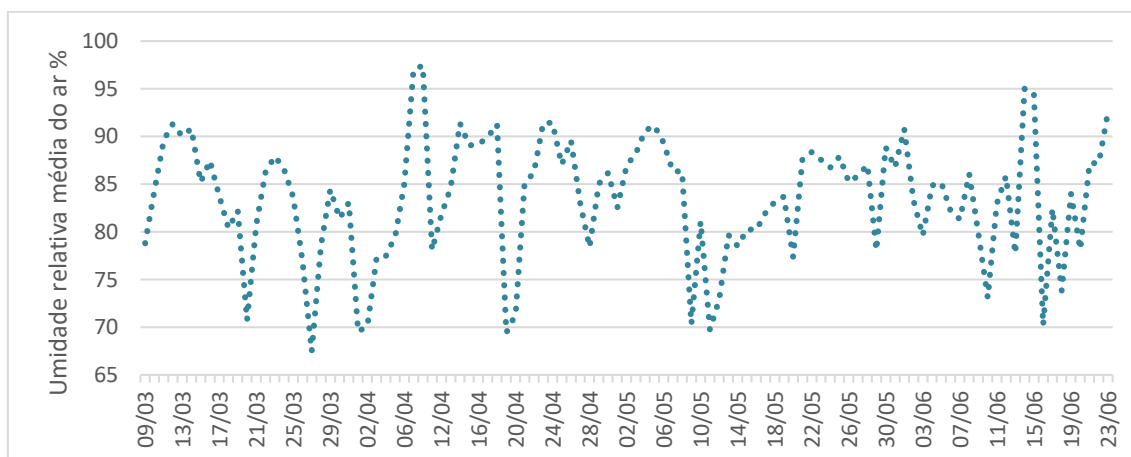


Figura 37 – Umidade relativa do ar no período monitorado



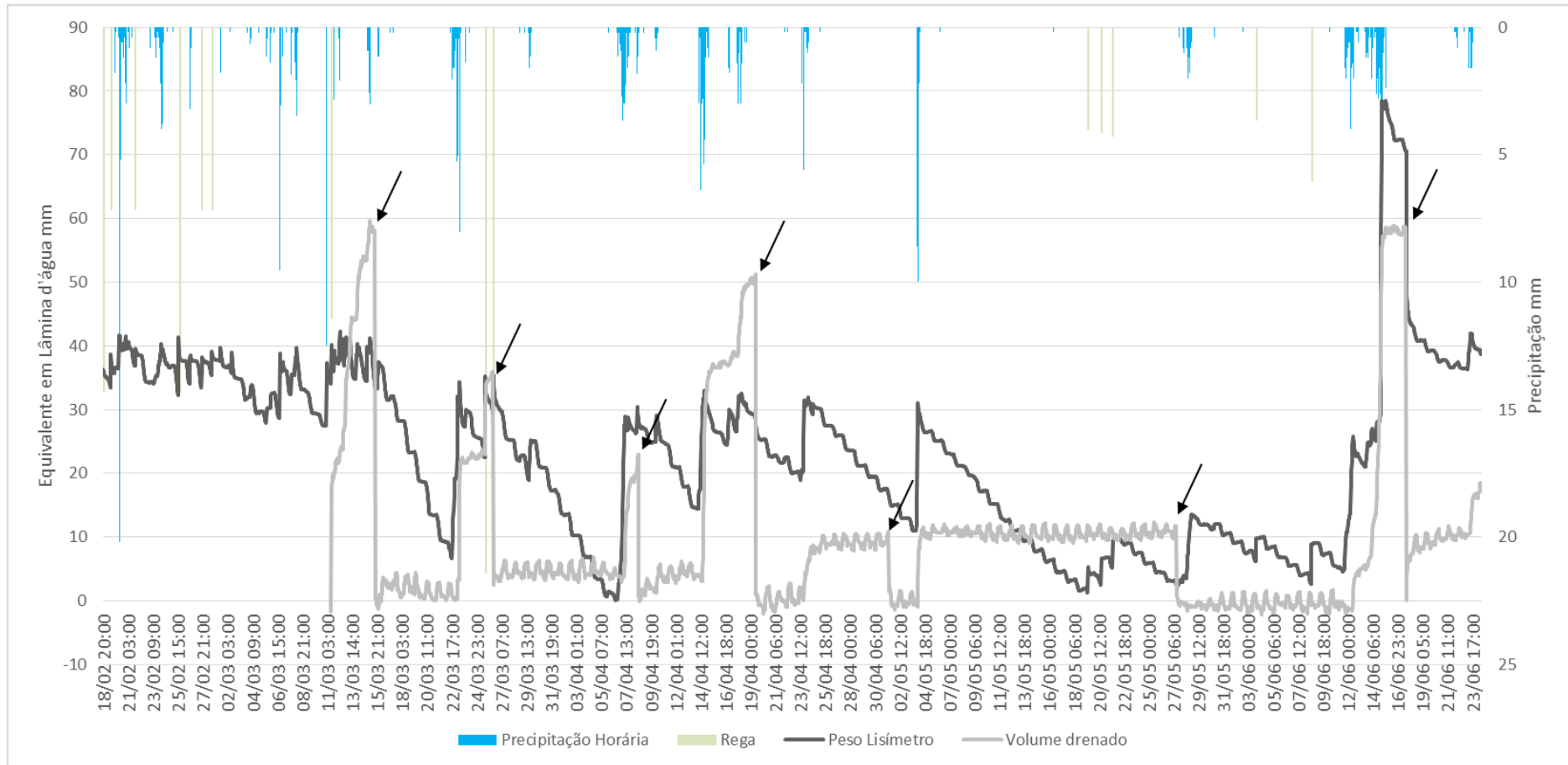
#### 4.4 DADOS DO LISÍMETRO NO PERÍODO MONITORADO

Embora o lisímetro estivesse em campo desde fevereiro de 2023, o período de análise dos dados do lisímetro consistiu de 17 de março a 23 de junho. O período inicial foi necessário para que a vegetação se adaptasse ao substrato, assim como adequações no sistema de coleta do volume drenado do lisímetro e na instrumentação do reservatório do volume drenado.

Na Figura 38 estão apresentados os valores de peso do lisímetro e do volume drenado, convertidos em lâmina d'água, assim como as precipitações ou regas que ocorreram durante o período monitorado.

Para a conversão do peso, foi considerado a densidade da água como 1kg/L para obter variação de volume pelo tempo e os volumes de peso do lisímetro e do escoado pelo dreno foram convertidos para lâmina d'água dividindo os respectivos volumes pela área do lisímetro (0,74 m<sup>2</sup>). No caso do peso do lisímetro, foi considerado o menor peso monitorado do período como “zero”.

Figura 38 - Comportamento das precipitações, das regas e dos dados medidos pelo lisímetro no período monitorado



Fonte: elaborada pelo autor

Entre 17 de março e 23 de junho, foram feitas regas em 7 dias. Inicialmente para melhor adaptação da vegetação ao sistema e nos meses de maio e junho para evitar que a vegetação murchasse, devido ao longo tempo sem chuva.

Conforme descrito na metodologia, os valores de peso e de nível apresentados passaram por um filtro de mediana móvel, utilizando a mediana das últimas 6 medições (ou últimos 30 minutos). Com o filtro, foi possível eliminar as oscilações das medições de peso, inerente à instrumentação do equipamento e também mudanças de peso que não se relacionam a entrada ou saída de água como, por exemplo, rajada de vento ou repouso de pequenos animais no sistema.

O comportamento do peso monitorado pelo sistema ocorreu conforme esperado, aumentando em caso de precipitação ou rega e diminuindo ao longo do tempo devido à evapotranspiração ou escoamento pelo dreno.

Já os volumes escoados pelo dreno, monitorados pelo sensor de nível, mostram os aumentos de nível quando houve entrada de água no reservatório e diminuição quando o reservatório foi esvaziado (indicado pela seta preta). Porém, em dias que não houve escoamento pelo dreno, mesmo com o filtro numérico, ocorreram oscilações diárias na medição do nível d'água, acarretando em variações entre valores máximos e mínimos, ou Erro Máximo Absoluto (EMA) na ordem de 2 L, equivalente à lâmina d'água de 2,9 mm.

Tais oscilações diferem dos testes realizados em ambiente fechado com os sensores de distância realizados em fevereiro, quando foram encontrados valores de EMA na ordem de 0,5 cm, equivalente à 0,6 L ou lâmina d'água de 0,8 mm.

Foi observada a condensação do vapor do reservatório do líquido drenado, conforme Figura 39. Porém, somente a evaporação do líquido armazenado não justifica a variação de cerca de 3mm. Fatores como interferência da temperatura ou do vapor d'água na medição do sensor, assim como dilatação do material do reservatório podem ser outras interferências que contribuem para essas oscilações.



Figura 39 - Condensação na tampa do reservatório do volume escoado pelo dreno



Fonte: elaborada pelo autor

Ainda em relação ao sistema de coleta do volume escoado pelo dreno, foi percebido que quando o reservatório está no seu nível máximo, devido à perda de carga da mangueira e das conexões entre o reservatório e o dreno da caixa do lisimétrica, há uma dificuldade da água escoar, acarretando em acúmulo de água no sistema.

Assim, com as chuvas volumosas dos dias 11/06 a 15/06, após a saturação do substrato e na medida que o reservatório aumentava de nível d'água até o extravasor, o peso da caixa lisimétrica chegou a atingir cerca de 110 kg (equivalente a 77,6 mm de lâmina d'água) na noite do dia 15/06. No entanto, vale ressaltar que o sistema de pesagem foi testado com peso máximo de até 75 kg, sendo necessário realizar nas calibrações futuras, com uma abrangência maior para conhecer as limitações de medição em faixas maiores de peso (próximo à capacidade máxima nominal, de 200 kg).

Logo após abertura do registro de fundo do reservatório no dia 17/06, o peso do conjunto diminuiu consideravelmente (o equivalente a 20 mm de lâmina d'água em menos de meia hora). Após o fechamento do registro, a caixa lisimétrica perdeu cerca de 3 mm entre 17:10 e 17:35 e o reservatório teve aumento de volume equivalente lâmina d'água dessa magnitude, indicando que o sistema ainda estava perdendo água por escoamento no fundo.

Portanto, há a necessidade de melhorar o sistema de coleta do volume escoado para evitar acúmulo de água adicional na caixa lisimétrica, que pode interferir na evapotranspiração

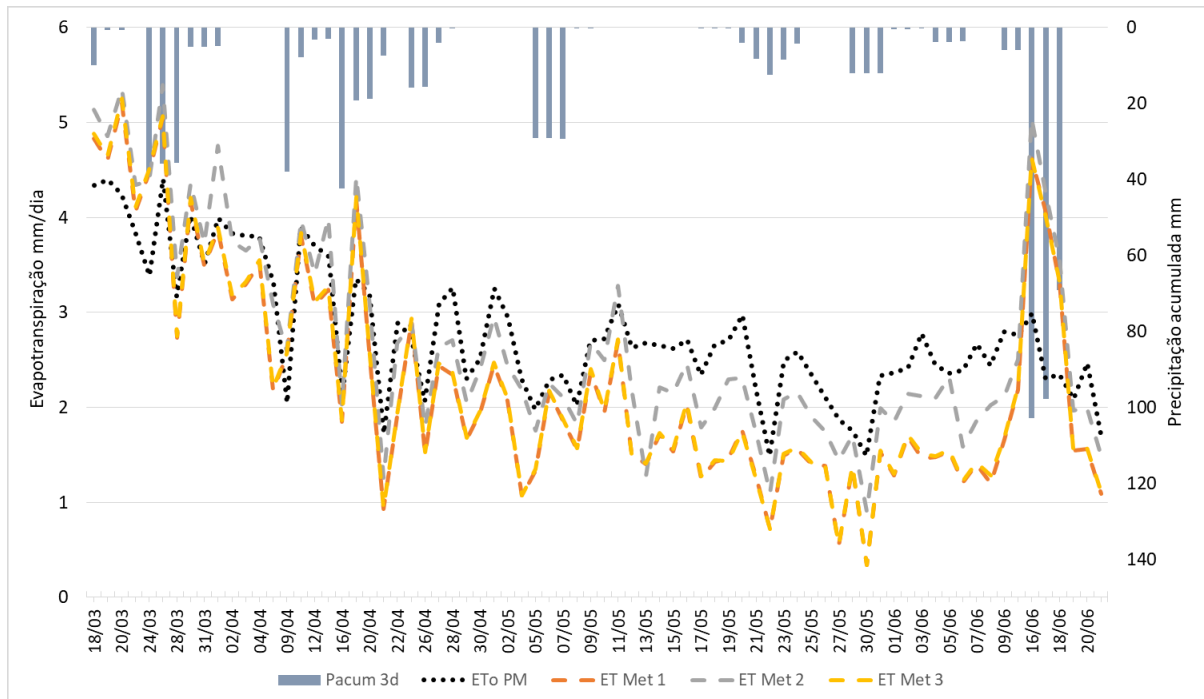
pelo aumento de disponibilidade de água no sistema, além do fato que o excesso de peso pode danificar as células de carga, cuja capacidade máxima de sobrecarga é de 60 kg sobre cada uma.

#### 4.4.1 Evapotranspiração monitorada pelo lisímetro nos dias sem chuva

Pela limitação dos dados obtidos com o sensor de distância apresentada no tópico anterior, a quantificação da evapotranspiração diária nos dias em que ocorreu escoamento pelo dreno foi prejudicada. Assim, foram desconsiderados os dias que tiveram ocorrência de precipitação acumulada diária maior que 0,5 mm (podendo gerar escoamento pelo dreno) e os dias em que foram observados escoamento pelo dreno após realização de rega no lisímetro.

Na Figura 40 estão apresentados os valores diários de ET, quantificados pelos métodos de Campeche (2002) com os dados de peso do lisímetro e a evapotranspiração de referência estimada por Penmann Monteith (FAO-56) – ETo PM, assim como o acumulado de precipitação ou rega dos últimos 3 dias (Pacum 3d). Os valores de evapotranspiração quantificada e estimada para o período de análise, assim como a de precipitação ou rega diários se encontram no APÊNDICE I.

Figura 40 – Valores de evapotranspiração obtidos por lisimetria e por estimativa ao longo do período de monitoramento



Fonte: elaborada pelo autor

No geral, o comportamento da evapotranspiração de referência estimada acompanha o dos três métodos obtidos por lisimetria. Os métodos 1 e 3 resultaram em valores de evapotranspiração diária semelhantes, apresentando desvios maiores em relação à evapotranspiração de referência, quando comparados com o método 2.

Ao longo do período monitorado, a evapotranspiração medida pelo lisímetro pelos três métodos e a de referência estimada tiveram diminuição nos valores diários. Esse comportamento está coerente com os dados de precipitação, temperatura e radiação solar apresentados anteriormente.

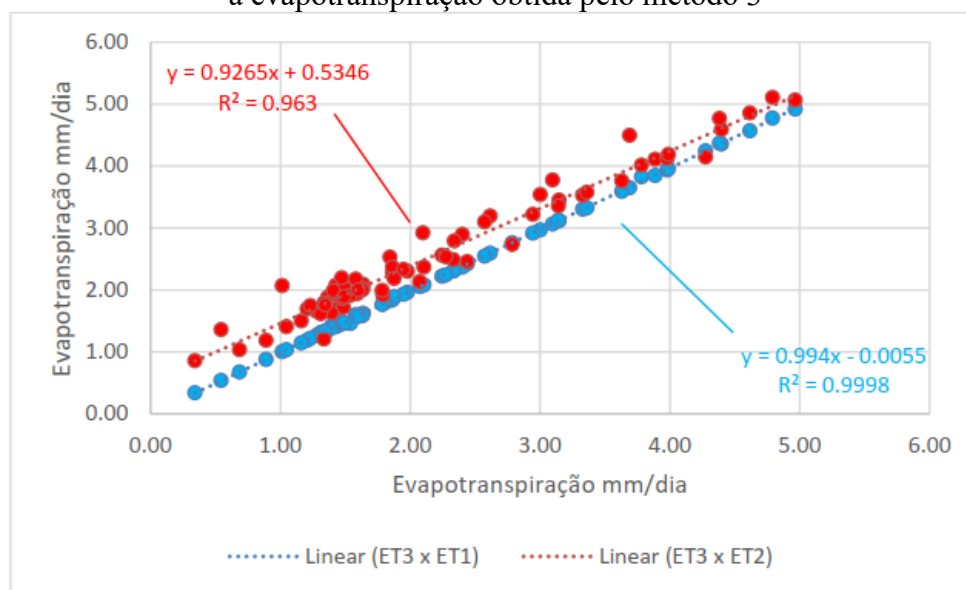
No início do período monitorado, no mês de março, com maior disponibilidade hídrica, a evapotranspiração encontrada pelo lisímetro esteve, no geral, acima da evapotranspiração estimada. Ao longo do tempo, devido à redução nas chuvas, a evapotranspiração medida se tornou menor que a estimada.

Nos dias 16 a 18/06, devido ao volume de chuva (acumulado de 129 mm nos 7 dias antecedentes, com 28.6 mm no dia 14/06 e 69.2 mm no dia 15/06), houve um acúmulo de água no módulo de telhado verde devido à limitação do escoamento no dreno. Portanto, acumulou-se água no fundo do módulo, acarretando em armazenamento de água além do proporcionado pelas camadas do módulo. Nesses dias, a evapotranspiração medida, pela alta disponibilidade hídrica e pelas condições climáticas favoráveis, foi significativamente maior que a observada no mês de junho, chegando a valores próximos a 5 mm/dia, magnitude semelhante ao período de março.

Corroborando com Campeche (2002), resultados semelhantes foram observados ao analisar os métodos de lisimetria ao adotar a diferença de massa entre a meia noite atual e do dia anterior (Método 3) como método padrão.

Na Figura 41 estão plotados os valores diários de evapotranspiração obtidas pelos três métodos de lisimetria utilizados neste trabalho, sendo o método 3 considerado como método padrão.

Figura 41 - Evapotranspiração obtida pelo método 1 e pelo método 2 quando comparado com a evapotranspiração obtida pelo método 3



Fonte: elaborada pelo autor

De maneira geral, houve uma superestimativa da evapotranspiração considerando o somatório das diferenças negativas (método 2), em média cerca de 25%. Já para o método 1, observou-se que os valores de evapotranspiração se adequaram bem, de maneira geral, ao método padrão, subestimando em média cerca de 2%.

Comparando a evapotranspiração quantificada pelo método 3 com os estudos que investigaram a evapotranspiração de telhados verdes utilizando vegetação gramínea, percebe-se que, embora haja especificidades locais e das configurações do telhado verde, são correspondentes. Os resultados dos referidos estudos estão sintetizados na Tabela 10.

O período de monitoramento deste estudo ocorreu majoritariamente na estação de outono, sendo quantificado entre 17/03/2023 e 24/06/2023, 74 valores diários de evapotranspiração. Sendo a evapotranspiração máxima, mínima e média de 4,97 mm/dia; 0,34 mm/dia; e 2,18 mm/dia, respectivamente.

Estudo de Takebayash e Moriyama (2007) encontraram, no Japão, durante o outono, valores de evapotranspiração variando entre 1,72 a 6,9 mm/dia. Ouldboukhitine et al. (2012), na França, encontraram valores máximos de 8 mm/d durante um estudo conduzido por sete dias em ambiente controlado.

Já Jahanfar et al. (2018) encontraram, no Canadá, valores de evapotranspiração médios de 4 mm/dia no estudo de lisimetria conduzido no verão e no outono, em ambiente externo, por

6 meses. Além das condições climáticas diferentes, a parcela de telhado verde monitorado era do tipo semi-intensivo, com 20 cm de substrato, o que pode ter contribuído para uma maior disponibilidade da água para a vegetação e proporcionando maiores taxas de evapotranspiração.

Por fim, Araújo et al. (2014) no estudo conduzido por 35 dias no Brasil, em Londrina, cuja região climática é semelhante à deste estudo, obtiveram valores médios de evapotranspiração de 1,72 mm/d. Embora conduzido também no outono, o valor médio da evapotranspiração representa cerca de 78% do valor encontrado neste estudo. Características construtivas do telhado verde e condições climáticas locais podem ter contribuído para essa diferença.

Tabela 10 - Valores de evapotranspiração encontrados experimentalmente em telhados verdes com vegetação gramínea.

Fonte	Localidade	Clima	Instrumentação / Tipo de medição	Período de monitoramento	Prof. do substrato e Tipo de vegetação	ET Mensurada
A	Kobe – Japão	Cfa	Sens. Um. / Indireta	1 mês - outono	Semi-intensivo (20cm) – gramínea	1,72 a 6,9 mm/dia
B	La Rochelle - França	NA	Lis. / Direta	7 dias	Prof. NI - Gramínea	Até 8 mm/dia
C	Toronto - Canadá	Dfb	Lis. – Direta	6 meses – verão e outono	Semi-Intensivo (20 cm) – gramíneas campestres	4 mm/dia (média)
D	Londrina – Brasil	Cfa	Lis. – Direta	35 dias - outono	Extensivo (Prof. NI) - Zoysia japônica	1,72 mm/dia (média)
E	Florianópolis-Brasil	Cfa	Lis – Direta	4 meses - outono	Extensivo (10 cm) – Grama São Carlos (Axonopus compressus)	0,34 a 4,97 mm/dia

Fonte: A - Takebayash e Moriyama (2007); B - Ouldboukhitine et al. (2012); C- Jahanfar et al. (2018); D- Araújo et al. (2014); E – Resultados obtidos neste estudo.

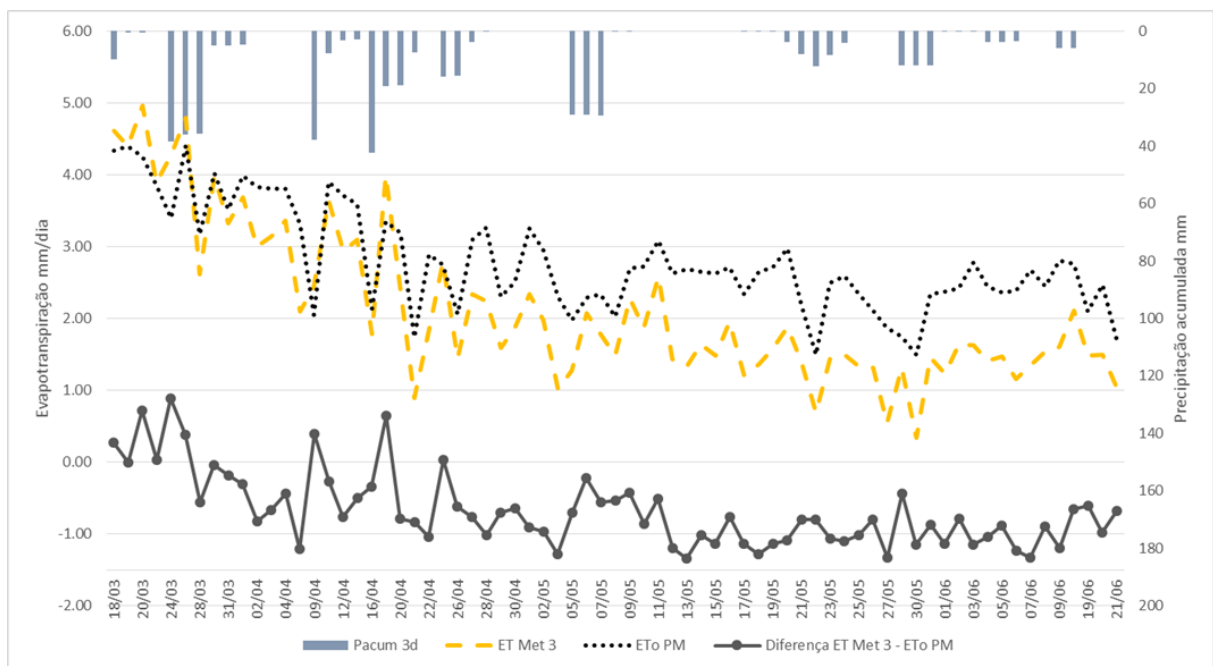
A evapotranspiração diária do lisímetro quantificada pelo método 3 foi comparada com a evapotranspiração de referência estimada por Penman-Monteith (FAO-56), utilizando os dados climáticos levantados. Nos dias 16 a 18/08, pelos valores obtidos no lisímetro não corresponderem à evapotranspiração diária em condições não padrão (com limitação hídrica), foram excluídos da análise da aderência da evapotranspiração estimada por Penman Monteith e do cálculo dos coeficientes de ajustes.

Observa-se que, na maior parte dos dias não houve precipitação, por consequência, a água pode ter sido um fator limitante ao processo de evapotranspiração. Dito isto, a

evapotranspiração medida pelo lisímetro apresentou comportamento dentro do esperado, sendo menor que a evapotranspiração de referência estimada.

Na Figura 42 é possível observar que em períodos com maior disponibilidade hídrica, a diferença entre a evapotranspiração medida pelo lisímetro e a evapotranspiração estimada por Penman-Monteith é positiva, ou seja, a evapotranspiração do módulo é maior que a estimada. Já em períodos com menores disponibilidade hídrica, o mensurado é menor que o estimado e a diferença se torna negativa.

Figura 42 - Comportamento da evapotranspiração mensurada e estimada ao longo do período monitorado, excetuando dias 16 a 18/06



Fonte: elaborada pelo autor

Os valores acumulados de evapotranspiração monitorados e estimados, assim como as entradas no módulo (precipitação ou rega) estão apresentados na Tabela 11. Percebe-se que em março, a evapotranspiração estimada foi menor que a monitorada, sendo 4% menor que o valor acumulado mensal observado.

No decorrer dos meses, com a diminuição da disponibilidade hídrica, os valores de evapotranspiração estimados superaram a monitorada, chegando a 66% maior que o acumulado observado em junho, quando desconsiderados os dias 16 a 18/06, período com acúmulo de água no sistema.

Tabela 11 – Valores acumulados de evapotranspiração monitorados e estimados e entradas (rega ou precipitação) durante o período do estudo

<b>Período</b>	<b>ET Método 03 Acumulado</b>	<b>ET FAO PM Acumulado</b>	<b>Precipitação ou rega acumulado</b>	<b>Relação ET FAO PM / ET Método 03 (%)</b>
17/03 a 31/03	36.9	35.3	80.1	96%
01/04 a 30/04	50.6	61.3	119.0	121%
01/05 a 31/05	56.2	70.3	70.3	125%
01/06 a 23/06	30.5 (19.1)	43.9 (31.7)	149.7	144% (166%)
<b>TOTAL</b>	<b>174.1 (162.8)</b>	<b>210.7 (198.6)</b>	<b>419.0</b>	<b>121% (122%)</b>

Fonte: elaborada pelo autor

Notas: (1) Valores de ET e entradas no sistema em mm; (2) Total de entradas no módulo (precipitação e rega) no mês de março foi 166.7 mm; (3) Em parênteses, valores acumulados desconsiderando dias 16 a 18/06, período em que houve excesso de disponibilidade hídrica no módulo monitorado.

Durante todo o período monitorado, a evapotranspiração estimada superestimou cerca de 21% a monitorada no lisímetro. Quando comparando os acumulados de evapotranspiração com as entradas (precipitações ou regas) no sistema, a evapotranspiração monitorada representou cerca de 41.5% das entradas no sistema, aumentando para 50.2% se comparando com a evapotranspiração estimada.

Já relação à aderência da evapotranspiração estimada por Penman Monteith (FAO-56) aos dados obtidos pelo lisímetro, foram encontrados índices KGE, NSE,  $R^2$  e RMSE de 0.535, 0.362, 0.823 e 0.849, respectivamente. Os índices KGE e NSE indicam um ajuste satisfatório dos dados observados em relação aos dados estimados e o  $R^2$  indica bom ajuste. Já o RMSE indica o erro médio quadrático de 0.85 mm, erro que supera a evapotranspiração diária dos dias com menores taxas de evapotranspiração.

Conforme mencionado anteriormente, essa diferença pode ser explicado pelos valores monitorados pelo lisímetro representam a evapotranspiração do telhado verde em condições não padrão e a estimativa considerar a evapotranspiração de referência, quando não há limitação hídrica.

#### 4.4.2 Coeficientes de ajustes

Após calcular os coeficientes de ajuste combinado (de estresse hídrico e de cultura) de forma diária, utilizando a Equação 14, foram feitas médias mensais e média geral desses coeficientes. Para o mês de junho, foram excluídos do cálculo do coeficiente de ajuste, os dias 16 a 18/06, devido a condição climática atípica e à limitação do dreno, relatados anteriormente. Os coeficientes de ajuste combinados mensais ( $K_{comb\_mês}$ ) e geral ( $K_{comb\_geral}$ ), estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Coeficientes de ajuste combinado

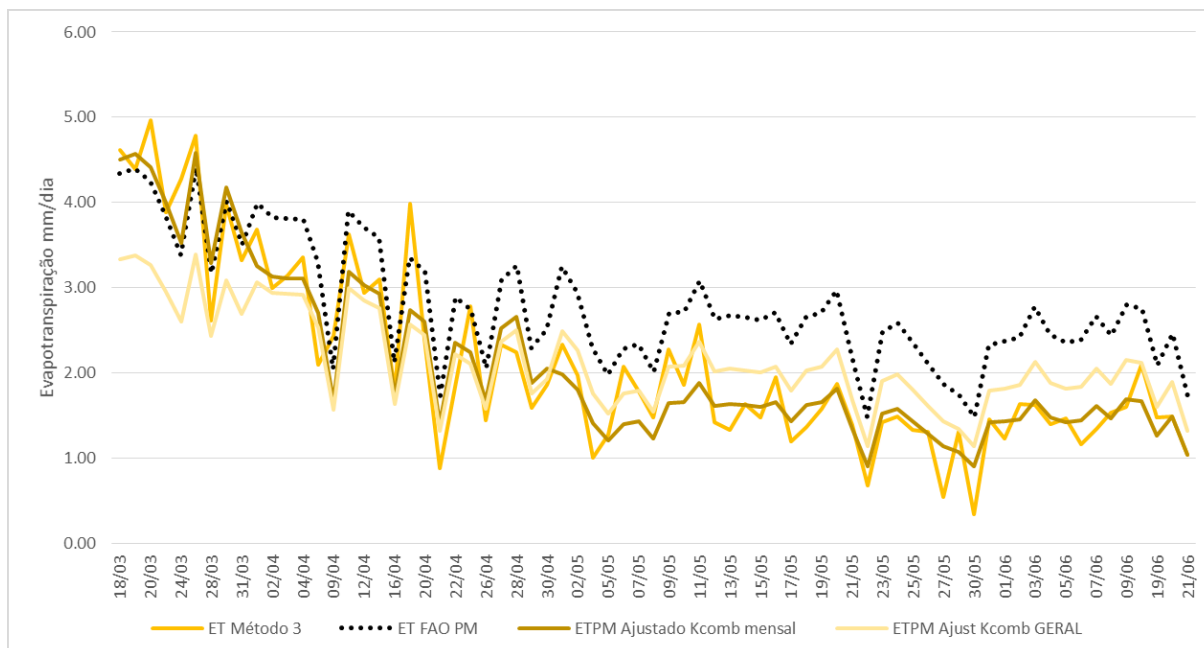
<b>Coeficiente de ajuste combinado (<math>K_{comb}</math>)</b>	<b>Período considerado</b>	<b>Valor</b>
$K_{comb\_março}$	18/03 a 31/03	1.039
$K_{comb\_abril}$	01/04 a 30/04	0.818
$K_{comb\_maio}$	01/05 a 31/05	0.612
$K_{comb\_junho}$	01/06 a 21/06	0.604
$K_{comb\_geral}$	18/03 a 21/06	0.768

Fonte: elaborada pelo autor

A Figura 43 apresenta os ajustes da evapotranspiração estimada pelo método de Penman-Monteith (FAO-56) com os coeficientes de ajustes calculados e a Tabela 13 indicam os índices NSE, KGE, RMSE e  $R^2$  dos ajustes com coeficientes mensal e geral.



Figura 43 - Comportamento da evapotranspiração estimada após ajustes com coeficientes mensal e geral



Fonte: elaborada pelo autor

Tabela 13 - Índices NSE, KGE,  $R^2$  e RMSE após ajustes da evapotranspiração estimada por FAO PM com uso de coeficientes de ajuste do estudo

Índices	Ajuste $K_{comb}$ mensal	Ajuste $K_{comb}$ geral
NSE	0.883	0.672
KGE	0.887	0.510
$R^2$	0.885	0.823
RMSE	0.363	0.609

Fonte: elaborada pelo autor

Para o período monitorado, o ajuste dos valores estimados utilizando  $K_{comb}$  geral ou  $K_{comb}$  mensal resultaram em valores de  $R^2$  próximos, ambos avaliados como bons. Já para os índices KGE, Nash e RMSE, a utilização do  $K_{comb}$  mensal resultou em índices melhores que  $K_{comb}$  geral. Os resultados da evapotranspiração ajustada mensalmente quando comparados com a evapotranspiração medida pelo lisímetro podem ser avaliados como bom a muito bom para os índices NSE, KGE e  $R^2$ .

O uso dos coeficientes de ajuste melhorou substancialmente a aderência dos valores de evapotranspiração estimada aos valores de ET mensurada, diminuindo o RMSE de 0.85 mm

para 0.609 mm e 0.363 mm, quando feitos ajustes pelo  $K_{comb}$  geral e  $K_{comb}$  mensal, respectivamente.

No entanto, os resultados são referentes a quatro meses de monitoramento (predominantemente no outono), sendo necessário um período de monitoramento maior, considerando outras estações do ano e ao longo dos anos.

#### 4.4.3 Análise da influência do módulo de telhado verde na redução do escoamento superficial

Separando os eventos de chuva por intervalos de 30 minutos sem precipitação, com os dados da estação do LABHIDRO entre os dias 17/03/23 e 10/04/23, foram identificados 21 eventos de precipitação caracterizados na Tabela 14.

Tabela 14 – Características dos eventos de precipitação observados na estação do LABHIDRO

Evento	Acumulado no evento mm	Duração h:m	Intensidade mm/h	Acumulado último dia	Acumulado últimos 3 dias	Acumulado últimos 7 dias
1	9.1	8:00	1.14	0.2	0.2	10.2
2	11.4	4:35	2.49	9.4	9.4	10.1
3	15.6	3:35	4.36	20.8	20.8	21.5
4	2.1	2:20	0.88	31.2	36.4	36.4
5	4.6	5:40	0.81	0.5	0.5	2.7
6	1.4	2:25	0.57	0.5	0.5	0.5
7	27.9	16:15	1.72	1.6	1.8	1.8
8	3.7	4:35	0.80	29.5	29.7	29.7
9	4.3	4:55	0.88	6.9	33.8	33.8
10	3.0	5:55	0.50	0.0	29.7	38.4
A	0.2	1:15	0.18	0.5	3.2	16.3
B	0.5	2:30	0.18	0.0	11.4	35.2
C	0.2	1:05	0.21	0.0	0.0	3.4
D	0.2	0:50	0.27	17.9	38.5	38.5
E	0.2	1:00	0.23	0.2	0.2	38.9
F	0.2	1:20	0.17	0.2	0.2	38.9
G	0.2	0:50	0.27	0.0	0.0	0.9
H	0.2	1:15	0.18	0.2	0.2	0.2
I	0.2	0:45	0.30	31.5	33.4	33.4
J	0.2	0:45	0.30	16.0	33.4	33.6
K	0.2	0:35	0.39	4.6	37.9	38.2

Fonte: elaborada pelo autor

Calculando o percentual da precipitação retida na parcela de telhado verde, considerando as variações de peso convertido para lâmina d'água entre início e final do evento, obteve-se os resultados da Tabela 15.

Tabela 15 - Análise dos dados do lisímetro com os eventos identificados

<b>EVENTO</b>	<b>DIF PESO mm</b>	<b>DIF DRENO mm</b>	<b>PACUM mm</b>	<b>% RETIDO</b>	<b>% RETIDO Corrigido</b>
1	6.04	-0.17	9.14	66%	66%
2	10.66	2.81	11.43	93%	93%
3	0.86	16.90	15.62	6%	6%
4	2.62	0.05	2.06	128%	100%
5	5.88	-0.41	4.57	129%	100%
6	2.28	-0.01	1.37	167%	100%
7	22.73	10.07	27.89	82%	82%
8	1.53	2.64	3.66	42%	42%
9	1.59	-18.52	4.34	37%	37%
10	3.25	1.92	2.97	109%	100%
A	-0.01	-0.21	0.23	-6%	0%
B	0.49	-0.06	0.46	113%	100%
C	0.12	0.48	0.23	57%	57%
D	-0.01	0.12	0.23	-4%	0%
E	0.60	0.11	0.23	277%	100%
F	-0.40	0.93	0.23	-183%	0%
G	0.36	-0.08	0.23	166%	100%
H	-0.04	-0.10	0.23	-0.20	0%
I	0.04	0.07	0.23	0.18	17%
J	-0.07	-0.32	0.23	-0.32	0%
K	-0.04	0.03	0.23	-0.16	0%

Fonte: elaborado pelo autor

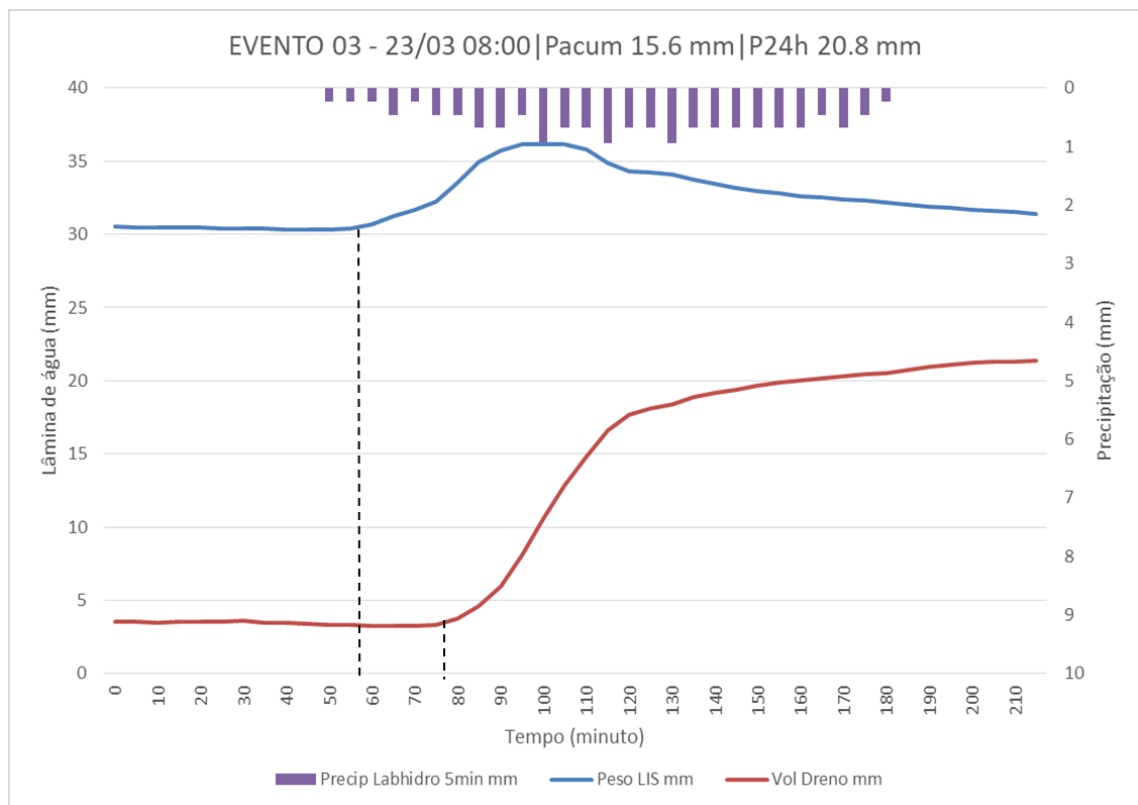
Dos onze eventos com precipitação acumulada menor que 0,5 mm, nove desses eventos tiveram que ter ajustes no percentual retido. Os valores foram corrigidos considerando o valor negativo como 0% e percentual máximo de retenção de 100%. O número grande de eventos que precisou de correção, pode ser devido ao erro de medição, que superam a altura pluviométrica do evento.

Dos dez eventos maiores que 0,5 mm, quatro necessitaram de ajustes no cálculo pela variação do peso ter sido maior que a precipitação registrada no pluviômetro. A necessidade de

ajuste desses eventos também deve estar associada aos erros de medição do dispositivo. Considerando o percentual corrigido, o módulo de telhado verde reteve cerca de 74% do acumulado dos dez maiores eventos do período (61 mm dos 83 mm da precipitação).

Além da retenção da parcela da precipitação, foi possível observar o retardo do escoamento. Nos eventos 02, 03, 07, 08 e 09, os tempos de retardo variaram de cerca de 20 minutos a 650 minutos. A exemplo, na Figura 44 são apresentados os registros de peso do módulo e de nível do reservatório frente ao Evento 03. Os demais eventos encontram-se no APÊNDICE J e APÊNDICE K.

Figura 44 - Peso e escoamento pelo dreno do módulo de telhado verde ao longo do evento de precipitação 03



Fonte: elaborada pelo autor

#### 4.5 CUSTOS DO LISÍMETRO CONSTRUÍDO

Os custos de material do lisímetro desenvolvido com as camadas do telhado verde, conforme levantamento apresentado no APÊNDICE L, foi de R\$ 1838.20. Porém, destaca-se

que, durante o processo definição dos componentes a serem utilizados no lisímetro, houve gastos além do valor exposto, visto que durante os testes, foram perdidos alguns *Datalogger shield* e pinos de placas de Arduino UNO foram inutilizados devido a mau contato. Ainda, as 4 células de carga utilizadas no lisímetro em campo, foram escolhidos de um total de 12, tendo algumas com características semelhantes e outras inferiores. A quantidade de componentes inviáveis pode depender da forma em que eles são fabricados, transportados e armazenados.

Excetuando os materiais para compor o telhado verde, ou seja, considerando os materiais para a estrutura, a parte hidráulica e a instrumentação do lisímetro construído, o custo de material utilizado foi de R\$ 1492,80 ou USD 298,56 (cotação em 29/09/23: USD 1,00 = R\$ 5,00). Tal custo levantado, é inferior aos encontrados nos trabalhos de Allen e Fisher (1990) e Bello e Rensburg (2017), de USD 11000 e USD 520, respectivamente, e semelhante ao do Israilev (2017). Os referidos trabalhos também visaram à redução dos custos de construção de lisímetros de pesagem eletrônica, sendo o último com uso de eletrônica aberta, resultando em um lisímetro de pesagem portátil de área de 0,1 m<sup>2</sup> e 0,4 m de profundidade.

No entanto, vale ressaltar que os trabalhos tiveram objetivos, características construtivas e emprego de tecnológicas diferentes, além de diferentes custos regionais de materiais, performance dos dispositivos e outros fatores que tornam difícil a comparação dos custos com os levantados na bibliografia.

Ademais, para uma análise mais completa dos custos do lisímetro, é interessante incluir no levantamento dos custos, os relacionados com a manutenção e operação do módulo monitorado como podas e manejo da biomassa, regas, fertilização do solo, custo de substituição de peças em caso de dano ou avaria em algum componente e custos de pessoal e de energia elétrica utilizada pela instrumentação.

#### 4.6 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Este tópico aborda os desafios e dificuldades encontrados durante a realização do presente trabalho. Por ser o primeiro trabalho envolvendo instrumentação de baixo custo desenvolvido pelo grupo, a maioria das dificuldades encontradas neste trabalho estão relacionadas direta ou indiretamente a esse aspecto.

Dos componentes que compuseram a instrumentação do lisímetro, foram percebidos que parte deles não possuem qualidade suficiente. A qualidade desses componentes, a depender

do local a serem adquiridos, podem sofrer interferências pela forma em que eles foram fabricados, transportados e armazenados.

Antes do início dos testes descritos no trabalho, por exemplo, alguns dos componentes foram entregues com avaria (três Datalogger shield tiveram problemas na detecção do cartão SD e/ou problemas relacionados a leitura do tempo do RTC; duas células de carga foram entregues com avarias, sendo uma delas com o extensômetro danificado e outro com os fios danificados).

Das células de carga testadas, por exemplo, cinco dos doze sensores testados (menos que a metade) foram selecionados para comporem o lisímetro desenvolvido.

Durante o desenvolvimento do trabalho, para o armazenamento de dados e registro dos horários nos testes, foi necessária a substituição de quatro Datalogger Shields. Ocorreram problemas envolvendo o leitor de cartão SD após certo tempo de uso e/ou parada do funcionamento do RTC. O quinto esteve funcionando no lisímetro em campo desde o início de março de 2023.

O pino indicativo de gravação dos dados do lisímetro esteve funcionando até metade de junho, sendo possível ter ocorrido oxidação da conexão entre o LED e a placa de Arduino ou o próprio LED (não foi possível verificar o motivo de sua parada ou a correção do problema até o final do período de monitoramento do estudo).

Do lisímetro instalado, além do problema hidráulico discutido nos tópicos anteriores, houve aparecimento de insetos e necessidade de remoção de ninhos de vespa. Também foi observada a deformação da caixa de horti-fruti (parte estrutural do lisímetro), conforme apresentado na Figura 45. Essa deformação poderia ser amenizada em caso de aquisição de uma placa de madeira única, do tamanho da caixa e não duas tábuas (as tábuas menores foram adquiridas por terem menores custos).

Figura 45 - Registros das dificuldades encontradas no lisímetro em campo



Fonte: elaborado pelo autor

Nota: a) aparecimento de ninhos de vespa sob o lisímetro; b) problema de escoamento encontrado quando do nível alto no reservatório; c) deformação na caixa ambiental.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs um lisímetro com configurações do sistema de medição de peso que atenda ao critério de baixo custo, cujos erros foram aceitáveis para a medição da evapotranspiração.

Os custos de material do lisímetro desenvolvido com as camadas do telhado verde foi de R\$ 1838,20. Porém, destaca-se que, durante o processo de definição dos componentes a serem utilizados no lisímetro, houve gastos além do valor exposto, visto que durante os testes, foram perdidos alguns componentes da instrumentação. Contudo, o valor total ainda se apresenta vantajoso, em relação aos custos de um lisímetro “convencional”.

A configuração do lisímetro de pesagem construído permitiu a obtenção de valores diários de evapotranspiração para uma parcela de telhado verde monitorada entre os meses de março a junho de 2023. Tais valores estão, no geral, com magnitudes semelhantes aos encontrados por outros estudos que investigaram a evapotranspiração em telhados verdes com gramíneas, e de acordo com o esperado em relação à evapotranspiração de referência, estimada com dados da região.

Coefficientes de ajustes foram propostos para ajustar a evapotranspiração estimada por FAO Penman-Montheit. Foi observada a melhora na aderência dos valores de evapotranspiração estimada aos valores de ET mensurada, no qual, o ajuste dos valores estimados de forma mensal se mostrou melhor que o ajuste geral. No entanto, a definição deste tipo de coeficiente depende de um tempo mais longo de monitoramento para que se chegue a valores mais representativos.

Em termos percentuais, durante o período de monitoramento, a evapotranspiração monitorada pelo lisímetro representou cerca de 42% do total de entradas (chuva e rega) no sistema, evidenciando a importância desse fenômeno em telhados verdes no controle e manejo de águas pluviais. Entretanto, utilizando a estimativa da evapotranspiração por FAO Penman Montheit, essa relação aumenta para 50%, superestimando o fenômeno e, com isso, podendo superestimar a capacidade de retenção ou de controle do escoamento dessas estruturas.

Já em relação à influência do módulo de telhado verde na diminuição da geração de escoamento superficial para os eventos de precipitação analisados, foi observado que o módulo de telhado verde reteve cerca de 74% do acumulado dos dez maiores eventos do período (61



mm dos 83 mm da precipitação) e um tempo de retardo do escoamento variando entre 20 a 650 minutos.

Considera-se que a configuração do lisímetro apresentado possui potencial para replicação, viabilizando o desenvolvimento de mais estudos que busquem investigar a utilização de telhados verdes como medidas de drenagem urbana sustentável.

Propõe-se que sejam estudados avanços no sistema lisimétrico em trabalhos futuros. Melhorias no sistema de medição do volume escoado, assim como na coleta e condução desse volume, podem permitir a quantificação da evapotranspiração em dias em que é gerado escoamento pelo dreno. Ademais, a instalação de mais módulos de telhado verde, bem como, a utilização de uma área tampão no entorno (e no mesmo nível) dos módulos de telhado verde podem aumentar a representatividade dos dados monitorados. Ainda, a introdução de um display de LED com botões pode melhorar e facilitar a forma de coleta de dados (retirar o cartão SD com os dados armazenados e não depender de um notebook com IDE instalado).

## REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas (Brasil). Estimativas de evapotranspiração real por sensoriamento remoto no Brasil. Brasília: ANA, 2020. 41 p. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/23-estimativas-de-evapotranspiracao-real-por-sensoriamento-remoto>>. Acesso em: 20 mar. 2021
- Albertazzi Júnior, A.; Roberto de Souza, A. Fundamentos de metrologia científica e industrial. 1ª Ed. Editora Manole, 2008
- ALBERTO, M. A. Produção agrícola sobre as coberturas das edificações no espaço urbano e as possibilidades de impacto na segurança hídrica. 2017. 207 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- ALI, A. S.; ZANZINGER, Z.; DEBOSE, D.; STEPHENS, B. Open Source Building Science Sensors (OSBSS): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection. *Building and Environment*, v. 100, p. 114-126, maio 2016. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.010>.
- ALLEN, R. G.; FISHER, D. K. Low-cost Electronic Weighing Lysimeters. *ASAE*, v. 33, n. 6, p. 1823-1833. nov.-dez. 1990. DOI: 10.13031/2013.31546.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, v. 98, n. 6, p. 899 – 920. abr. 2011. DOI:10.1016/j.agwat.2010.12.015.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO, 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm#Contents>>. Acesso em: 05 fev. 2021.
- Amaral , A. M.; VELLAME, L. M. Teixeira, M. B. SOARES, F. A. L.; NETO, A. C. Construção e calibração de lisímetros de pesagem em ambiente protegido. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* v.12, nº.4, p. 2740 – 2748, 2018b. DOI: 10.7127/rbai.v12n400967.
- AMARAL, A. M. FILHO, F. R.; VELLAME, L. M.; TEIXEIRA, M. B.; SOARES, F. A. L.; SANTOS, L. N. S. Uncertainty of weight measuring systems applied to weighing lysimeters. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 145, p. 208-216, 2018a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.033>.
- ANJOS, E. V. P. Plataforma de testes para conversores analógico-digitais. Projeto de graduação do curso de Engenharia Eletrônica e de Computação. Escola Politécnica/UFRJ. 125 p. 2014. Disponível em: <<http://www.repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10009398.pdf>>. Acesso em 20 jul. 2021.

AOSONG. AM2302 数字温湿度传感器模块 . AOSONG, 2020. Disponível em: <<http://www.aosong.com/products-22.html>>. Acesso em 20 jul. 2021.

ARAÚJO, A. P.; SQUIZZATO, R.; COSTANZI, R.; BALDIN, M.; PUZZI, L. C. Balanço hídrico de sistema modular para telhado verde. Enciclopédia Biosfera, v. 10, n, 18, 2014. Disponível em: < <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/2692>>. Acesso em 15 fev. 2021.

ARBOIT, N. K. S. Evapotranspiração de Sedum rupestre em telhados verdes extensivos. 2017. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

Arduino. analogRead(). Arduino, 2020. Disponível em:<<https://www.arduino.cc/reference/pt/language/functions/analog-io/analogread/>>. Acesso em 20 mar. 2021.

ARDUINO. Arduino Products. ARDUINO, 2021. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/Products>>. Acesso em 20 jul. 2021.

ARDUINO. What is Arduino? ARDUINO, 2018. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em 20 jul. 2021.

BALLARD , B. W.; WILSON, S.; ILLMAN, S.; SCOTT, T.; ASHLEY, R.; KALLAGHER, R. The SuDS Manual. London, UK: CIRIA, 2015. 968 p.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2011. 318 p.

BÄR, B. V.; TAVARES, S. F. Estado da arte do comportamento hidrológico de telhados verdes no brasil: uma revisão sistemática. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 8, n. 4, p. 257-271, dez. 2017. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v8i4.8650106>.

BELLO, Z. A.; RENSBURG, L. D. V. Development, calibration and testing of a low-cost small lysimeter for monitoring evaporation and transpiration. Irrigation and drainage, v. 66, p. 263-272, 2017. DOI: 10.1002/ird.2095

BERGHAGE, R.; BEATTIE, D; JARRETT, A.; THURING, C.; RAZAEI, F. Green Roofs for Stormwater Runoff Control. Cincinnati: U.S. EPA, 2009. 80 p.

BERNDTSSON, J. C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. Ecological Engineering, v. 36, p. 351-360, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>

BRUTSAERT, W.H. Evapotranspiration into the atmosphere – Theory, history and applications. [s. l.]: Springer Netherlands, 1982. 302p. DOI: 10.1007/978-94-017-1497-6.

CAIXAPLAST. Caixa Plástica Agrícola Vazada CP31 TA 6040. CAIXAPLAST, 2020. Disponível em:<<https://caixaplast.com.br/product/caixa-plastica-agricola-vazada-cp31-ta-6040/>>. Acesso em 30 abr. 2021.

CAMARGO, A. P. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. *Bragantia*, Campinas, v. 21, n. 12, p. 163-213, fev. 1962.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Bragantia*, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052000000200002>.

CAMERON, K. C.; HARRISON, D. F.; SMITH, N. P.; MCLAY, C. D. A. A method to prevent edge-flow in undisturbed soil cores and lysimeters. *Australian Journal of Soil Research*, v. 28, n. 6, p. 879-886, 1990. DOI: 10.1071/SR9900879.

CAMPECHE, L. F. S. M. Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida 'Tahiti' (*Citrus latifolia* Tan.). 2002. 67 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002. doi:10.11606/T.11.2002.tde-05082002-160324.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; GUERRA, J. G. M.; CRUZ, F. A.; SOUZA, A. P. Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 363-372, maio/agosto, 2007.

CASCONE, S., COMA, J.; GAGLIANO, A.; PÉREZ, G. The evapotranspiration process in green roofs: A review. *Building and Environment*, v. 147, p. 337 – 355, jan. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.024>.

CASTRO, A.S.; GOLDENFUM, J.A.; DA SILVEIRA, A.L; DALLAGNOL, A. L. B.; LOEBENS, L.; DEMARCO, C. F.; LEANDRO, D.; NADALETI, W. C. The analysis of green roof's runoff volumes and its water quality in an experimental study in Porto Alegre, Southern Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*. v. 27, p. 8410-9534. jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06777-5>

COLLAZO-ORTEGA, M.; ROSAS, U.; REYES-SANTIAGO, J. Towards Providing Solutions to the Air Quality Crisis in the Mexico City Metropolitan Area: Carbon Sequestration by Succulent Species in Green Roofs. *Plos Currents*, v. 1, mar. 2017. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5400495/>>. Acesso em 15 out. 2020. DOI: 10.1371/currents.dis.bb66ae4f4f3c6eb118a019a29a9ce80f.

COSTA, D. G.; DURAN-FAUNDEZ, C. Open-source electronics platforms as enabling technologies for smart cities: recent developments and perspectives. *Electronics*, v. 7, n. 12, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics7120404>.

DEPARTMENT OF PLANNING AND LOCAL GOVERNMENT. Water Sensitive UrbanDesign Technical Manual for the Greater Adelaide Region: Chapter 6 - Rain Gardens, Green Roofs and Infiltration Systems. Government of South Australia, Adelaide. 2010, 60 p.

DIGIOVANNI, K.; MONTALTO, F.; GAFFIN, S.; ROSENZWEIG, C. Applicability of Classical Predictive Equations for The Estimation of Evapotranspiration from Urban Green

Spaces: Green Roof Results. *J. Hydrol. Eng.*, v. 18, n. 1, p. 99-107, jan. 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000572.

ENCINAS, J. A. Diseño e implementación de sistema de caracterización de células de carga con fines docentes. 2019, 149 p. Trabajo fin de grado (grado en Electrónica industrial y automática) – Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 2019.

EVANS, M.; NOBLE, J. HOCHENBAUM, J. Arduino em ação. São Paulo: Novatec, 2013. 424 p.

FARIA, R. T.; CAMPECHE, F. S.M.; CHIBANA, E. Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.1, p.237–242, 2006.

FELLER, M. M. Quantifying evapotranspiration in green infrastructure: a green roof case study. 2011. 107 p. Thesis (Master of Science in Civil Engineering) - Department of Civil and Environmental Engineering, Villanova University, 2011.

FELTRIN, R. M.; DE PAIVA, J. B. D.; DE PAIVA, E. M. C. D.; MEISSNER, R.; RUPP, H.; BORG, H. Use of Lysimeters to Assess Water Balance Components in Grassland and Atlantic Forest in Southern Brazil. *Water Air Soil Pollut*, v. 228, n. 247, jun. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3423-4>

FENG, Y. Evapotranspiration from Green Infrastructure: Benefit, Measurement, and Simulation. In: BUCUR, D. (ed.). *Advanced Evapotranspiration Methods and Applications*. IntechOpen, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.80910>.

FISHER, D. K. Simple weighing lysimeters for measuring evapotranspiration and developing crop coefficients. *Int J Agric & Biol Eng.*, v. 5, n. 3, p. 35-43. set. 2012. DOI: 10.3965/j.ijabe.20120503.004.

GETTER, K. L.; ROWE, B. The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development. *HortScience*, v. 41, n. 5, p. 1276-1286, ago. 2006.

GRINIAS, J. P.; WHITFIELD, J. T.; GUETSCHOW, E. D.; KENNEDY, R. T. An Inexpensive, Open-Source USB Arduino Data Acquisition Device for Chemical Instrumentation. *Journal of Chemical Education*, v. 93, n. 7, p. 1316-1319, jun. 2016. DOI: 10.1021/acs.jchemed.6b00262  
Grupo de análise e projeto mecânico (GRANTE). Apostila de Extensometria. Florianópolis: GRANTE/UFSC, 2004. 47 p.

HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; DUSEK, D. A.; MAREK, T. H.; STEINER, J. L. Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeters. *Transaction of the ASCE*, v. 38, n. 4, p. 1019-1024, 1995.

HOWELL, T. A. Lysimetry. In: HILLEL, D. (ed.). *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Elsevier, 2005. p. 379-386. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00391-X>.

HOWELL, T. A.; MCCORMICK, R. L.; PHENE, C. J. Design and Installation of Large Weighing Lysimeters. *Transactions of the ASAE*, v. 28, n. 1, p. 106–112. 1985. doi:10.13031/2013.32212.

HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; JENSEN, M. E. History of Lysimeter Design and Use for Evapotranspiration Measurements. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O.; WALTER, I. A. JENSEN, M. E. (ed.). *Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements*. New York: ASCE, 1991.

HUI, S. C. M. Technical Guidelines for Green Roofs Systems in Hong Kong. Department of Mechanical Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong. 2016. Disponível em: < <http://ibse.hk/greenroof/> >. Acesso em 05 abr. 2021.

ISRAILEV, C. E. Lísímetro de pesagem portátil para contextos de pesquisa e desenvolvimento. 2017. 116 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade de Cuiabá, Cuiabá, 2017.

JAHANFAR, A.; DRAKE, J.; SLEEP, B.; GHARABAGHI, B. A modified FAO evapotranspiration model for refined water budget analysis for Green Roof systems, *Ecol. Eng.* 119 (2018) 45–53, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.021>.

JAHANFAR, A.; DRAKE, J.; SLEEP, B.; GHARABAGHI, B. A modified FAO evapotranspiration model for refined water budget analysis for Green Roof systems. *Ecological Engineering*, v. 119, p. 45 – 53, ago. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.021>.

JENSEN, M. E.; ALLEN, R. G. (ed.). *Evapotranspiration and irrigation water requirements – ASCE manuals and reports on engineering practice No 70. 2*. Ed. Virginia: ASCE, 2016. 744 p.

JOBIM, A. L. Diferentes tipos de telhados verdes no controle quantitativo da água pluvial. 2013. 75 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

KHAN, B.R.; MAINUDDIN, M.; MOLLA, M.N. Design, construction and testing of a lysimeter for a study of evapotranspiration of different crops. *Agricultural Water Management*, v. 23, n. 3, p. 183-197, 1993. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(93\)90027-8](https://doi.org/10.1016/0378-3774(93)90027-8).

KLEIN, L. B. Controle qualitativo e quantitativo do escoamento pluvial em diferentes tipos de coberturas. 2017, 181 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

LI, Y.; BABCOCK JR, R. W. Green roofs against pollution and climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 34, n. 4, p. 695–705, maio 2014. DOI:10.1007/s13593-014-0230-9

LIBERALESSO, T. Telhados verdes extensivos: influência da composição do substrato na retenção hídrica e no desenvolvimento da vegetação. 2018. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

LIZ, D. G. S. Análise experimental do comportamento térmico do telhado verde extensivo para Florianópolis. 2016, 113 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e urbanismo) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2016.

LIZ, D. S.; ORDENES, M.; GUTHS, S. Análise experimental do comportamento térmico do telhado verde extensivo para Florianópolis. *Oculum ens.*, Campinas, v. 15, n. 2, p. 315-333, maio/ago. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.24220/2318-0919v15n2a4053>.

Machado, E. S. Desenvolvimento de um lisímetro de pesagem com plataforma Arduino. 2019, 43 p. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Curitiba, 2019.

MARASCO, D. E.; CULLIGAN, P. J. ; MCGILLIS, W. R. Evaluation of common evapotranspiration models based on measurements from two extensive green roofs in New York City. *Ecological Engineering*, v. 84, p. 451 – 462, nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.001>.

MAREK, T. H.; Schneider, A. D.; Howell, T. A.; Ebeling, L. L. Design and Construction of Large Weighing Monolithic Lysimeters. *Transactions of the ASAE*, v. 31, n. 2, p. 477-484, mar./abr. 1988.

MARTIN, B. K. The dynamic stormwater response of a green roof. 2008. 149 p. Thesis (Master of Landscape Architecture) - Faculty of Graduate Studies, School of Environmental Design and Rural Development, University of Guelph, 2008.

MARTIN, E. C.; OLIVEIRA, A. S.; FOLTA, A. D.; PEGELOW, E. J.; SLACK, D. C. Development and testing of a small weighable lysimeter system to assess water use by shallow - rooted crops. *Transactions of the ASAE*, v. 44, n. 1, p. 71-78, set. 2001.

MARY , W.; ARRUDA, J.; DA SILVA, L. P.; PINTO, G. B.; GARCIA, B. A. S. R.; SOARES, Y. X. Tecnologias alternativas de produção vegetal em telhados verdes em áreas de interesse social. *Revista Conexão UEPG*, v. 6, n. 1, jan./dez. 2010. Disponível em: <<https://revistas2.uepg.br/index.php/conexao/article/view/3747>>. Acesso em 15 fev. 2021.

MEISSNER, R.; RUPP, H.; HASELOW, L. Use of lysimeters for monitoring soil water balance parameters and nutrient leaching. In: Prasad, M. N. V.; Pietrzykowski, M. (ed.). *Climate Change and Soil Interactions*. Elsevier, 2020. p. 171-205. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818032-7.00007-2>.

MENDONÇA, T. T.; SCHMITZ, M. D.; ANDRADE, I. T. Inserindo o conceito lixo zero e a economia sustentável em escolas públicas de Florianópolis. *Extensio*, v. 15, n. 29, p. 70-80, 2018.

MERINO , A. A. Sistema de adquisición y control de lisímetro de pesada en maceta con Arduino. 2016, 149 p. Trabajo fin de grado (grado em Ingeniería en tecnologías industriales) – Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 2016.

MERINO, A. A. Sistema de adquisición y control de lisímetro de pesada en maceta con Arduino. 2016. 138 p. TCC (Graduação) – Curso de Ingeniería en Tecnologías Industriales,



Escola Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 2016.

MINETTO, B; PERSCH, C. G.; BULÉ, B. P. PIMENTEL, F. C.; TASSI, R. Desenvolvimento preliminar de sistema de baixo custo baseado na plataforma Arduino para monitoramento de variáveis hidrológicas. Anais do 9º Fórum internacional Ecoinnovar. Santa Maria : Rio Grande do Sul. ISSN 2316 – 1361.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Transactions of the ASABE, v. 50, n. 3, p.885-900, 2007. DOI:10.13031/2013.23153

Nascimento, R. Atlas ambiental de Florianópolis. Florianópolis, SC: Instituto Larus, 81 p., 2002.

NETTO, L. F. Divisores de Tensão, 2023. Disponível em <[https://www.facom.ufu.br/~jamil/electronica/divisores\\_tensao/divisores\\_tensao.htm](https://www.facom.ufu.br/~jamil/electronica/divisores_tensao/divisores_tensao.htm)>. Acesso em: 15 mar. 2022.

NOROUZI, R; ARVANAGHI, H; SALMASI, F; FARSADIZADEH, D; GHORBANI, M. A. A new approach for oblique weir discharge coefficient prediction based on hybrid inclusive multiple model. Flow Measurement And Instrumentation, [S.L.], v. 76, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101810>.

NOURI, H.; BEECHAM, S.; , KAZEMI, F.; HASSANLI, A. M. A review of ET measurement techniques for estimating the water requirements of urban landscape vegetation. Urban Water Journal, 10:4, 247-259, 2013. DOI: 10.1080/1573062X.2012.726360.

NOYA , M. G.; CUQUEL, F. L.; SCHAFER, G.; ARMINDO, R. A. Substrates for cultivating herbaceous perennial plants in extensive green roofs. Ecological Engineering. v. 102, p. 662-669, maio 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.042>.

OBERNDORFER, E.; LUNDHOLM, J.; BASS, B.; COFFMAN, R. R.; DOSHI, H.; DUNNETT, N.; GAFFIN, S.; KÖHLER, M.; LIU, K. K. Y.; ROWE, B. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. BioScience, v. 57, n. 10, p. 823–833, nov. 2007. DOI:10.1641/b571005

OHNUMA JUNIOR, A. A.; MARQUES, M.; PIMENTEL DA SILVA, L. Efeitos globais da temperatura e da precipitação em telhados verdes. Revista Brasileira de Climatologia, [S.l.], v. 20, ago. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v20i0.47437>.

Open Source Hardware Association (OSHW). Best Practices for Open-Source Hardware 1.0. OSHWA, 2013. Disponível em: <<https://www.oshwa.org/sharing-best-practices/>>. Acesso 15 jul. 2021.

ORTIZ, M. S. Desenvolvimento de um sistema sensor de baixo custo para a estimativa da evapotranspiração real em apoio ao imageamento por aeronaves remotamente pilotadas. 2019, 79 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Centro estadual de pesquisa em



Sensoriamento Remoto E Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ORTIZ, S. M. Desenvolvimento de um sistema sensor de baixo custo para a estimativa da evapotranspiração real em apoio ao imageamento por aeronaves remotamente pilotadas. 2019. 79 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

OULDBOUKHITINE, S.E.;BELARBI, R.; DJEDJIG, R. Characterization of green roof components: measurements of thermal and hydrological properties, *Build. Environ.* 56 (2012) 78–85, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.024>.

PARIZOTTO FILHO, S. Telhado vegetado. In: Lamberts, R. et al (ed.). *Casa eficiente: bioclimatologia e desempenho térmico*. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010. p. 89-122.

PAYERO, J. O.; IRMAKY, S. Construction, Installation, and Performance of Two Repacked Weighing Lysimeters. *Irrigation Science*, v. 26, p. 191–202, 2008. DOI: 10.1007/s00271-007-0085-9.

PAYERO, J. O.; IRMAKY, S. Construction, Installation, and Performance of Two Repacked Weighing Lysimeters. *Irrigation Science*, v. 26, p. 191-202, 2008. DOI: 10.1007/s00271-007-0085-9

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. *Meteorologia agrícola*. Ed. Revisada e ampliada. USP/ESALQ, Piracicaba, 2007.

PERSCH, C.G. Efeito escala em telhados verdes extensivos. 2019. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

PHIDGETS. Micro Load Cell (0 – 50 kg) – CZL635. PHIDGETS, 2016. Disponível em: <<https://www.phidgets.com/?tier=3&catid=9&pcid=7&prodid=226>>. Acesso em 20 mar. 2021.

PIOVESAN, T. R. Caracterização acústica de dois sistemas modulares de telhados verdes brasileiros. 2013. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

POMPÊO, C. A. Drenagem Urbana Sustentável. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 5, n. 1, p. 15-23, jan./mar. 2000. DOI: 10.21168/rbrh.v5n1.p15-23

RINCÓN, A. C. Estimativa por métodos empíricos da evapotranspiração: Aplicação em um telhado verde tropical. 2018. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

ROLA, S. M. A natureza como ferramenta para a sustentabilidade de cidades: estudo da capacidade do sistema de natureza em filtrar a água de chuva. 2008. 209 p. Tese (Doutorado

em Ciências em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SAVI, A. C.; TAVARES, S. F. Telhados verdes: uma análise da influência das espécies vegetais na retenção de água de chuva. *Revista de Arquitetura IMED*, Passo Fundo, v. 7, n. 1, p. 50-67, out. 2018. DOI: <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2018.v7i1.2647>.

SCHMIDT, C. D. S.; PEREIRA, F. A. C.; OLIVEIRA, A. S.; JÚNIOR, J. F. G.; VELLAME, L. M. Design, installation and calibration of a weighing lysimeter for crop evapotranspiration studies. *Water Resources and Irrigation Management*, v.2, n.2, p.77-85, 2013.

SILVA, M. C. Estudos sobre sistemas de destilação solar direta para potabilização de água. 2014, 343 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

SIMMONS, M. T.; GARDINER, B.; WINDHAGER, S.; TINSLEY, J. Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosystems*, v.11, n.4, p. 339–348, jul. 2008. doi:10.1007/s11252-008-0069-4

SKABELUND, L. R. ; DIGIOVANNI, K. ; STARRY, O. Monitoring Abiotic Inputs and Outputs . In: Sutton, R. K. (ed.). *Green Roof Ecosystems*. Ecological Studies, 2015. DOI:10.1007/978-3-319-14983-7

SLATTERY, C.; NIE, M. A Reference Design for High-Performance, Low-Cost Weigh Scales. *Analog Dialogue*, v. 39, n. 12, dez. 2015. Disponível em: < <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/a-reference-design-for-weigh-scales.html>>. Acesso em 20 maio 2021.

SOUZA, C. R. B.; SOUZA, S. N. M.; SECCO, D.; SIQUEIRA, J. A. C.; LENZ, A. M. Green roofs and their contribution for the reduction of room temperature in buildings in Cascavel-State Paraná/green roofs and energy efficiency. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 40, n. 1, 2018. DOI: 10.4025/actascitechnol.v40i1.35267.

SOUZA, V.O.A. Estudo experimental e computacional de um protótipo de telhado verde com bromélias. 2019. 282 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

TASSI, R.; TASSINARI, L. C. da S.; PICCILLI, D. G. A.; 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.

THOMSEN, A. Como conectar o Sensor Ultrassônico HC-SR04 ao Arduino. Filipeflop, 2011. Disponível em: < <https://www.filipeflop.com/blog/sensor-ultrassonico-hc-sr04-ao-arduino/>>. Acesso em 03 ago. 2021.

THOMSEN, A. Estação Meteorológica com Arduino. Filipeflop, 2015. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/estacao-meteorologica-com-arduino/>>. Acesso em 20 jul. 2021.

TOGINHO Filho, D. O., ZAPPAROLI, F. V. D., PANTOJA, J. C. S., Catálogo de Experimentos do Laboratório Integrado de Física Geral Departamento de Física • Universidade Estadual de Londrina, Fevereiro de 2012.

TUCCI, Carlos E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2001. 943 p.

URBAN, P. L. Universal electronics for miniature and automated chemical assays. *The Analyst*, v. 140, n. 4, p. 963–975, 2015. doi:10.1039/c4an02013h

VAREJÃO-SILVA, M. A. Meteorologia e Climatologia, Versão Digital 2, Recife, 2006. Disponível em: <[https://icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA\\_E\\_CLIMATOLOGIA\\_VD2\\_Mar\\_2006.pdf](https://icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf)>. Acesso em 07 fev. 2021.

VIEIRA, M. A. R. Sensor Inteligente para Medição de Cargas Mecânicas. Relatório Final da Dissertação de Mestrado (Engenharia Ambiental). Instituto Politécnico de Bragança. p.89, 2016. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/13185/1/Dissertação.pdf>>. Acesso em 25 jun. 2021.

VIJAYARAGHAVAN, K. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and sustainable energy reviews*, v.57, p. 740-752, maio 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>

VILELA, M. S.; FILHO, F. R. C.; TEIXEIRA, M. B.; AMARAL, A. M.; VELLAME, L. M.; SOARES, F. A. L. Acurácia de um mini-lisímetro de pesagem eletrônica de baixo custo. *Irriga, Botucatu, Edição Especial, IRRIGA & INOVAGRI*, p. 158-167, 2015.

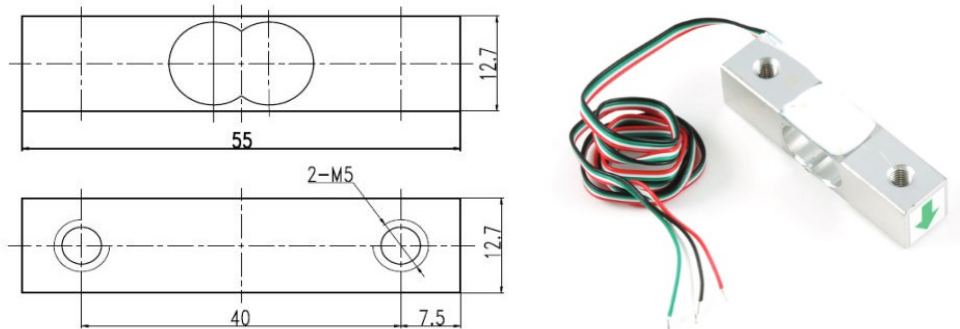
VOYDE, E.; FASSMAN, E.; SIMCOCK, R.; WELLS, J. Quantifying Evapotranspiration Rates for New Zealand Green Roofs. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 15, n. 6, p. 395 – 403. jun. 2010. DOI:10.1061/(asce)he.1943-5584.0000141.

WADZUK, B. M.; SCHNEIDER, D.; FELLER, M.; TRAVER, R. G. Evapotranspiration from a Green-Roof Storm-Water Control Measure. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 139, n. 12, dec. 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000643.

Wheeler, A.J., Ganji, A.R. Introduction to Engineering Experimentation. 3. ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1996. 470 p.

WILLES, J. A. Tecnologias em telhados verdes extensivos: meios de cultura, caracterização hidrológica e sustentabilidade do sistema. 2014. 69 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014. doi:10.11606/T.11.2014.tde-03122014-171411.

## ANEXO A – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS – CÉLULA DE CARGA CZL635-3135



ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	
Material	Liga de alumínio
Capacidade Nominal	50 kg
Dimensões	55,25 x 12,7 x 12,7 mm
Parafusos de montagem	Parafusos M5
Nº/ tamanho de fio	4 fios/ 30 AWG (0,2 mm)
Precisão	0,05%
Sensibilidade de Saída	1,0 ± 0,15 mV/V
Não-linearidade	0,05% FS
Histerese	0,05% FS
Não-repetitividade	0,05% FS
Creep (30 minutos)	0,1% FS
Efeito da temperatura no zero inicial (por 10°C)	0,05% FS
Efeito da temperatura na sensibilidade (por 10°C)	0,05% FS
Zero inicial saída nominal	±1,5% FS
Impedância de entrada	1130 ± 10 Ohm
Impedância de saída	1000 ± 10 Ohm
Resistência a Isolação (<50VDC)	≥ 5000 MOhm
Voltagem de Excitação	5 VDC
Temperatura compensada	- 10 °C a + 40 °C
Limites de operação (Temperatura)	- 20 °C a + 55 °C
Sobrecarga sem danos	120% da capacidade nominal
Sobrecarga de ruptura	150% da capacidade nominal

Fonte: Folha de dados do produto.

**ANEXO B – FOLHA DE DADOS DO ADC HX711**

## 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales

### DESCRIPTION

Based on Avia Semiconductor's patented technology, HX711 is a precision 24-bit analog-to-digital converter (ADC) designed for weigh scales and industrial control applications to interface directly with a bridge sensor.

The input multiplexer selects either Channel A or B differential input to the low-noise programmable gain amplifier (PGA). Channel A can be programmed with a gain of 128 or 64, corresponding to a full-scale differential input voltage of  $\pm 20\text{mV}$  or  $\pm 40\text{mV}$  respectively, when a 5V supply is connected to AVDD analog power supply pin. Channel B has a fixed gain of 32. On-chip power supply regulator eliminates the need for an external supply regulator to provide analog power for the ADC and the sensor. Clock input is flexible. It can be from an external clock source, a crystal, or the on-chip oscillator that does not require any external component. On-chip power-on-reset circuitry simplifies digital interface initialization.

There is no programming needed for the internal registers. All controls to the HX711 are through the pins.

### FEATURES

- Two selectable differential input channels
- On-chip active low noise PGA with selectable gain of 32, 64 and 128
- On-chip power supply regulator for load-cell and ADC analog power supply
- On-chip oscillator requiring no external component with optional external crystal
- On-chip power-on-reset
- Simple digital control and serial interface: pin-driven controls, no programming needed
- Selectable 10SPS or 80SPS output data rate
- Simultaneous 50 and 60Hz supply rejection
- Current consumption including on-chip analog power supply regulator:
  - normal operation  $< 1.5\text{mA}$ , power down  $< 1\mu\text{A}$
- Operation supply voltage range: 2.6 ~ 5.5V
- Operation temperature range:  $-40 \sim +85^\circ\text{C}$
- 16 pin SOP-16 package

### APPLICATIONS

- Weigh Scales
- Industrial Process Control

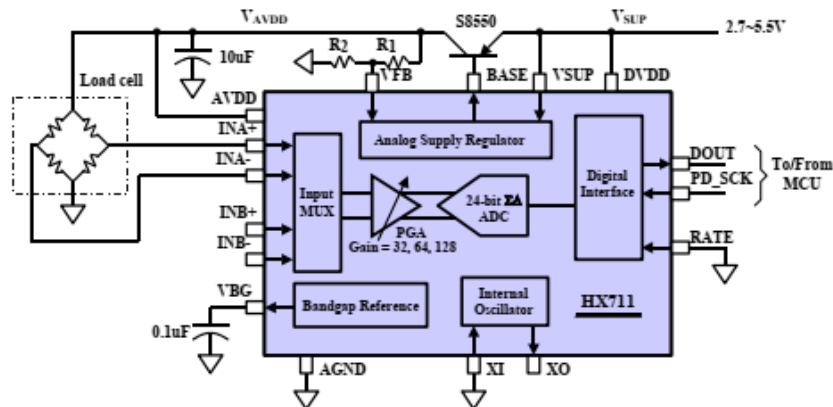


Fig. 1 Typical weigh scale application block diagram

**Pin Description**

Regulator Power	VSUP	1	16	DVDD	Digital Power
Regulator Control Output	BASE	2	15	RATE	Output Data Rate Control Input
Analog Power	AVDD	3	14	XI	Crystal I/O and External Clock Input
Regulator Control Input	VFB	4	13	XO	Crystal I/O
Analog Ground	AGND	5	12	DOUT	Serial Data Output
Reference Bypass	VBG	6	11	PD_SCK	Power Down and Serial Clock Input
Ch. A Negative Input	INNA	7	10	INPB	Ch. B Positive Input
Ch. A Positive Input	INPA	8	9	INNBNB	Ch. B Negative Input

SOP-16L Package

Pin #	Name	Function	Description
1	VSUP	Power	Regulator supply: 2.7 ~ 5.5V
2	BASE	Analog Output	Regulator control output (NC when not used)
3	AVDD	Power	Analog supply: 2.6 ~ 5.5V
4	VFB	Analog Input	Regulator control input (connect to AGND when not used)
5	AGND	Ground	Analog Ground
6	VBG	Analog Output	Reference bypass output
7	INA-	Analog Input	Channel A negative input
8	INA+	Analog Input	Channel A positive input
9	INB-	Analog Input	Channel B negative input
10	INB+	Analog Input	Channel B positive input
11	PD_SCK	Digital Input	Power down control (high active) and serial clock input
12	DOUT	Digital Output	Serial data output
13	XO	Digital I/O	Crystal I/O (NC when not used)
14	XI	Digital Input	Crystal I/O or external clock input, 0: use on-chip oscillator
15	RATE	Digital Input	Output data rate control, 0: 10Hz, 1: 80Hz
16	DVDD	Power	Digital supply: 2.6 ~ 5.5V

**Table 1 Pin Description**

## KEY ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Parameter	Notes	MIN	TYP	MAX	UNIT
Full scale differential input range	V(inp)-V(inn)	$\pm 0.5(AVDD/GAIN)$			V
Common mode input		AGND+1.2		AVDD-1.3	V
Output data rate	Internal Oscillator, RATE = 0	10			Hz
	Internal Oscillator, RATE = DVDD	80			
	Crystal or external clock, RATE = 0	$f_{clk}/1,105,920$			
	Crystal or external clock, RATE = DVDD	$f_{clk}/138,240$			
Output data coding	2's complement	800000		7FFFFFFF	HEX
Output settling time <sup>(1)</sup>	RATE = 0	400			ms
	RATE = DVDD	50			
Input offset drift	Gain = 128	0.2			mV
	Gain = 64	0.4			
Input noise	Gain = 128, RATE = 0	50			nV(rms)
	Gain = 128, RATE = DVDD	90			
Temperature drift	Input offset (Gain = 128)	$\pm 6$			nV/°C
	Gain (Gain = 128)	$\pm 5$			ppm/°C
Input common mode rejection	Gain = 128, RATE = 0	100			dB
Power supply rejection	Gain = 128, RATE = 0	100			dB
Reference bypass (V <sub>BG</sub> )		1.25			V
Crystal or external clock frequency		1	11.0592	20	MHz
Power supply voltage	DVDD	2.6			V
	AVDD, VSUP	2.6			
Analog supply current (including regulator)	Normal	1400			$\mu$ A
	Power down	0.3			
Digital supply current	Normal	100			$\mu$ A
	Power down	0.2			

(1) Settling time refers to the time from power up, reset, input channel change and gain change to valid stable output data.

Table 2 Key Electrical Characteristics



### Analog Inputs

Channel A differential input is designed to interface directly with a bridge sensor's differential output. It can be programmed with a gain of 128 or 64. The large gains are needed to accommodate the small output signal from the sensor. When 5V supply is used at the AVDD pin, these gains correspond to a full-scale differential input voltage of  $\pm 20\text{mV}$  or  $\pm 40\text{mV}$  respectively.

Channel B differential input has a fixed gain of 32. The full-scale input voltage range is  $\pm 80\text{mV}$ , when 5V supply is used at the AVDD pin.

### Power Supply Options

Digital power supply (DVDD) should be the same power supply as the MCU power supply.

When using internal analog supply regulator, the dropout voltage of the regulator depends on the external transistor used. The output voltage is equal to  $V_{AVDD} = V_{BG} * (R1+R2) / R1$  (Fig. 1). This voltage should be designed with a minimum of 100mV below VSUP voltage.

If the on-chip analog supply regulator is not used, the VSUP pin should be connected to either AVDD or DVDD, depending on which voltage is higher. Pin VFB should be connected to Ground and pin BASE becomes NC. The external 0.1uF bypass capacitor shown on Fig. 1 at the VBG output pin is then not needed.

### Clock Source Options

By connecting pin XI to Ground, the on-chip oscillator is activated. The nominal output data rate when using the internal oscillator is 10 (RATE=0) or 80SPS (RATE=1).

If accurate output data rate is needed, crystal or external reference clock can be used. A crystal can be directly connected across XI and XO pins. An external clock can be connected to XI pin, through a 20pF ac coupled capacitor. This external clock is not required to be a square wave. It can come directly from the crystal output pin of the MCU chip, with amplitude as low as 150 mV.

When using a crystal or an external clock, the internal oscillator is automatically powered down.

### Output Data Rate and Format

When using the on-chip oscillator, output data rate is typically 10 (RATE=0) or 80SPS (RATE=1).

When using external clock or crystal, output data rate is directly proportional to the clock or crystal frequency. Using 11.0592MHz clock or crystal results in an accurate 10 (RATE=0) or 80SPS (RATE=1) output data rate.

The output 24 bits of data is in 2's complement format. When input differential signal goes out of the 24 bit range, the output data will be saturated at 800000h (MIN) or 7FFFFFFh (MAX), until the input signal comes back to the input range.

### Serial Interface

Pin PD\_SCK and DOUT are used for data retrieval, input selection, gain selection and power down controls.

When output data is not ready for retrieval, digital output pin DOUT is high. Serial clock input PD\_SCK should be low. When DOUT goes to low, it indicates data is ready for retrieval. By applying 25~27 positive clock pulses at the PD\_SCK pin, data is shifted out from the DOUT output pin. Each PD\_SCK pulse shifts out one bit, starting with the MSB bit first, until all 24 bits are shifted out. The 25<sup>th</sup> pulse at PD\_SCK input will pull DOUT pin back to high (Fig.2).

Input and gain selection is controlled by the number of the input PD\_SCK pulses (Table 3). PD\_SCK clock pulses should not be less than 25 or more than 27 within one conversion period, to avoid causing serial communication error.

PD_SCK Pulses	Input channel	Gain
25	A	128
26	B	32
27	A	64

Table 3 Input Channel and Gain Selection

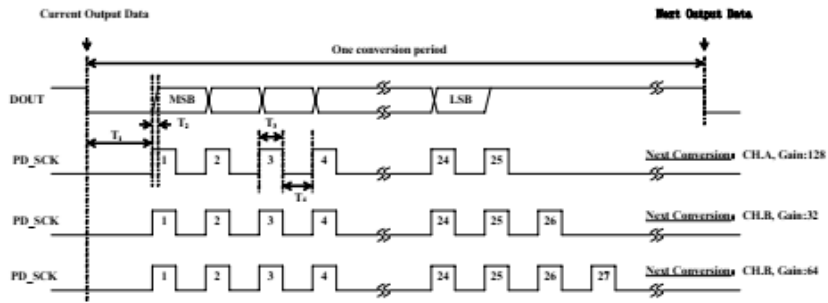


Fig.2 Data output, input and gain selection timing and control

Symbol	Note	MIN	TYP	MAX	Unit
T <sub>1</sub>	DOUT falling edge to PD_SCK rising edge	0.1			μs
T <sub>2</sub>	PD_SCK rising edge to DOUT data ready			0.1	μs
T <sub>3</sub>	PD_SCK high time	0.2	1	50	μs
T <sub>4</sub>	PD_SCK low time	0.2	1		μs

**Reset and Power-Down**

When chip is powered up, on-chip power on rest circuitry will reset the chip.

Pin PD\_SCK input is used to power down the HX711. When PD\_SCK Input is low, chip is in normal working mode.

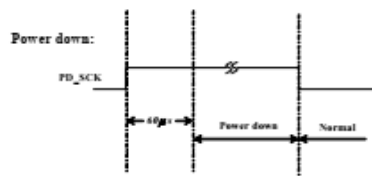


Fig.3 Power down control

When PD\_SCK pin changes from low to high and stays at high for longer than 60μs, HX711 enters power down mode (Fig.3). When internal regulator is used for HX711 and the external transducer, both HX711 and the transducer will be

powered down. When PD\_SCK returns to low, chip will reset and enter normal operation mode.

After a reset or power-down event, input selection is default to Channel A with a gain of 128.

**Application Example**

Fig.1 is a typical weigh scale application using HX711. It uses on-chip oscillator (XI=0), 10Hz output data rate (RATE=0). A Single power supply (2.7~5.5V) comes directly from MCU power supply. Channel B can be used for battery level detection. The related circuitry is not shown on Fig. 1.

Reference PCB Board (Single Layer)

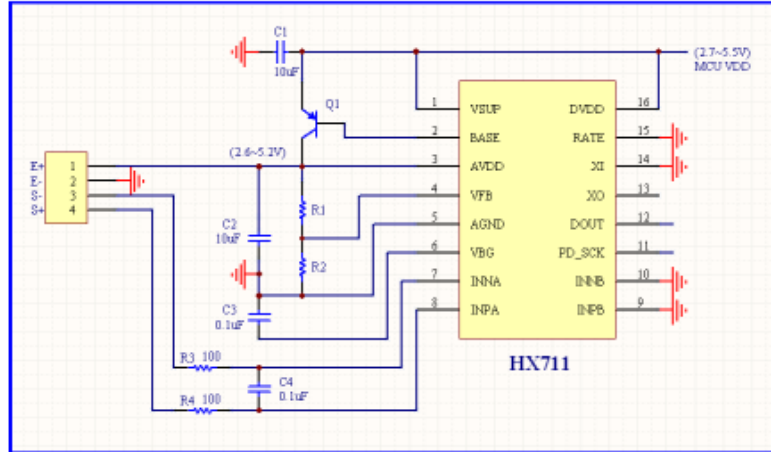


Fig.4 Reference PCB board schematic

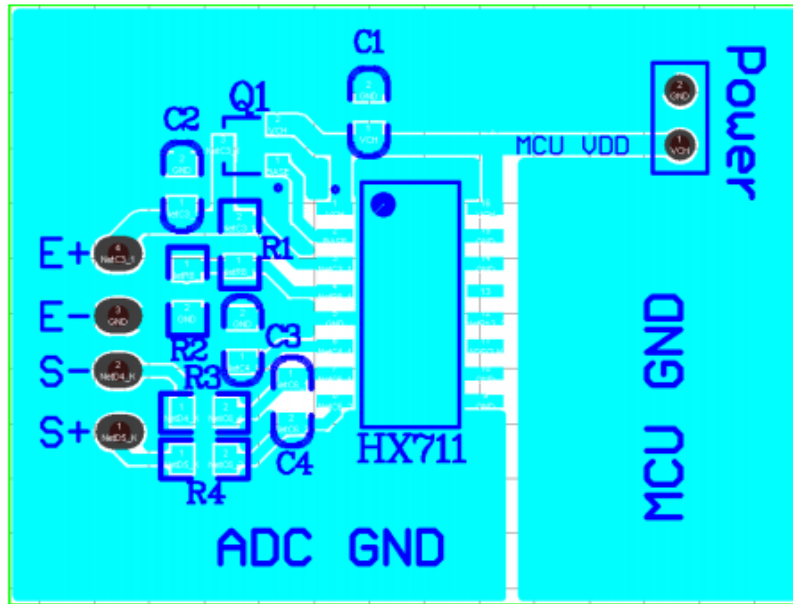


Fig.5 Reference PCB board layout

**Reference Driver (Assembly)**

```

/*-----
Call from ASM:      LCALL  ReaAD
Call from C:      extern unsigned long ReadAD(void);
                  .
                  unsigned long data;
                  data=ReadAD();
                  .
                  .
-----*/

PUBLIC      ReadAD
HX711ROM    segment code
rseg       HX711ROM

sbit       ADDO = P1.5;
sbit       ADSK = P0.0;
/*-----
OUT:      R4, R5, R6, R7  R7=>LSB
-----*/

ReadAD:
  CLR      ADSK          //AD Enable (PD_SCK set low)
  SETB     ADDO          //Enable 51CPU I/O
  JB       ADDO,$        //AD conversion completed?
  MOV      R4,#24

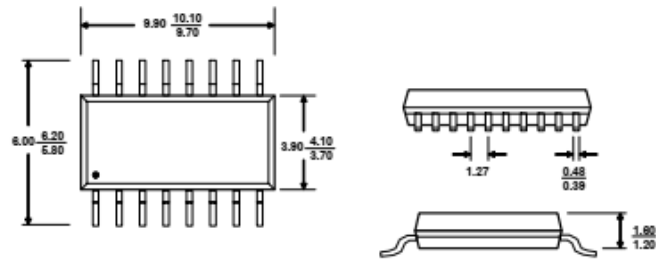
ShiftOut:
  SETB     ADSK          //PD_SCK set high (positive pulse)
  NOP
  CLR      ADSK          //PD_SCK set low
  MOV      C,ADD0        //read on bit
  XCH      A,R7          //move data
  RLC      A
  XCH      A,R7
  XCH      A,R6
  RLC      A
  XCH      A,R6
  XCH      A,R5
  RLC      A
  XCH      A,R5
  DJNZ    R4,ShiftOut    //moved 24BIT?
  SETB     ADSK
  NOP
  CLR      ADSK
  RET
END

```

**Reference Driver (C)**

```
//-----  
sbit ADD0 = P1^5;  
sbit ADSK = P0^0;  
unsigned long ReadCount(void){  
    unsigned long Count;  
    unsigned char i;  
    ADD0=1;  
    ADSK=0;  
    Count=0;  
    while(ADD0);  
    for (i=0;i<24;i++){  
        ADSK=1;  
        Count=Count<<1;  
        ADSK=0;  
        if(ADD0) Count++;  
    }  
    ADSK=1;  
    Count=Count^0x800000;  
    ADSK=0;  
    return(Count);  
}
```

### Package Dimensions



Typ  $\frac{\text{MAX}}{\text{MIN}}$  Unit: mm

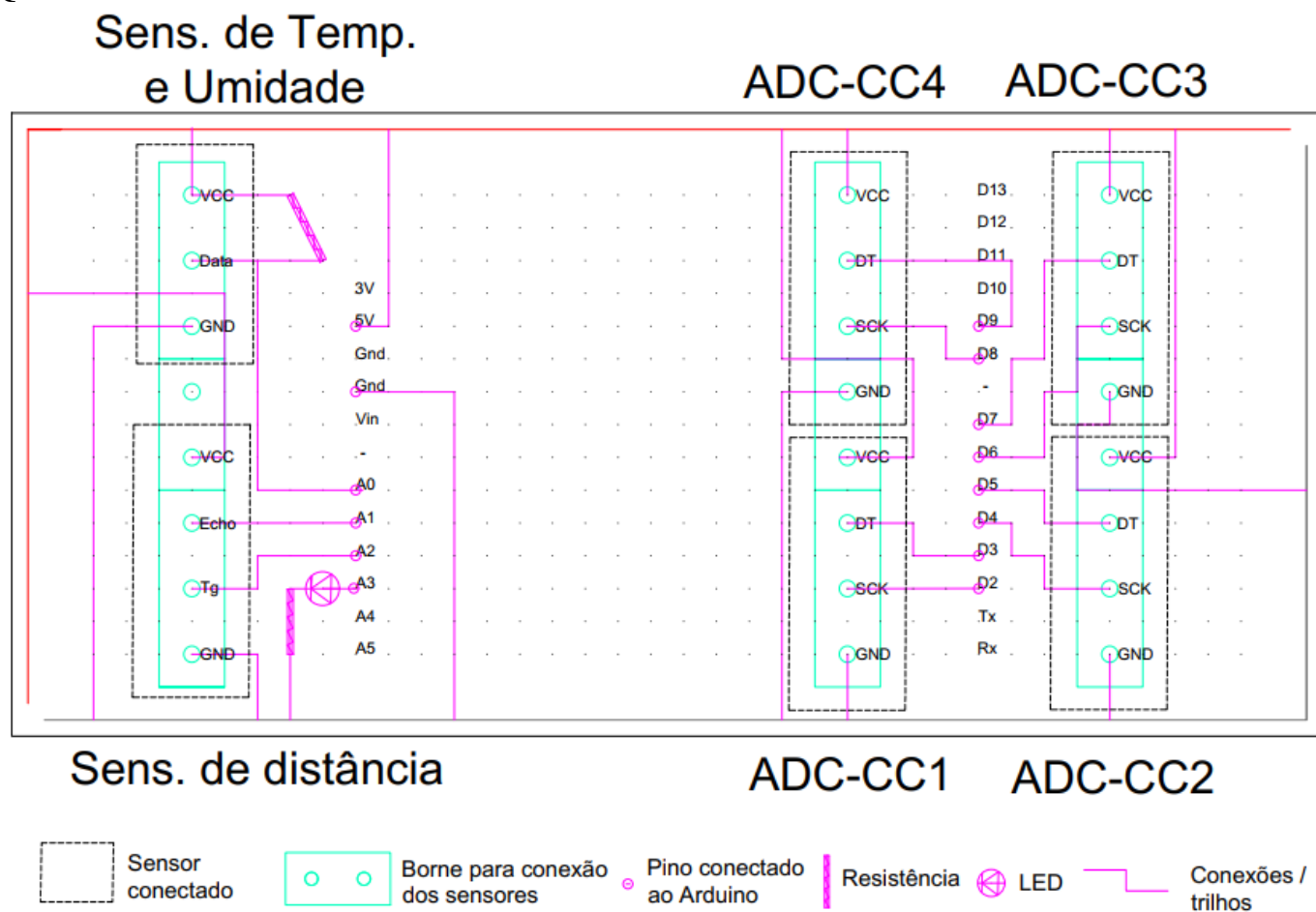
SOP-16L Package

**APÊNDICE A - SÉRIE DE RESISTÊNCIAS DO DIVISOR DE TENSÕES  
UTILIZADO NA CALIBRAÇÃO ELETRÔNICA**

<b>Resistência R1 (k<math>\Omega</math>)</b>	<b>Resistência R2 (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Tensão de saída (mV)</b>
20	12	3.09
20	15	3.86
20	18	4.63
20	20	5.14
20	22	5.66
20	33	8.48
40	12	1.54
40	15	1.93
40	18	2.32
40	20	2.57
40	22	2.83
40	33	4.25
40	47	6.04
60	12	1.03
60	15	1.29
60	18	1.54
60	20	1.72
60	22	1.89
60	33	2.83
60	47	4.03
60	59	5.06

Fonte: elaborada pelo autor

## APÊNDICE B – ESQUEMATICO DA PLACA DE FENOLITE COM TRILHOS PARA CONEXÃO DOS SENSORES AO ARDUINO



Fonte: elaborado pelo autor

Onde: Sens. de Temp. e Umidade = Sensor de temperatura e umidade; Sens. de distância = Sensor de distância;  
ADC-CC = Conversor Analógico Digital – Célula de Carga.



## APÊNDICE C – PROGRAMAÇÃO UTILIZADA NO ARDUINO PARA O LISÍMETRO DESENVOLVIDO

```

1  #include "RTCLib.h"
2  #include <SD.h>
3  #include "HX711.h"
4
5  int Pino_CS = 10;
6  int controle_min;
7  const int GAIN = 128;
8
9  DateTime now;
10
11 long duracao;
12 float dist;
13
14 String dataString = "";
15 String checkhora = "";
16
17 RTC_DS1307 rtc;
18 File file;
19
20 HX711 LC1;
21 HX711 LC2;
22 HX711 LC3;
23 HX711 LC4;
24
25 void setup() {
26
27   pinMode(A3, OUTPUT);
28
29   Serial.begin(19200);
30
31   Serial.println("Teste modulo Data logger");
32   Serial.println();
33   //Inicia o cartao SD
34   Serial.println("Iniciando cartao SD...");
35   if (!SD.begin(Pino_CS))
36   {
37     Serial.println("Falha na inicializacao do SD!");
38     return;
39   }
40   Serial.println("Cartao SD iniciado. OK");
41   Serial.println();
42
43   if (!rtc.begin())
44   {
45     Serial.println("RTC nao encontrado!");
46     while (1);
47   }
48   if (!rtc.isrunning())
49   {
50     Serial.println("RTC nao operante!");

```

```

51 //A linha abaixo ajusta o RTC com a data e hora do momento da compilacao
52 rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
53 //A linha abaixo permite ajustar manualmente a data e hora do RTC
54 //Formato: DateTime(ano, mes, dia, hora, minuto, segundo)
55 //rtc.adjust(DateTime(2014, 1, 21, 3, 0, 0));
56 }
57
58 Serial.println("Criando CMP29JUL.txt...");
59 file = SD.open("CMP29JUL.txt", FILE_WRITE);
60 file.close();
61
62 if (SD.exists("CMP29JUL.txt")) {
63     Serial.println("CMP29JUL.txt exists.");
64 } else {
65     Serial.println("CMP29JUL.txt doesn't exist.");
66 }
67
68 Serial.println("Teste HX711");
69 Serial.println("Iniciando a balanca");
70 Serial.print("Amplificacao ");
71 Serial.print(GAIN);
72 Serial.print(" ");
73
74 LC1.begin(3, 2); //inicia objeto LCs
75 LC1.set_gain (GAIN);
76
77 LC2.begin(5, 4);
78 LC2.set_gain (GAIN);
79
80 LC3.begin(7, 6);
81 LC3.set_gain (GAIN);
82
83 LC4.begin(9, 8);
84 LC4.set_gain (GAIN);
85
86 pinMode(16, OUTPUT); // Configura o pino trigger
87 pinMode(15, INPUT); // Configura o pino eco
88 Serial.println("Sensor de Distancia Iniciado");
89 Serial.println("");
90
91 }
92
93 void loop() {
94
95     DateTime now = rtc.now(); //verifica horário do RTC
96
97     controle_min = now.minute() % 5;
98     if (controle_min == 0) {
99
100         dataString = "";
101         delay(1000);
102
103         //leitura1 - Sensor_distancia
104         digitalWrite(16, LOW); // Limpa o trigger
105         delayMicroseconds(5);
106         digitalWrite(16, HIGH); // Configurar o trigger para nível alto(emissão de sinais)

```

```

107 delayMicroseconds(10); // tempo para envio do sinal
108 digitalWrite(16, LOW); // cessar envio dos sinais
109 duracao = pulseIn(15, HIGH); // Inicia contagem de tempo e lê o pino de eco
110 dist = duracao * 0.034 / 2;
111 delay(2000);
112
113   dataString += String(now.year());
114   dataString += String("/");
115   dataString += String(now.month());
116   dataString += String("/");
117   dataString += String(now.day());
118   dataString += String(" ");
119   dataString += String(now.hour());
120   dataString += String(":");
121   dataString += String(now.minute());
122   dataString += String(":");
123   dataString += String(now.second());
124   dataString += String(";");
125   delay(500);
126
127 dataString += String(LC1.read_average(10));
128   dataString += String(";");
129
130   delay(500);
131 dataString += String(LC2.read_average(10));
132   dataString += String(";");
133
134   delay(500);
135 dataString += String(LC3.read_average(10));
136   dataString += String(";");
137
138   delay(500);
139 dataString += String(LC4.read_average(10));
140   dataString += String(";");
141
142   delay(500);
143
144
145   if (dist >= 400 || dist <= 2) {
146     dataString += String("ERRO"); //alcance de 2cm a 4m
147   }
148   else {
149     dataString += String(dist);
150     dataString += String(";");
151   }
152
153 delay(3000);
154
155   if (SD.exists("CMP29JUL.txt")) {
156 //led indicativo inicio da gravacao
157     digitalWrite(A3, HIGH);
158     delay(1000);
159     digitalWrite(A3, LOW);
160     delay(1000);
161     digitalWrite(A3, HIGH);
162     delay(1000);

```

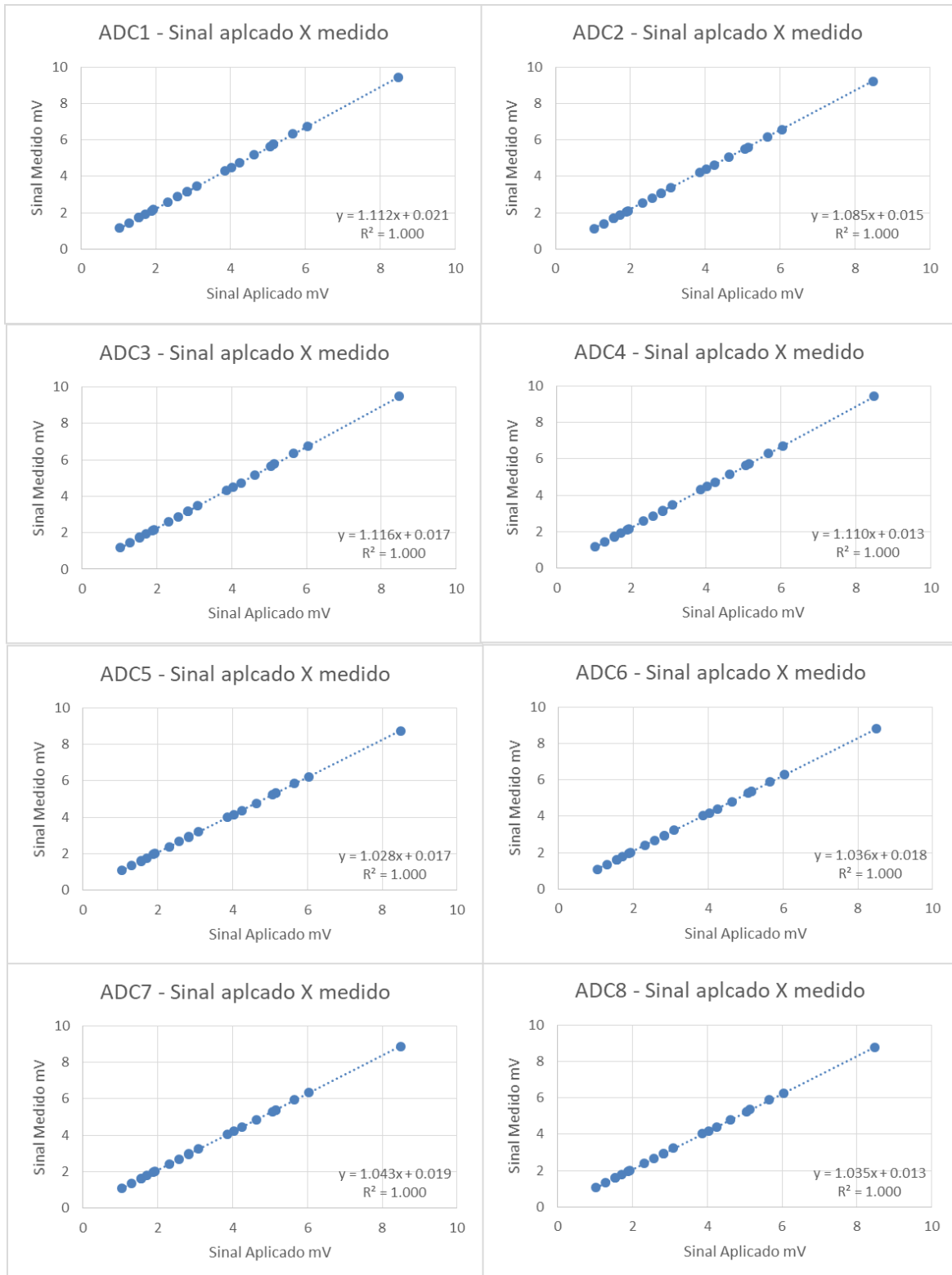
```

163     digitalWrite(A3, LOW);
164     delay(1000);
165     digitalWrite(A3, HIGH);
166     delay(1000);
167     digitalWrite(A3, LOW);
168     delay(1000);
169
170     //Gravacao do cartao
171     //Abre arquivo no SD para gravacao
172     File file = SD.open("CMP29JUL.txt", FILE_WRITE);
173     //Grava os dados no cartao SD
174     file.println(dataString);
175     file.close();
176     delay(1000);
177
178     //led indicativo final da gravacao
179     digitalWrite(A3, HIGH);
180     delay(2000);
181     digitalWrite(A3, LOW);
182     delay(2000);
183     digitalWrite(A3, HIGH);
184     delay(2000);
185     digitalWrite(A3, LOW);
186     delay(2000);
187     digitalWrite(A3, HIGH);
188     delay(2000);
189     digitalWrite(A3, LOW);
190     delay(2000);
191 }
192
193     delay(25000);
194
195 }
196
197     delay(1000);
198
199
200     if (Serial.available()) {
201     char temp = Serial.read();
202     //baixar dados do cartão SD
203     if ( temp == 'd') {
204     Serial.println ("* SD *");
205     Serial.println (" ");
206     File file = SD.open("CMP29JUL.txt");
207     if (file) {
208     while (file.available()) {
209     Serial.write(file.read());
210     }
211     file.close();
212     Serial.println ("");
213     }
214     }
215     //verificação da ultima gravação
216     else if ( temp == 'u'){
217     Serial.println (" ");
218     Serial.print ("ult gravacao ");

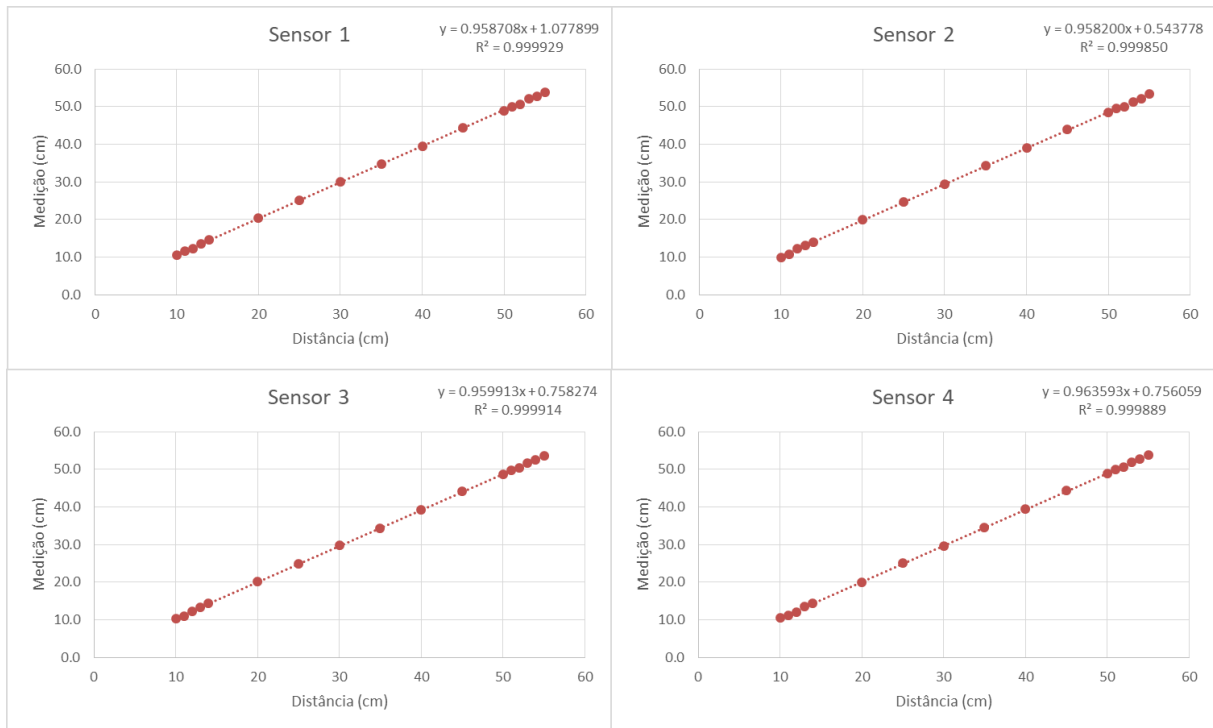
```

```
219     Serial.println (dataString);
220     Serial.println (" ");
221 }
222
223 //verificação do horario do RTC
224 else if ( temp == 't'){
225     DateTime now = rtc.now();
226     checkhora = String(now.year());
227     checkhora += String("/");
228     checkhora += String(now.month());
229     checkhora += String("/");
230     checkhora += String(now.day());
231     checkhora += String(" ");
232     checkhora += String(now.hour());
233     checkhora += String(":");
234     checkhora += String(now.minute());
235     checkhora += String(":");
236     checkhora += String(now.second());
237     Serial.println ("horario RTC ");
238     Serial.println (checkhora);
239 }
240 }
241 delay(2000);
242
243 }
```

## APÊNDICE D – CURVAS DE CALIBRAÇÃO ELETRÔNICA



Fonte: elaborado pelo autor

**APÊNDICE E – CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE DISTÂNCIA**

Fonte: elaborado pelo autor

**APÊNDICE F – RESULTADOS DO PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DOS  
SENSORES DE DISTÂNCIA E MÉTRICAS APÓS CORREÇÃO UTILIZANDO  
AS CURVAS DE CALIBRAÇÃO**

Distância (cm)	Distância Medida (cm)				Distância Medida Corrigida (cm)			
	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
55.0	53.8	53.3	53.6	53.8	55.0	55.1	55.0	55.1
54.0	52.8	52.1	52.5	52.8	53.9	53.8	53.9	54.0
53.0	52.0	51.3	51.7	51.9	53.1	52.9	53.1	53.1
52.0	50.6	50.0	50.4	50.6	51.6	51.6	51.7	51.7
51.0	50.0	49.5	49.7	49.8	51.0	51.1	51.0	51.0
50.0	48.9	48.3	48.6	48.9	49.9	49.9	49.9	50.0
45.0	44.4	44.0	44.2	44.4	45.2	45.4	45.2	45.3
40.0	39.5	39.0	39.2	39.4	40.0	40.2	40.0	40.1
35.0	34.7	34.2	34.3	34.5	35.1	35.1	34.9	35.0
30.0	29.9	29.3	29.7	29.5	30.1	30.0	30.2	29.9
25.0	25.1	24.6	24.9	25.1	25.1	25.2	25.1	25.2
20.0	20.4	20.0	20.1	19.9	20.1	20.3	20.1	19.9
14.0	14.5	13.9	14.3	14.5	14.0	13.9	14.1	14.3
13.0	13.5	13.1	13.2	13.5	12.9	13.1	13.0	13.2
12.0	12.3	12.2	12.3	12.0	11.7	12.1	12.0	11.7
11.0	11.6	10.8	10.9	11.1	11.0	10.7	10.6	10.7
10.0	10.6	9.8	10.3	10.5	10.0	9.7	10.0	10.1
<b>EMA</b>	1.1	2.0	1.6	1.4	0.4	0.4	0.4	0.3
<b>RMSE</b>	0.8	1.1	0.92	0.8	0.1	0.2	0.2	0.2
<b>R<sup>2</sup></b>	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999

Fonte: elaborada pelo autor



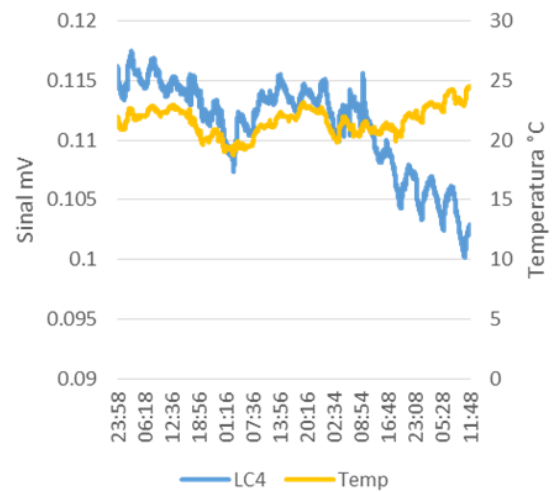
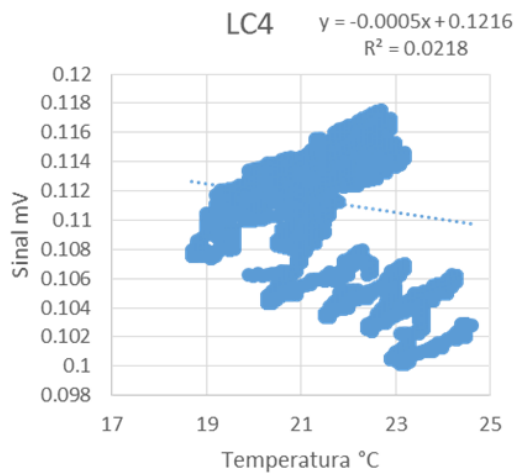
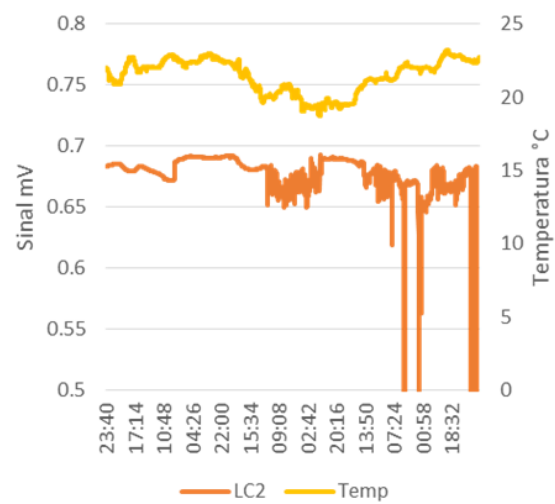
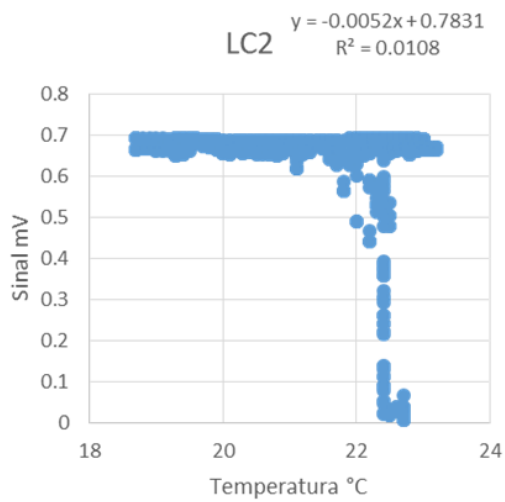
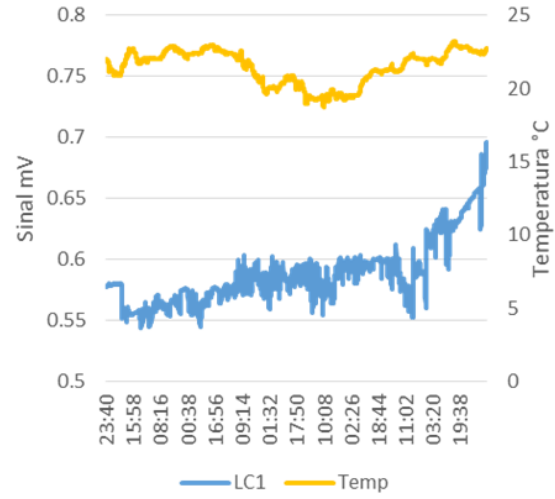
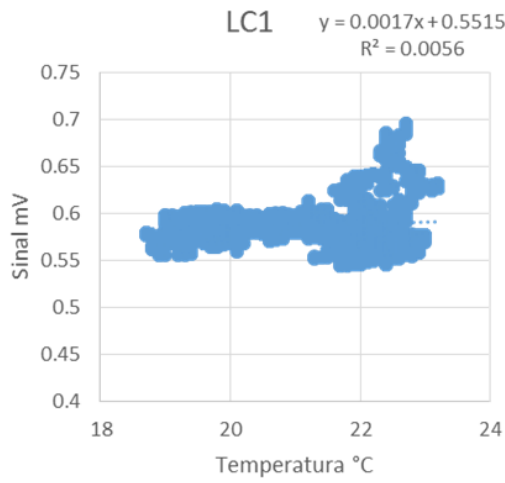
**APÊNDICE G – RESULTADOS DO TESTE DE REPETITIVIDADE EM  
AMBIENTE PROTEGIDO**

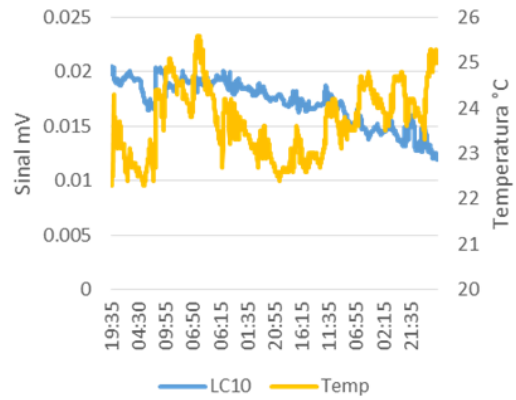
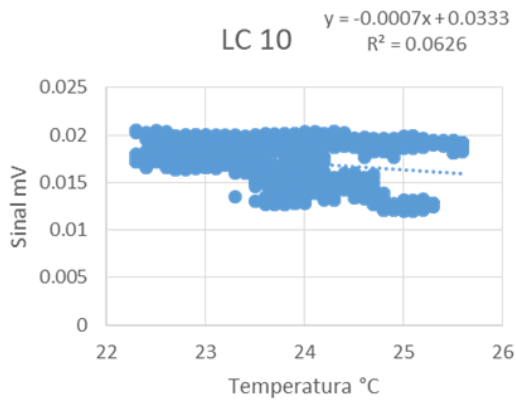
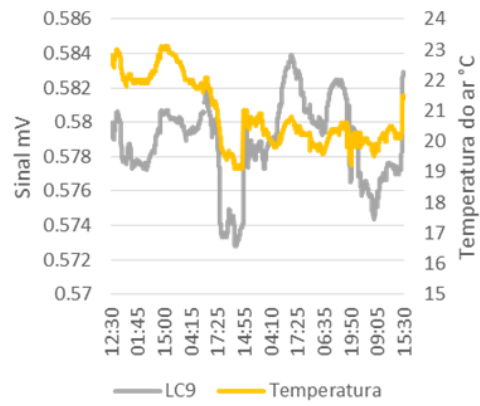
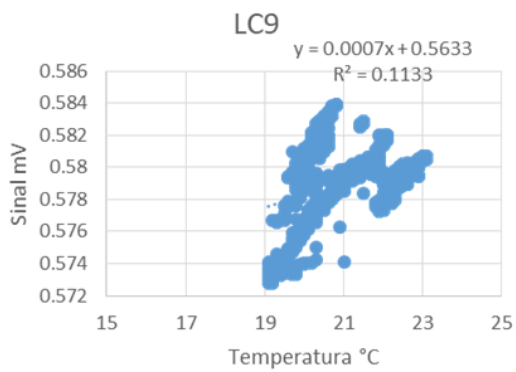
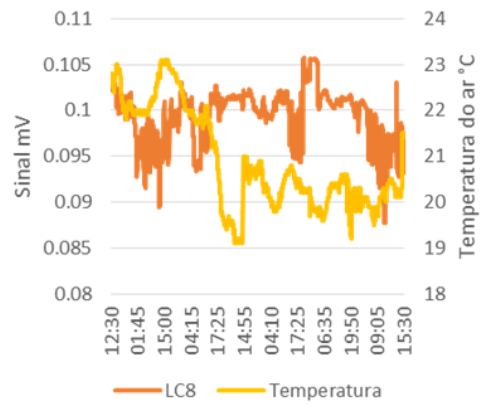
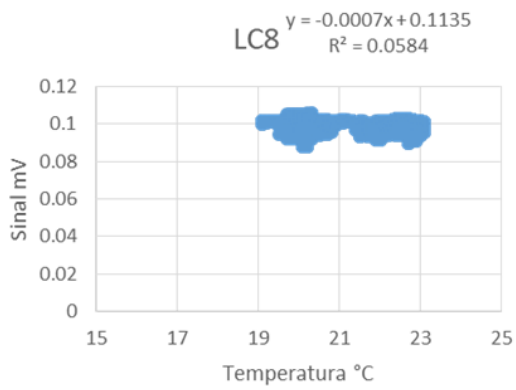
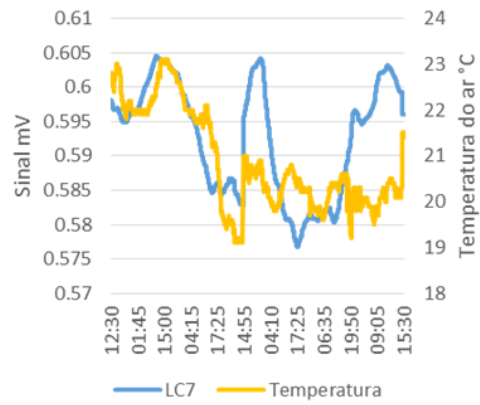
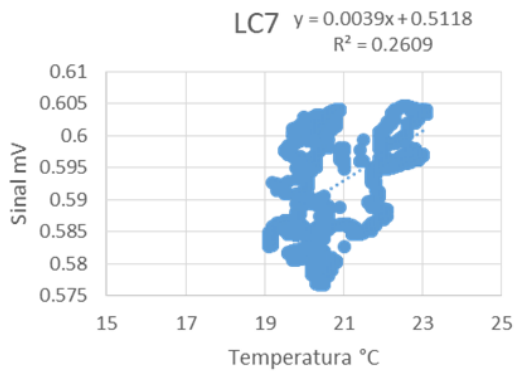
<b>Componente</b>	<b>Medição da temperatura</b>	<b>Tempo (dias)</b>	<b>Méd.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Ampl.</b>	<b>Erro Repet.</b>
LC1	Sim	7	0.578	0.604	0.544	0.060	0.026
LC2	Sim	7	0.682	0.693	0.649	0.043	0.017
LC3	Sim	7	0.326	0.333	0.308	0.026	0.012
LC1	Não	7	0.939	0.970	0.873	0.098	0.054
LC2	Não	7	0.890	0.913	0.845	0.068	0.030
LC3	Não	7	0.335	0.338	0.331	0.008	0.003
LC4	Sim	14	0.111	0.117	0.100	0.017	0.008
LC5	Sim	14	0.334	0.337	0.330	0.007	0.003
LC6	Sim	14	0.333	0.342	0.319	0.023	0.010
LC7	Sim	7	0.593	0.605	0.577	0.028	0.017
LC8	Sim	7	0.099	0.106	0.088	0.018	0.006
LC9	Sim	7	0.579	0.584	0.573	0.011	0.005
LC7	Não	7	0.600	0.614	0.584	0.030	0.016
LC8	Não	7	0.107	0.112	0.103	0.009	0.004
LC9	Não	7	0.578	0.588	0.562	0.026	0.017
LC10	Sim	7	0.021	0.024	0.019	0.005	0.002
LC11	Sim	7	0.299	0.302	0.293	0.009	0.004
LC12	Sim	7	0.274	0.276	0.272	0.004	0.002
LC10	Sim	13	0.017	0.020	0.012	0.009	0.005
LC11	Sim	13	0.293	0.297	0.285	0.012	0.015
LC12	Sim	13	0.275	0.277	0.271	0.275	0.013
Lisímetro com LCs 3,5,6 e 11	Sim	12	2.149	2.155	2.145	0.010	0.005
Sensor de distância	Não	6	12.20	12.61	12.10	0.51	0.12

Fonte: elaborada pelo autor

Nota: Unidades em mV, exceto sensor de distância cuja unidade é apresentada em cm. LC 1 a 12 referem-se às células de carga 1 a 12. Méd, Máx, Mín, Ampl. e Erro Repet. referem-se aos valores médios, máximos, mínimos, amplitude e erros de repetitividade

## APÊNDICE H – CURVAS DAS CÉLULAS DE CARGA REPROVADAS NO TESTE DE REPETITIVIDADE





Fonte: elaborado pelo autor

**APÊNDICE I – VALORES DIÁRIOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO  
QUANTIFICADA, ESTIMADA E DE PRECIPITAÇÃO OU REGA DURANTE O  
PERÍODO DE MONITORAMENTO**

<b>DATA</b>	<b>ET Método 01 mm</b>	<b>ET Método 02 mm</b>	<b>ET Método 03 mm</b>	<b>ETp FAO PM mm</b>	<b>Precipitação/rega diária mm</b>
17/03/23	-	-	-	-	0.69
18/03/23	4.57	4.86	4.62	4.34	0.00
19/03/23	4.35	4.59	4.40	4.40	0.00
20/03/23	4.92	5.07	4.97	4.25	0.00
21/03/23	3.85	4.11	3.89	3.85	0.00
22/03/23	-	-	-	-	8.92
23/03/23	-	-	-	-	29.57
24/03/23	4.24	4.15	4.28	3.39	0.23
25/03/23	-	-	-	-	<b>21.43</b>
26/03/23	-	-	-	-	<b>14.29</b>
27/03/23	4.77	5.11	4.79	4.41	0.00
28/03/23	2.60	3.19	2.62	3.17	0.23
29/03/23	-	-	-	-	4.80
30/03/23	3.94	4.13	3.98	4.02	0.00
31/03/23	3.30	3.53	3.33	3.51	0.00
01/04/23	3.65	4.50	3.69	3.99	0.00
02/04/23	2.97	3.54	3.00	3.83	0.00
03/04/23	3.12	3.45	3.15	3.81	0.00
04/04/23	3.33	3.58	3.36	3.8	0.00
05/04/23	2.07	2.92	2.10	3.31	0.23
06/04/23	-	-	-	-	2.74
07/04/23	-	-	-	-	30.63
08/04/23	-	-	-	-	4.57
09/04/23	2.42	2.46	2.44	2.05	0.23
10/04/23	-	-	-	-	2.97
11/04/23	3.59	3.76	3.63	3.9	0.00
12/04/23	2.92	3.22	2.94	3.71	0.00
13/04/23	3.06	3.78	3.10	3.59	0.00
14/04/23	-	-	-	-	40.00
15/04/23	-	-	-	-	2.40
16/04/23	1.77	1.92	1.79	2.13	0.40
17/04/23	-	-	-	-	11.40
18/04/23	-	-	-	-	7.40
19/04/23	3.96	4.19	3.99	3.35	0.00
20/04/23	2.37	2.90	2.40	3.19	0.00
21/04/23	0.88	1.19	0.89	1.73	0.00
22/04/23	1.82	2.53	1.84	2.89	0.40

DATA	ET Método 01 mm	ET Método 02 mm	ET Método 03 mm	ETp FAO PM mm	Precipitação/rega diária mm
23/04/23	-	-	-	-	11.60
24/04/23	-	-	-	-	3.80
25/04/23	2.76	2.73	2.78	2.75	0.20
26/04/23	1.43	1.70	1.44	2.06	0.00
27/04/23	2.31	2.49	2.33	3.09	0.00
28/04/23	2.22	2.56	2.24	3.26	0.00
29/04/23	1.57	1.94	1.59	2.3	0.00
30/04/23	1.84	2.29	1.86	2.51	0.00
01/05/23	2.32	2.79	2.34	3.25	0.00
02/05/23	1.96	2.30	1.98	2.95	0.00
03/05/23	1.00	2.07	1.01	2.3	0.00
04/05/23	-	-	-	-	29.20
05/05/23	1.26	1.66	1.28	1.98	0.00
06/05/23	2.06	2.13	2.07	2.29	0.20
07/05/23	1.77	1.99	1.78	2.34	0.00
08/05/23	1.47	1.72	1.49	2.02	0.00
09/05/23	2.25	2.53	2.27	2.7	0.00
10/05/23	1.84	2.37	1.86	2.72	0.00
11/05/23	2.54	3.10	2.57	3.08	0.00
12/05/23	1.43	2.07	1.43	2.63	0.00
13/05/23	1.33	1.21	1.34	2.68	0.00
14/05/23	1.62	2.09	1.64	2.65	0.00
15/05/23	1.46	2.04	1.48	2.62	0.00
16/05/23	1.93	2.33	1.95	2.71	0.20
17/05/23	1.18	1.69	1.21	2.34	0.00
18/05/23	1.35	1.88	1.36	2.65	0.00
19/05/23	1.60	2.17	1.58	2.71	<b>4.01</b>
20/05/23	1.89	2.18	1.88	2.97	<b>4.14</b>
21/05/23	1.42	1.63	1.40	2.19	<b>4.26</b>
22/05/23	0.68	1.04	0.68	1.49	0.00
23/05/23	1.41	1.97	1.43	2.49	0.00
24/05/23	1.47	2.04	1.49	2.59	0.00
25/05/23	1.33	1.80	1.34	2.35	0.00
26/05/23	1.31	1.65	1.31	2.11	0.00
27/05/23	0.54	1.36	0.54	1.87	0.40
28/05/23	-	-	-	-	11.60
29/05/23	1.29	1.62	1.31	1.75	0.00
30/05/23	0.34	0.86	0.34	1.49	0.40
31/05/23	1.45	1.88	1.46	2.33	0.00
01/06/23	1.22	1.75	1.23	2.37	0.00
02/06/23	1.62	2.02	1.63	2.42	0.20

DATA	ET Método 01 mm	ET Método 02 mm	ET Método 03 mm	ETp FAO PM mm	Precipitação/rega diária mm
03/06/23	1.58	2.00	1.63	2.78	<b>3.65</b>
04/06/23	1.40	1.99	1.41	2.45	0.00
05/06/23	1.46	2.20	1.47	2.36	0.00
06/06/23	1.14	1.50	1.16	2.39	0.00
07/06/23	1.33	1.76	1.34	2.67	0.00
08/06/23	1.46	1.91	1.54	2.44	<b>6.03</b>
09/06/23	1.57	2.00	1.60	2.8	0.00
10/06/23	2.08	2.37	2.10	2.76	0.20
11/06/23	-	-	-	-	7.60
12/06/23	-	-	-	-	18.40
13/06/23	-	-	-	-	5.00
14/06/23	-	-	-	-	28.60
15/06/23	-	-	-	-	69.20
16/06/23	4.37	4.77	4.38	2.99	0.00
17/06/23	3.83	4.02	3.78	2.3	0.00
18/06/23	3.13	3.36	3.14	2.35	0.00
19/06/23	1.46	1.86	1.48	2.09	0.00
20/06/23	1.47	1.89	1.49	2.47	0.00
21/06/23	1.03	1.41	1.05	1.72	0.00
22/06/23	-	-	-	-	1.80
23/06/23	-	-	-	-	9.00

Fonte: elaborado pelo autor

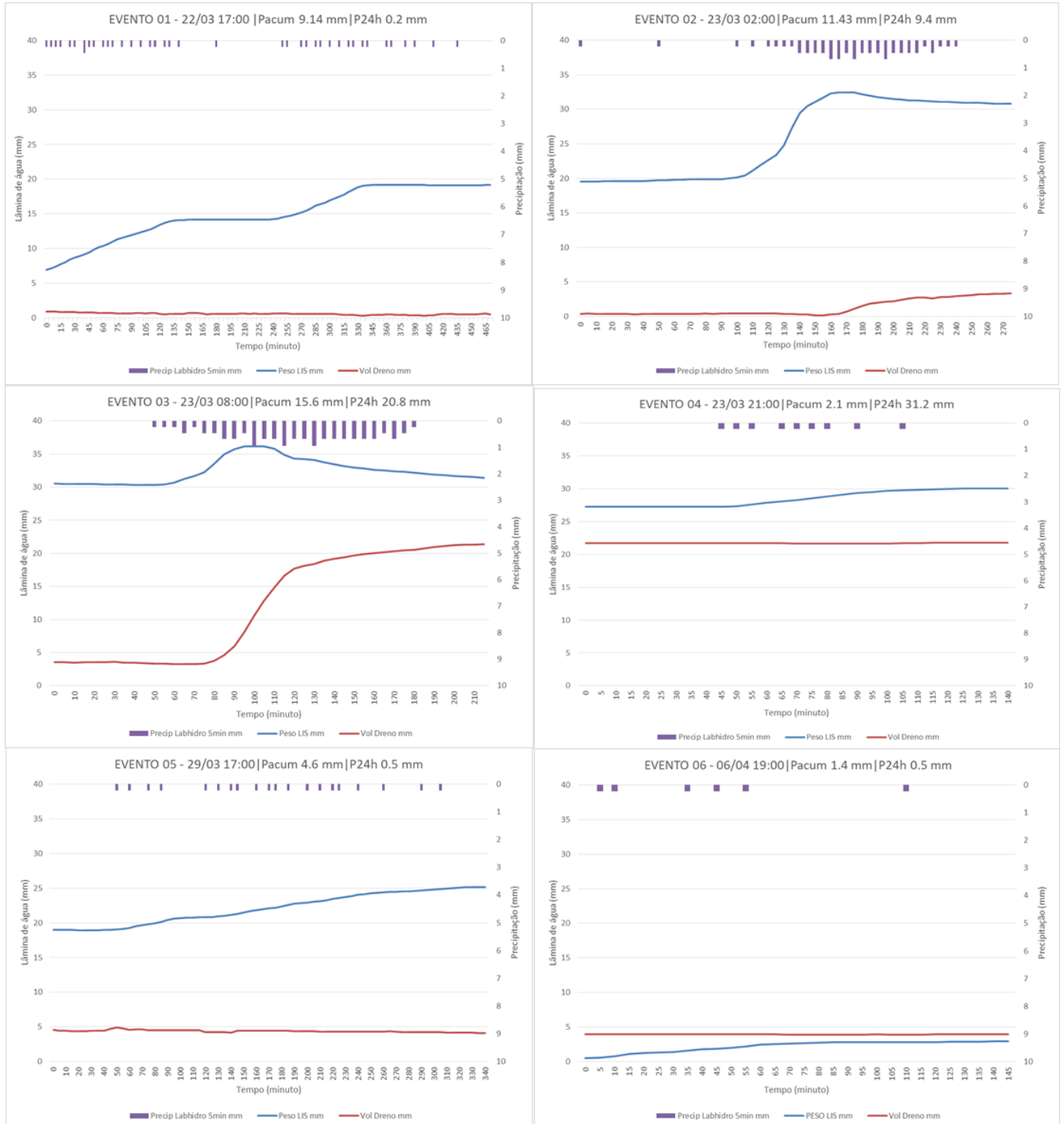
Notas:

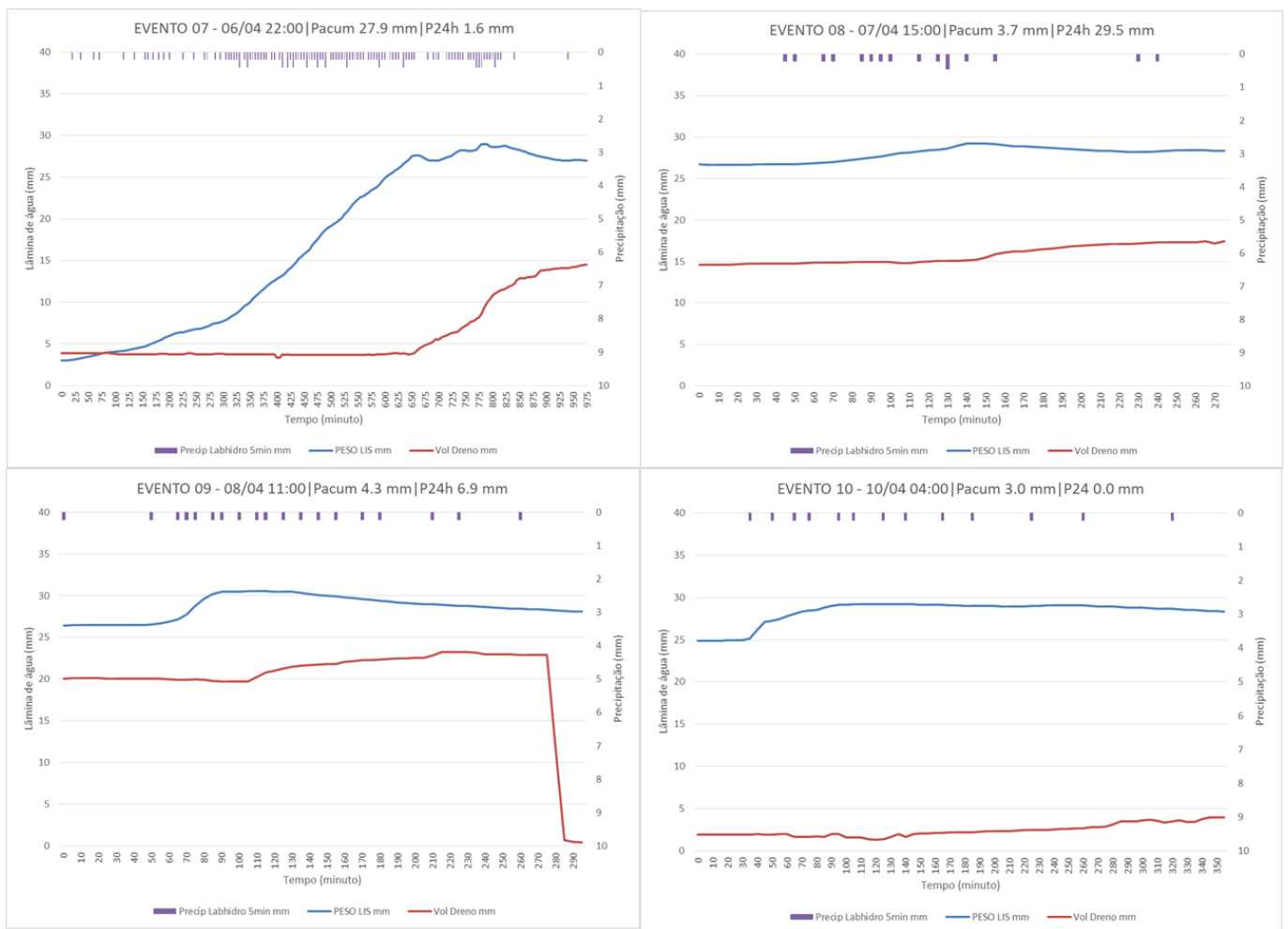
A - Valores de evapotranspiração, precipitação, rega ou acumulados dos últimos dias (precipitação ou rega) estão na unidade de mm;

B - Valores em negrito da coluna Precipitação/rega diária se referem a regas realizadas no lisímetro;

C - Não foi quantificada evapotranspiração nos dias em que houveram precipitação maiores que 0.5 mm ou irrigação em que foram observados escoamento pelo dreno por limitação do lisímetro em monitorar os volumes escoados pelo dreno.

## APÊNDICE J – PESO E ESCOAMENTO PELO DRENO DO MÓDULO DE TELHADO VERDE EM EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO MAIORES QUE 0.5 MM

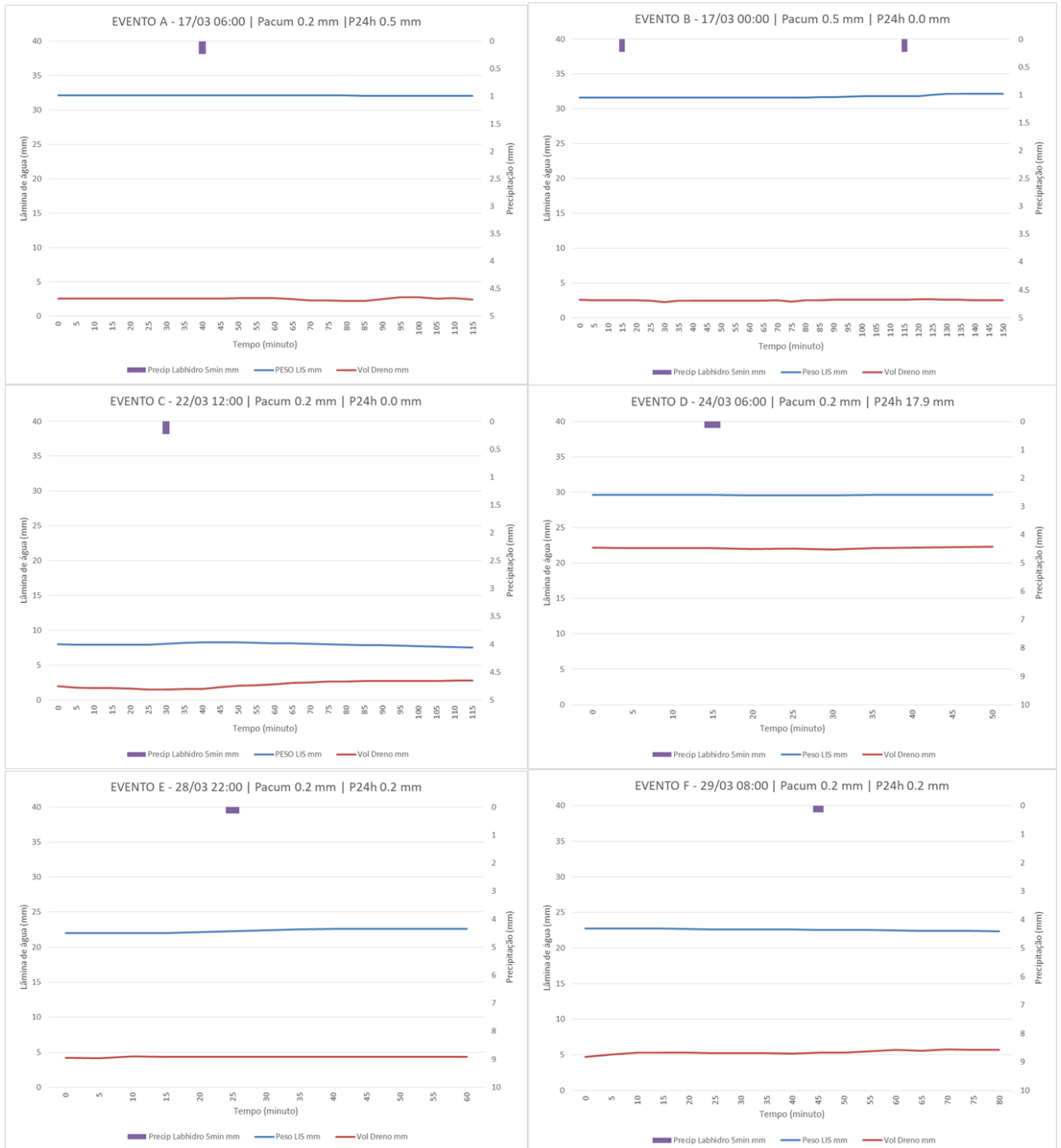


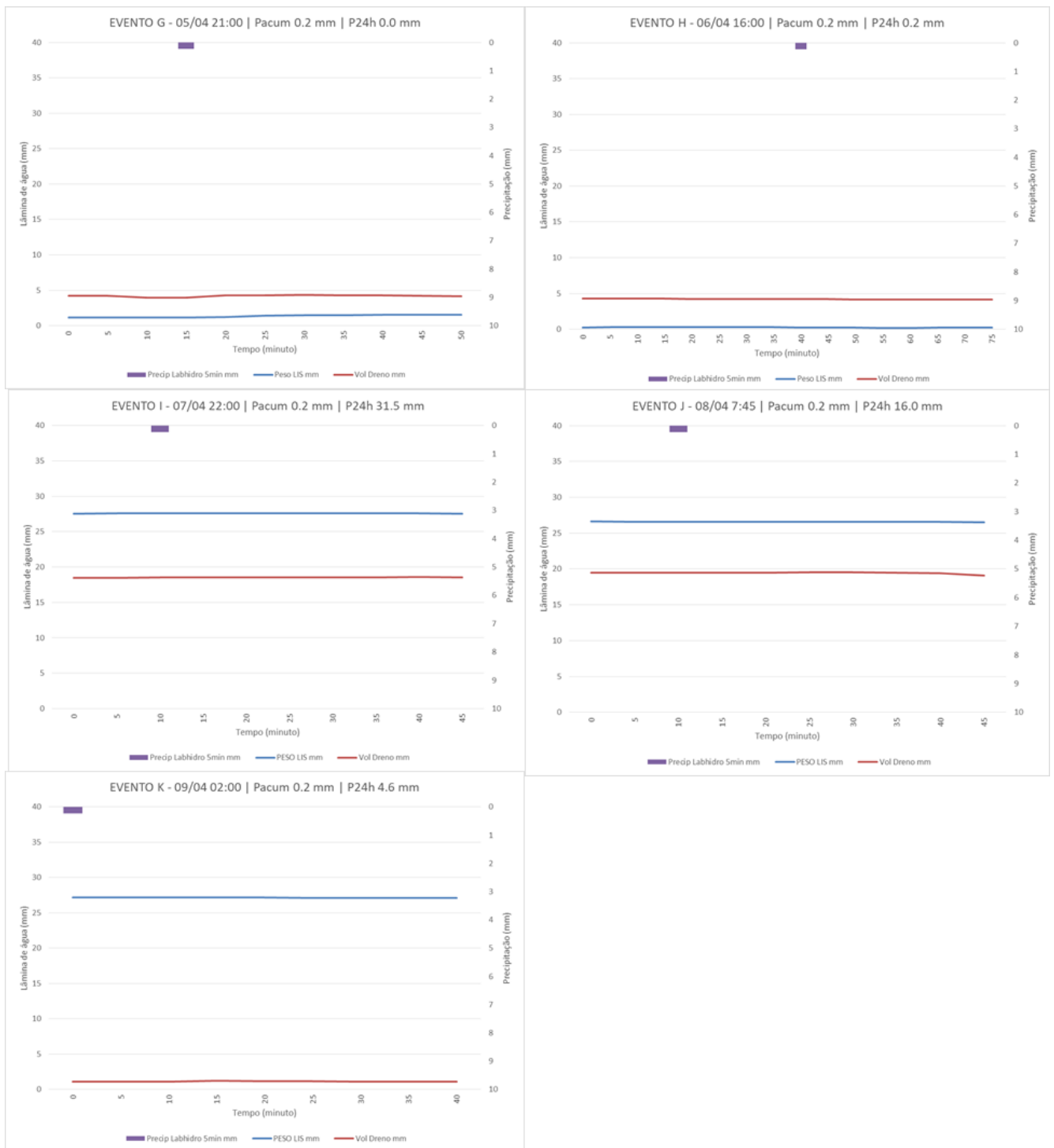


Fonte: elaborado pelo autor



## APÊNDICE K - PESO E ESCOAMENTO PELO DRENO DO MÓDULO DE TELHADO VERDE EM EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO MENORES OU IGUAIS A 0.5 MM





Fonte: elaborado pelo autor

**APÊNDICE L – CUSTO DE MATERIAL UTILIZADO NO LISÍMETRO  
DESENVOLVIDO**

<b>Grupo</b>	<b>Item</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor Unitário (R\$)</b>	<b>Valor Total (R\$)</b>
1	Peças de madeira			201.0
1	Verniz			49.9
1	Peças metálicas (suporte, pregos, parafusos, arruelas, porcas)			229.0
1	Caixas Horti-fruti e abraçadeiras de Nylon			190.0
2	Conexões hidráulicas (mangueira, registros, adaptador caixa d'agua)			65.0
2	Reservatório 50L	1	90.0	90.0
3	Célula de carga CZL635-3135	4	59.5	238.0
3	Conversor Amplificador HX711 24bit com blindagem	4	26.9	107.6
3	Sensor de distancia HC-SR04	1	13.9	13.9
3	Arduino UNO R3	1	99.9	99.9
3	Datalogger shield	1	20.0	20.0
3	Cartao SD 16GB	1	59.9	59.9
3	Carregador celular 5V	1	35.0	35.0
3	Placa universal ilha 5x10 cm	1	8.0	8.0
3	Borne parafusável 2 vias	3	2.4	7.2
3	Borne parafusável 3 vias	6	4.8	28.8
3	Cabo Manga 4 vias 26AWG com blindagem (m)	5	3.9	19.6
3	Fios, jumper 26 AWG , conector macho , solda, LED 5mm, Resistor			30.0
4	Camada de impermeabilização			42.0
4	Camada drenante (placa/forro PVC e argila expandida)			70.0
4	Camada filtrante			30.0
4	Substrato (sacos 40L)	3	63.3	189.9
4	Grama (m²)	1	13.5	13.5
SUBTOTAL Grupo 1 - CAIXA LISIMÉTRICA E ESTRUTURA (R\$)			669.9	
SUBTOTAL Grupo 2 - CONDUÇÃO E ARMAZENAMENTO DO VOLUME DRENADO (R\$)			155.0	
SUBTOTAL Grupo 3 – INSTRUMENTAÇÃO (R\$)			667.9	
SUBTOTAL Grupo 4 - CAMADAS DO TELHADO VERDE (R\$)			345.4	
TOTAL GERAL (R\$)			1838.2	

Fonte: elaborado pelo autor

Nota: Caixa ambiental e sensor de temperatura e umidade AM2302 foram cedidos por laboratórios parceiros ao LAUTEC