

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
CENTRO DE TECNOLOGIA ACADÊMICA

MARINA DE FREITAS

Caracterização de sensores e abrigos meteorológicos de baixo custo

Porto Alegre
2018

MARINA DE FREITAS

Caracterização de sensores e abrigos meteorológicos de baixo custo

Trabalho de conclusão submetido ao Curso de Engenharia Física do Instituto de Física e da Escola de Engenharia da UFRGS, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Física.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Pezzi

Contato: marina.freitas@ufrgs.br

Porto Alegre

2018

Agradecimentos e Reflexões

*“A terra deu, a terra dá, a terra cria
Homem a terra cria, a terra deu, a terra há
A terra voga, a terra dá o que tirar
A terra acaba com toda mal alegria
A terra acaba com inseto que a terra cria
Nascendo em cima da terra, nessa terra há de viver
Vivendo na terra, que essa terra há de comer
Tudo que vive nessa terra, pra essa terra é alimento”*

Agradeço a Terra e seu incessante girar.

As mandiocas, as abelhas, formigas e aos amigos pássaros.

As mulheres que me criaram: Dona Júlia, que deu a luz a uma Maria Antônia, que abençoou o mundo com uma Denise e uma Clarissa. Todas parte de mim, eu parte de todas.

As mulheres da família Borges, que me banharam em seus saberes: Elizete, Margarete, Claudete, Cleide, Mari, Marlete e Ivone.

Ao seu Denizard e seu Rivadávia, que me estenderam o tapete dos pampas e a possibilidade de vivenciar a terra e a vida de gaúcha.

*“Porque no céu a gente vê uma estrelinha
Aquela estrela nasce e se põe às seis horas
Quando é de manhã, aquela estrela vai embora
Tem uma maior e tem outra mais miudinha
Tem uma acesa e outra mais apagadinha
Seis horas da noite é que pega aparecer
Quando é de manhãzinha ela torna a se esconder
Só de noite ela brilha em cima do firmamento”*

A todas as mulheres cientistas, artistas, ciclistas e bruxas que vieram antes de mim e me permitiram estar aqui.

Durante minha formação, agradeço especialmente as professoras Naira Balzaretto e Carolina Britto, que com sua doçura e força me mostram um mundo possível.

Aos professores Gustavo Azevedo, Rafael Pezzi e Cristiano Krug, que me ajudaram de coração ao longo deste caminho.

As turmas 2010, 2011 e 2012 da Engenharia Física. Nós eramos só o que nós tínhamos e sobrevivemos juntas.

Também as todxss amigxs que atravessaram meu caminho.

Aos 10 anos de resistência, ação direta e desobediência civil da Cambada de Teatro em Ação Direta Levanta Favela, e a todas as flores feia que plantaram no asfalto.

*“O homem aplanta um rebolinho de maniva
Aquela maniva com dez dias ta inchada
Começa nascer aquela folha orvalhada
Ali vai se criando aquela obra positiva
Muito esverdeada muito linda e muito viva
Embaixo cria uma batata que engorda e faz crescer
Aquilo dá farinha pra todo mundo comer
E para toda criatura vai servir de alimento”*

A todos os seres vivos dentro de mim. Fungos e mitocôndrias, mas também lobas, felinos, macacos e baleias.

Por fim, agradeço as instituições que tornaram este trabalho possível: O Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul através do Instituto de Física da Escola de Engenharia, do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Centro de Tecnologia Acadêmica.

Para iniciar este trabalho, compartilho a percepção de que a natureza não “foi feita”, logo, o sonho de medi-la, categorizá-la, teorizá-la e explicá-la pode ser nada mais do que um sonho.

No início do livro “Data Reduction and error Analysis for the Physical Sciences”, Philip R. Bevington e D. Keith Robinson trazem uma reflexão que ecoa dentro de mim e me lembra as palavras do professor Altair Pereira, “A natureza está nem aí para ciência”:

"É um fato muito bem estabelecido da investigação científica que o a primeira vez que um experimento é realizado os resultados geralmente pouco lembram os valores "reais" procurados. Ao repetir o experimento, com sucessivos refinamentos da técnica e do método, os resultados gradualmente se aproximam do que pode ser aceito com alguma confiança como uma descrição confiável do evento. As vezes, sentimos que a natureza reluta em entregar seus segredos sem um considerável esforço de nossa parte, e que os primeiros passos da experiência estão fadados a falhar. Qualquer que seja a razão, é certamente verdade que para todos os experimentos físicos, erros e incertezas existem e devem ser reduzidos por meio do aprimoramento de técnicas experimentais e pela repetição de medidas, os erros que permanecerem devem sempre ser estimados para estabelecer a validade dos resultados."

Assim, te convido a ler este relatório como mais um passo em direção a uma compreensão científica da natureza. Apenas mais uma das possíveis, pois há muitos saberes, e muitas interpretações possíveis.

Resumo

Este trabalho teve como objetivo a caracterização do sensor DHT22, assim como a avaliação da influência nas medidas de temperatura e umidade relativa do ar de 4 diferentes modelos de abrigos meteorológicos de baixo custo. Foram testados 3 modelos de abrigo passivo, feitos de polipropileno, garrafa PET e pratos plásticos, e 1 abrigo ativo feito de cano PVC. Além desses, foi caracterizado um abrigo passivo multiprato comercial. A pesquisa adotou a metodologia da ciência aberta, incluindo o uso de *software* livre e *hardware* aberto e livre, de cadernos de laboratório aberto e dados abertos. A caracterização e calibração do sensor DHT22 foi realizada a partir de medidas feitas durante 10 dias em ambiente fechado sem controle da temperatura nem de umidade do ar. A caracterização dos abrigos foi realizada a partir de medidas realizadas durante 17 dias junto à estação meteorológica automática do INMET, em Porto Alegre (RS). O DHT22 se mostrou uma opção confiável para medidas de temperatura, mas não confiável para medidas de umidade relativa do ar. Os erros nas medidas de umidades relativas do ar apresentados superaram a referência em 20%, por isso as respostas de umidade dos abrigos não foram analisadas. Quanto à temperatura, o abrigo de polipropileno apresentou as maiores diferenças de temperatura ΔT_{MED} igual a $0,6^{\circ}\text{C}$ e ΔT_{MAX} de $5,4^{\circ}\text{C}$, enquanto o abrigo de garrafa PET alcançou um ΔT_{MED} de $0,6^{\circ}\text{C}$ e máximo de $4,7^{\circ}\text{C}$. Apesar do baixo desempenho, o abrigo de garrafa PET é de fácil fabricação e pode ser usado como recurso educacional. As medidas de temperatura do abrigo aspirado resultaram em um ΔT_{MED} igual a $0,3^{\circ}\text{C}$ e uma máxima de $4,4^{\circ}\text{C}$. Seu desempenho foi equivalente ao de um abrigo passivo, por isso a suas respostas não representam as dos abrigos ativos de baixo custo encontrados na literatura. O abrigo de pratos plásticos apresentou ΔT_{MED} entre $-0,2^{\circ}\text{C}$ e $+0,2^{\circ}\text{C}$, com ΔT_{MAX} de $1,7^{\circ}\text{C}$, enquanto o abrigo comercial apresentou ΔT_{MED} igual a $0,1^{\circ}\text{C}$ e ΔT_{MAX} de $1,4^{\circ}\text{C}$. As amplitudes térmicas diárias dos abrigos comercial e de pratos plásticos foram muito próximas à da estação de referência, todas entre $9,7$ e $10,1^{\circ}\text{C}$. O abrigo de pratos plásticos teve desempenho próximo ao dos abrigos comerciais, mostrando um bom potencial para aplicações científicas como ciência cidadã e o monitoramento de microclimas.

Abstract

This work aimed to characterize of the DHT22 sensor, as well as the evaluation of the influence on the temperature and air relative humidity measurements from 4 different models of low cost radiation shields. Three models of passive shelter, made of polypropylene, PET bottle and plastic plates, and 1 active shelter made of PVC pipe were tested. In addition to these, a commercial passive multiplate shield was characterized. The research adopted the methodology of open science, including the use of free software and open source hardware, open lab-notebooks and open data. Characterization of the DHT22 sensor was performed from measurements indoors made during 10 days, without any temperature or humidity control. The characterization of the shields was carried out from measurements performed during 17 days at the INMET automatic meteorological station, in Porto Alegre (RS). The sensor DHT22 proved to be a reliable option for temperature measurements, but not reliable for air relative humidity measurements. The errors presented exceeded the reference by 20%, so the humidity responses of the shields tested were not analyzed. The polypropylene shield had a ΔT_{MED} mean difference equal to 0,6°C and ΔT_{MAX} of 5,4°C, while the PET bottle shield reached a ΔT_{MED} of 0,6°C and a maximum of 4,7°C. Despite the low performance, the PET bottle shield is easy to manufacture and can be used as an educational resource. The temperature measurements of the aspirated shield resulted in a ΔT_{MED} of 0,3°C and ΔT_{MAX} 4,4°C. Their performance was equivalent to that of a passive shield, so their responses do not represent those of the low cost active shields found in the literature. The plastic plates shield presented ΔT_{MED} between -0,2°C and +0,2°C, with ΔT_{MAX} of 1,7°C, while the commercial shield had ΔT_{MED} equal to 0,1°C, with ΔT_{MAX} of 1,4°C. The daily thermal amplitude of commercial and plastic shields were very close to that of the reference station, all between 9,7 and 10,1°C. The plastic shield performed close to that of commercial shield, showing good potential for scientific applications such as citizen science and microclimate monitoring.

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivo.....	3
2	Referencial Teórico.....	4
2.1	Ciência Aberta.....	4
2.2	Medidas de temperatura e umidade relativa do ar.....	4
2.2.1	Temperatura.....	4
2.2.2	Umidade relativa do Ar.....	5
2.3	Abrigos meteorológicos.....	5
2.3.1.1	Abrigos meteorológicos de baixo custo.....	8
2.3.1.2	Comparação entre abrigos meteorológicos.....	9
2.4	Análise estatística.....	12
3	Materiais e Métodos.....	14
3.1	Estação Meteorológica.....	14
3.2	Sensor DHT22.....	15
3.2.1	Especificações do DHT22.....	16
3.2.2	Pesquisas com DHT22.....	17
3.3	Sistema de aquisição de dados.....	18
3.4	Abrigos Meteorológicos.....	19
3.4.1	Pagoda.....	20
3.4.2	Aspirado.....	21
3.4.3	Pratos.....	23
3.4.4	Pet.....	26
3.4.5	Gill.....	28
3.5	Estação de Referência.....	28
3.6	Caderno de laboratório aberto e ferramentas livres.....	29
3.7	Caracterização de instrumentos meteorológicos.....	30
3.7.1	Caracterização e calibração do DHT22.....	30
3.7.2	Caracterização dos abrigos meteorológicos.....	32
4	Resultados e Discussão.....	35
4.1	Caracterização e Calibração dos DHT22's.....	35
4.1.1	Temperatura.....	35

4.1.2 Umidade relativa do ar.....	38
4.2 Caracterização dos abrigos meteorológicos.....	41
4.2.1 Temperatura.....	42
4.2.1.1 Abrigo Gill.....	45
4.2.1.2 Abrigo Pagoda.....	46
4.2.1.3 Abrigo Aspirado.....	47
4.2.1.4 Abrigo Pet.....	48
4.2.1.5 Abrigos Pratos I, II e III.....	49
4.2.2 Umidade Relativa do Ar.....	51
4.2.3 Qualidade do abrigo de referência.....	56
5 Conclusões.....	61
6 Recomendações.....	64
Referências.....	65
Anexo A – Fabricação e construção dos abrigos meteorológicos.....	69
Anexo B - Caderno de Laboratório Aberto.....	85
Anexo C - Detalhes sobre o local período dos teste.....	92
Anexo D - Histogramas de ΔU	95
7 Anexo E - Velocidade do vento e regressão linear.....	101

1 Introdução

Entre 2005 e 2014, 83% (3 253) dos desastres registrados, 39% (283 035) das mortes registradas e 95% (1.6 bilhão) da população afetada por desastres no mundo, estavam conectados a desastres relacionados ao clima, tempo ou água (*World Meteorological Organization - WMO, 2017, pg 3*). Em vista de combater e diminuir estes números, a Organização Meteorológica mundial lançou em 2017 o Guia de Redução de Riscos de Desastres, onde sugere medidas para a prevenção e mitigação de desastres naturais.

Para a compreensão dos fenômenos se faz necessário monitorar diversos parâmetros ambientais e meteorológicos - como temperatura, umidade do ar, volume de chuva, etc. Para aumentar a disponibilidade destes dados meteorológicos se faz necessário aumentar também as redes e plataformas de monitoramento e disponibilização de dados. O Guia de Redução de Riscos de Desastres também afirma que:

“Crítico para o sucesso [da redução de riscos de desastres] são as interações de entrega de serviço com a comunidade de usuários, incluindo acesso aberto a dados globais sobre o tempo, água e clima e serviços e produtos de impacto relevante.” (World Meteorological Organization - WMO, 2017, pg 3)

Para garantir o acesso aberto a dados globais, metodologias como a ciência aberta e os dados abertos despontam como alternativas, a exemplo dos projetos Zenodo¹ e OpenAIRE², mantidos pela European Commission³, e parte das iniciativas que visam fortalecer o crescimento econômico da União Europeia⁴. Ambos são plataformas que tem como objetivo ampliar o acesso a ciência e dados abertos.

Já para aumentar a rede de estações meteorológicas, o investimento em novos equipamentos é a opção mais direta e óbvia. Estações meteorológicas automáticas são encontradas a venda online por fabricantes e revendedores brasileiros, bem como fabricantes estrangeiros. Nas lojas brasileiras, apenas as estações da marca Davis foram encontradas à venda, com preços entre R\$ 1000 ⁵ e

1A plataforma Zenodo serve como repositório de dados, artigos e documentação de projetos que tem como objetivo permitir que qualquer um se junte a Ciência Aberta. Mais informações em: <https://zenodo.org/>.

2 Composta por 50 parceiros de todos os países da União Europeia, a OpenAIRE tem como objetivo promover a ciência aberta e otimizar a pesquisa e uso dos dados abertos. Mais informações em: <https://www.openaire.eu/>.

3 A European Commission é a comissão executiva da União Europeia que trabalha para promover seus interesses.

4 O programa Horizon 2020 é um projeto da European Commission que foca na promoção de ciência de excelência, liderança industrial e superação de desafios sociais. Mais informações em: <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/>.

5 À venda online pela Clima Ambiente em:

<https://www.climaeambiente.com.br/prod,IDLoja,23707,IDCategoria,193909,estacao-meteorologica>

13000⁶⁷. Poucas lojas disponibilizam a venda separada dos elementos da estação, mas nas que disponibilizam o preço de sensores de temperatura e umidade relativa do ar variavam entre U\$400 a U\$2500⁸, enquanto os preços de abrigos meteorológicos vão de R\$360⁹ a R\$500¹⁰, no Brasil, e entre US\$200¹¹ e US\$500¹², no exterior.

O alto custo destes equipamentos restringe a ampliação de uma rede de monitoramento meteorológico, bem como favorece a concentração de dados em instituições governamentais e com fins lucrativos. Este cenário dificulta “*as interações de entrega de serviço com a comunidade de usuários*” e desfavorece o “*acesso aberto a dados globais*” se comparada com um cenário onde os serviços e dados são gerados pelas próprias usuárias. Um caminho para que esta alternativa se torne possível é o desenvolvimento de equipamentos de baixo custo e livres para serem usados, estudados, modificados e distribuídos, ou seja, o desenvolvimento de ferramentas livres para ciência, dos equipamentos de medida a infraestrutura de acesso aos dados.

A exemplo, o projeto Safecast, ao usar de ferramentas livres, ciência cidadã¹³ e dados abertos, foi capaz, através do trabalho conjunto de cientistas e da população afetada, fornecer mais dados sobre os níveis de radiação após o acidente nuclear em Fukushima, no Japão, do que o próprio Estado Japonês. Graças ao uso destas metodologias o projeto continua ativo mesmo após 7 anos decorridos do acidente, dando acesso aberto ao conhecimento da fabricação de detectores de radiação e a dados globais sobre a radiação. A troca de dados e serviços de impacto com os usuários são diretas à medida que os próprios usuários contribuem na produção de dados e serviços. O Safecast possui mais de 900 usuários cadastrados, 40 milhões de medições coletadas – sendo que cerca de 1 milhão de medidas são adicionados por mês – e mais de 1 000 detectores de radiação distribuídos pelo mundo (Brown, Franken, Bonner, Dolezal & Moross, 2016). É considerado um projeto de ciência aberta e cidadã bem sucedido.

6 Estações da Davis vendidas pela Azula: <https://www.azula.com.br/davis>

7 Estes equipamentos necessitam também de *softwares* específicos para seu funcionamento, as licenças de uso destes *softwares* custam aproximadamente R\$1 800.

8 Sensores de umidade relativa do ar à venda no site online da Clima&Ambiente:

<https://www.climaeambiente.com.br/prod,IDLoja,23707,IDCategoria,193909,estacao-meteorologica>

9 Abrigo meteorológico à venda no site online da Clima&Ambiente:

<https://www.climaeambiente.com.br/prod,idloja,23707,idproduto,4847970>

10 Abrigo meteorológico à venda no site online da Squitter: <http://pages.squitter.com.br/abrigo-meteorologico-oferta>.

11 Abrigo solar de 9 pratos da Vaisala: <https://store.vaisala.com/us/solar-radiation-shield-9-plates/DTR502B/dp?nosto=nosto-frontpage-right-your-visit>

12 Abrigo solar de 5 pratos da Vaisala: <https://store.vaisala.com/us/solar-radiation-shield-5-plates/DTR504/dp>

13 A ciência cidadã é uma metodologia em que projetos com finalidades científicas contam com apoio de voluntário que na coleta ou análises de dados (Soares & Santos, 2011). Comumente excluídas do processo científico, essas pessoas contribuem através da obtenção ou análise de dados, por exemplo, viabilizando uma pesquisa que seria inviável sem este apoio. Mais do que isso, a ciência cidadã, por levar o processo científico para fora das instituições de pesquisa convencionais, permite que as demandas de pesquisa e ciência partam das comunidades envolvidas no processo.

No Brasil, o projeto Estações Meteorológicas Modulares¹⁴ do Centro de Tecnologia Acadêmica (CTA)¹⁵, vem desenvolvendo uma estação meteorológica com características similares (Pezzi et al., 2017) (Silva et al., 2015). O projeto tem como objetivo o desenvolvimento de uma estação de baixo custo capaz de medir temperatura, umidade do ar, pressão atmosférica, volume de chuva, etc. Tem também como objetivo disseminar os uso destas estações, disponibilizar os dados publicamente e globalmente, incentivar o ensino de ciências, e fortalecer assim uma rede de monitoramento construída e mantida pelos próprios usuários.

Ainda assim, o abrigo meteorológico – elemento essencial para o monitoramento da temperatura do ar - usado neste projeto é um abrigo comercial. Seu alto custo é uma das barreiras para atingir os objetivos do projeto. Observa-se então a necessidade de se buscarem alternativas acessíveis. Os abrigos meteorológicos de baixo custo do estilo faça-você-mesmo vem se mostrando uma alternativa promissora para a substituição de abrigos comerciais. Entretanto, carecem de estudos de caracterização do desempenho a fim de garantir a viabilidade de sua aplicação para coleta de dados com a confiança necessária para fins científicos.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo a caracterizar o sensor DHT22, assim como a avaliar a influência de 4 diferentes modelos de abrigos meteorológicos de baixo custo e 1 modelo comercial nas medidas de temperatura e umidade relativa do ar .

14 Mais informações sobre o projeto podem ser encontradas em: <http://cta.if.ufrgs.br/projects/estacao-meteorologica-modular/wiki/Wiki>

15 O CTA é um grupo de pesquisa do Instituto de Física da UFRGS que pesquisa e desenvolve tecnologias livres.

2 Referencial Teórico

2.1 Ciência Aberta

A ciência aberta é uma metodologia de pesquisa e produção de conhecimento fundamentados na liberdade de acesso ao conhecimento. Existem muitas definições de ciência aberta, trazendo relevância para os diferentes aspectos da ciência: dados, publicações, instrumentos, recursos educacionais, fluxo de trabalho, etc (Bezjak et al., 2018). Se pensada pelo seu aspecto de produção de conhecimento, pode ser resumida na definição de “conhecimento aberto”, que, segundo a Open Knowledge International (OKI), é todo conhecimento que qualquer um pode livremente acessar, usar, modificar e compartilhar para qualquer propósito (sujeito a restrições que mantenham o caráter de abertura) (OKI, sem data).

Segundo Pezzi et al. (2017), para que um experimento seja por completo um processo científico aberto e cidadão, os instrumentos científicos devem ser ferramentas livres, como são os *softwares* livres e os *hardwares* abertos e livres¹⁶, mas também os dados e resultados do experimento devem ser disponibilizados publicamente.

2.2 Medidas de temperatura e umidade relativa do ar

2.2.1 Temperatura

A temperatura, do ponto de vista termodinâmico, é uma grandeza física da mensurabilidade das transferências de energia térmica entre sistemas na forma de calor e da segunda lei da termodinâmica¹⁷. É comumente associada às sensações de frio e calor e exerce influência direta nos sistemas biológicos e ambientais.

A medida de temperatura do ar é sensível ao ambiente que a rodeia: vegetação, solo, presença de prédios e construções nas proximidades, posicionamento, do abrigo meteorológico e outros obstáculos (Lacombe et al., 2011). Por isso, é de extrema importância o registro detalhado do local de medida (World Meteorological Organization, WMO, 2014). Os sensores devem estar situados a uma altura de no mínimo 1,25 m. Não há limite de altura, mas é sugerido que não ultrapasse 2 m. É sugerido que a amostragem de temperatura seja de 20 s. A WMO recomenda que medidas de temperatura tenham a exatidão de 0,2°C e a resolução de 0,1°C (WMO, 2014).

¹⁶ Assim como o conhecimento aberto, ferramentas livres como o *software* livre e o *hardware* aberto e livre devem ter licenças que permitem à usuária o uso, estudo, modificação e redistribuição destas.

¹⁷ A segunda lei da termodinâmica pode ser resumida como “a quantidade de entropia de qualquer sistema isolado termodinamicamente tende a incrementar-se com o tempo, até alcançar um valor máximo”.

2.2.2 Umidade relativa do Ar

Umidade do ar é a quantidade de vapor de água na atmosfera. Seu valor absoluto é equivalente ao de uma densidade, geralmente dada em kg/m³. Se toda a água contida em 1 m³ de ar for condensada em um recipiente, a massa desta água será a umidade absoluta.

A umidade relativa do ar (Φ) é uma medida relativa definida como a razão percentual entre a densidade de vapor presente (pressão parcial de vapor de água) e a densidade de saturação do vapor no ar (pressão de vapor), dada pela equação:

$$\Phi = \frac{p(H_2O)}{p^*(H_2O)} * 100$$

2.1

Equação

A saturação da água no ar depende da temperatura e pressão do ar, por isso a medida de umidade relativa do ar é fortemente dependente destes parâmetros.

Recomendações das condições de medida de umidade relativa são análogas às de temperatura. A WMO recomenda que medidas de umidade relativa do ar tenham exatidão e resolução de 1% (WMO, 2014).

2.3 Abrigos meteorológicos

Quando exposto ao sol, um sensor de temperatura absorve a radiação solar e aquece. Este aquecimento causa uma diferença entre a temperatura medida pelo sensor e a temperatura real do ar. A intensidade deste erro irá depender da intensidade de radiação que atinge o sensor e da quantidade de energia absorvida e dissipada pelo sensor. Em sensores comuns, expostos diretamente à radiação solar, este aquecimento - associado a outras condições desfavoráveis - pode gerar um erro de até 25°C. Por isso, se faz necessário o uso de um abrigo que proteja o sensor da radiação (WMO, 2014). Este abrigo é comumente chamado de “abrigo meteorológico”.

O abrigo de radiação deve ter um *design* tal que a temperatura do ar interno esteja em equilíbrio térmico com a temperatura do ambiente externo. Deve proteger completamente o sensor de qualquer radiação infravermelha - seja ela direta do sol, ou refletida pelo solo ou outros objetos - da precipitação e de qualquer outro fenômeno que possa desviar o resultado da medida (WMO, 2014).

Em geral, os abrigos possuem aberturas que permitem a circulação natural do ar, estes são chamados de abrigos passivos. Kuerzeja (2010) demonstra que a exatidão máxima alcançada por estes abrigos é de 0,1°C. Abrigos equipados com um exaustor que puxa ar para dentro do abrigo, forçando a circulação de ar, são chamados de abrigos aspirados. Se a ventilação é bem projetada, estes abrigos medem temperaturas mais frias do que os passivos e costumam ter uma melhor exatidão (Lacombe et al., 2011).

O aprimoramento do *design* do abrigo busca minimizar a influência do abrigo na medida da temperatura e umidade relativa do ar. Pesquisas têm mostrado que erros causados pelo abrigo aparecem com maior frequência durante o dia, sob condições de céu limpo e pouco vento e em noites calmas e limpas. No primeiro caso, a temperatura tende a ser maior do que a “real”, enquanto no segundo tende a ser menor (Sparks, 1972; Nordli, 1997; Kuerzeja, 2010; Lacombe et al., 2011; WMO, 2014; Valin Jr. et al., 2016). Mesmo em condições normais, estes erros costumam variar entre 0,5°C e 2,5°C (WMO, 2014).

O uso de abrigos também altera as medidas de umidade relativa do ar, principalmente por causa de sua dependência com as medidas de temperatura. A diferença de temperatura dentro dos abrigos pode gerar uma diferença de alguns percentuais na umidade relativa do ar. Na temperatura de saturação do vapor, Lacombe et al. (2011) encontrou que a umidade relativa do ar medida a 21°C é 6% mais baixa do que a medida a 20°C. Em boas condições de medida – umidades mais baixas - um desvio de no máximo 3% foi considerado excepcionalmente bom por Lacombe et al. (2011). Parâmetros ambientais como a incidência direta e indireta de ondas eletromagnéticas curtas e longas e a velocidade do vento também influenciam nas medidas de umidade (WMO, 2014).

Um dos modelos de abrigo mais comuns é o abrigo de Stevenson (Sparks, 1972), uma grande caixa com paredes de venezianas, como o da Figura 2.2. Tem sua origem anterior ao surgimento das estações automáticas, por isso costuma ser grande e abrigar diversos termômetros, higrômetros, termógrafos, etc (Sparks, 1972). Geralmente é feito de madeira, mas modelos de plástico têm se tornado comuns. Costumam ter ventilação natural, mas pode ser equipado com ventilação forçada. Pode variar também na espessura das paredes, que podem ser duplas, assim como o teto e o fundo (Lacombe et al., 2011). Na Figura 2.1 os modelos e, f, g e h mostram variações do abrigo Stevenson. Cada variação deste modelo irá apresentar um desempenho diferente. Lacombe et al. relatou erros de -0,5°C a 2,5°C em casos extremos, e um atraso na temperatura em relação a abrigos multipratos - atribuído ao seu tamanho.

Com o surgimento de estações meteorológicas automáticas não havia mais a necessidade de um abrigo grande e que permitisse fácil acesso aos sensores, pois um mesmo sensor de temperatura substituiu o termômetro principal e os termômetros de extremos. Surgem então abrigos pequenos, geralmente cilíndricos, desenhados para cada tipo de sensor, como o modelo i da Figura 2.1 e o abrigo da Figura 2.2. A parede externa costuma ser branca e de material com alta refletividade no infravermelho. Em alguns modelos, a parede interna é preta para que qualquer radiação remanescente seja absorvida antes de alcançar o sensor (Sparks, 1972).

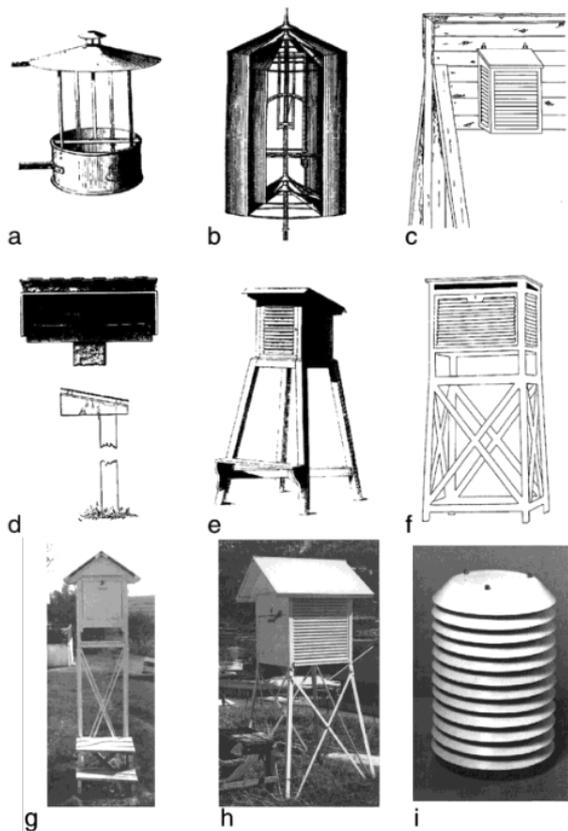


Figura 2.1: Ilustrações e fotos de diferentes modelos de abrigos usados desde o século XIX nos países Nórdicos. (a) modelo sueco de metal usado até 1890 (b) modelo de madeira finlandês (c) modelo dinamarquês (d) modelo sueco free-standing (e) abrigo de Stevenson de uma grade (f) abrigo de Stevenson duplamente gradeado (g) abrigo de Stevenson de parede dupla (h) abrigo de Stevenson (i) abrigo multipratos fabricado pela Vaisala, modelo DTR 13. Imagem obtida de Nordeli et al. (1997).



Figura 2.2: Abrigo de Stevenson de madeira, com parede simples. Foto por Bidgee, CC BY 3.0

Ao longo das décadas de estudos meteorológicos, diversos modelos de abrigos foram usados. A Figura 2.1, retirada de Nordeli et al. (1997), mostra 9 diferentes modelos de abrigos usados desde o século XIX nos países nórdicos. Os abrigos a e b da Figura 2.1, suíço e finlandês, respectivamente, eram encontrados na região dos países nórdicos até meados de 1900. O modelo finlandês era feito de madeira e posicionado no alto de postes de madeira. Os modelos suíços eram de metal e costumavam ser pendurados nos quatro cantos de um prédio e os termômetros eram lidos sob a sombra. Estes modelos foram substituídos pelo modelo d, free-standing, uma caixa de madeira distante de prédios e construções; foi usada até 1930 e 1970, quando foi substituída por abrigos de Stevenson (Nordeli et al., 1997).

2.3.1.1 *Abrigos meteorológicos de baixo custo*

O alto custo destes abrigos é um obstáculo para pesquisas de ciência cidadã, pois dificulta que indivíduos tenham acesso a estas tecnologias. É também um obstáculo para pesquisas que requerem uma rede de estações meteorológicas – como monitoramento de microclima urbano ou de florestas - e para o ensino de ciências (Tarara & Hoheisel, 2007 ; Barbosa, Lumberts e Guths, 2008; Holden et al., 2013; Serafani Jr. & Alves, 2014; Hoppe et al., 2015; Valin Jr. et al., 2016).

Motivados por isso, diversas pesquisas sobre o uso de abrigos meteorológicos de baixo custo têm sido realizadas nos últimos anos. Tarara e Hoheisel (2007) testaram 6 modelos passivos feitos com um material isolante aluminizado e 3 modelos aspirados feitos com canos PVC. Barbosa, Lumberts e Guths (2008) testaram 7 diferentes modelos feitos de bandejas aluminizadas, usados para medir o efeito da radiação nas medidas de temperatura dentro de edifícios. Holden et al. (2013) analisam 1 modelo de abrigo - feito de chapas de forro de PVC brancas dobradas e grampeadas – em 3 ambientes diferentes com 3 réplicas. Serafini Jr. e Alves (2014) testaram 3 modelos – feitos de madeira e alumínio. Hoppe et al (2015) analisaram um modelo de abrigo feito com chapa de alumínio galvanizada. Mais recentemente, Valin Jr. et al. (2016) conduziram uma extensa análise do comportamento de 5 abrigos passivos feitos de canos PVC, madeira e pratos plásticos. Além desses, Valin Jr. et al. (2016) mencionam pelo menos 9 trabalhos recentes sobre abrigos meteorológicos de baixo custo.

A metodologia de teste, comparação, validação e análises destes trabalhos variara muito, bem como os sensores e abrigos de referência e os sensores usados em cada abrigo, o que torna difícil uma comparação simples e direta dos resultados apresentados. Como nenhum indica caminho para os dados analisados ou algum tipo de documentação, não é possível reanalisar os dados sob a mesma perspectiva.

Os abrigos passivos de Tarara e Hoheisel (2007) apresentaram diferenças do padrão na faixa de + 1,4°C a 7,4°C, enquanto para os modelos aspirados elas se concentram abaixo de 0,5°C. Para os abrigos testados por Valin Jr. et al. (2016), as amplitudes das diferenças de temperatura e umidade relativa do ar variaram entre 0,77°C e 4,72° e entre 3,11% e 14,20% na estação quente-úmida e entre 1,54°C e 5,23°C e entre 4,09% e 9,66% para a estação quente-seca de Cuiabá, MT, Brasil. De maneira similar, o abrigo testado por Holden et al. (2013) apresentou uma diferença máxima de 4,1°C em alguns locais de testes, e 8°C em outros. Os resultados gerais destes três trabalhos são mencionados por serem pesquisas similares a esta em diversos aspectos.

2.3.1.2 Comparação entre abrigos meteorológicos

O método de comparação de diferentes abrigos meteorológicos é largamente usado como maneira de analisar e medir a influência do abrigo nas medidas, tanto de temperatura, quanto de umidade, e é feito desde meados do século XIX (Sparks, 1972). As comparações podem ser feitas em ambiente controlado, onde o valor “real” é conhecido, ou em campo. Quando feitas em campo é necessário definir qual sensor e qual abrigo medem o valor mais próximo do “real”.

O instrumento que mede as medidas consideradas mais próximas das “reais” é comumente chamado de “padrão” ou “referência”. A escolha de um abrigo e sensor de referência é delicada e deve ser feita com muito cuidado, pois, como refletem Bevington e Robinson (2003) “Usualmente nós não sabemos qual é o valor ‘real’, caso contrário, não haveria razão para realizar o experimento.” Ao comparar a estação meteorológica automática e a estação meteorológica convencional¹⁸, ambas do 8° Distrito do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Porto Alegre, RS), Alves (2018) encontrou diferenças de até 10% entre as medidas de umidade relativa do ar. A exemplo, Lacombe et al. (2011), ao comparar diversos abrigos de vários modelos no deserto da Argélia, conclui, ao final do experimento, que o abrigo escolhido como referência não se aproximava do valor “real”. No mesmo experimento, os abrigos aspirados apresentaram resultados insatisfatórios, com temperaturas mais altas quando expostos a radiação infravermelha do que os abrigos passivos. Estas situações exemplificam que mesmo abrigos com desempenho já bem caracterizado podem não representar o valor “real”, e que mesmo a melhor referência disponível está sujeita a erros.

¹⁸ Uma estação meteorológica convencional é composta de vários sensores isolados que registram continuamente os parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, etc), que são lidos e anotados por um observador a cada intervalo e este os envia a um centro coletor por um meio de comunicação qualquer. Fonte: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesConvencionais> .

Os valores máximos, médios e mínimos medidos, também suas diferenças em relação ao padrão, costumam ser usadas na comparação entre diferentes modelos de abrigos e caracterização destes abrigos. A exatidão, precisão e incerteza de sensores e abrigos, quando comparados com medidas de referência, também podem ser usadas na caracterização do desempenho destes.

Diferenças e discrepâncias

Diferenças e discrepâncias são as diferenças entre medidas de mesma grandeza física, ou a comparação entre o resultado e o valor “real”, não devem ser confundidos com incerteza (Benvington & Robinson, 2003).

Exatidão vs. Precisão

A exatidão é a medida do quão perto o resultado de um experimento está do valor “real”. Sua origem está associada a incertezas aleatórias e sistemáticas inerentes do processo de medida e pode ser caracterizada pela distância da média das medidas do valor real. A precisão, também conhecida como repetibilidade, é uma estimativa de quanto medidas repetidas, nas mesmas condições, resultam no mesmo valor e pode ser caracterizada pelo desvio padrão de medidas equivalentes. Está associada a efeitos aleatórios e estatísticos do experimento. (Benvington & Robinson, 2003)

É importante diferenciar precisão de exatidão. Na Figura 2.3, os pontos pretos representam medidas, resultados de um experimento em que o centro do alvo é o valor “real”. Na Figura 2.3 a) os pontos estão todos ao redor do valor “real”, porém nenhum acerta a região bem central do alvo, mas como a média das medidas está muito próxima do valor real, diz-se que este experimento apresenta uma boa exatidão; mas os pontos estão distantes um do outro, o que significa que o experimento tem uma baixa reprodutibilidade, uma baixa precisão. Já a Figura 2.3 b) ilustra um experimento com uma boa precisão/repetibilidade, mas não possui uma boa exatidão; todos os pontos estão concentrados na mesma região, mostrando que o resultado do experimento é consistente e preciso, porém estão longe do valor “real”, por isso não possui uma boa exatidão. Apesar de serem características diferentes e independentes, um experimento com uma precisão muito ruim não pode ser considerado exato (Benvington & Robinson, 2003).

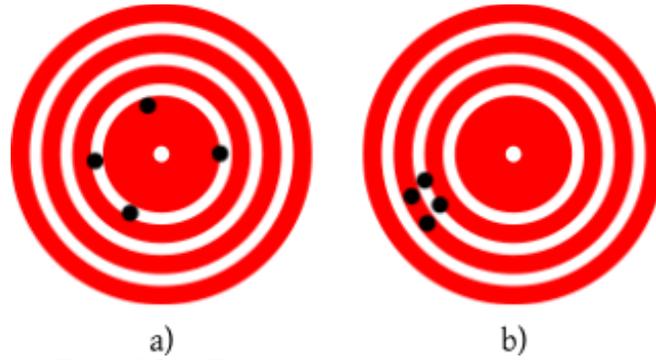


Figura 2.3: a) Exemplo de um experimento com boa exatidão mas baixa precisão. b) Exemplo de um experimento com boa precisão, mas baixa exatidão.

Incerteza

A incerteza é a magnitude do erro que se estima que foi feito na determinação do resultado. De maneira geral, a incerteza de um resultado experimental é a precisão com a qual o resultado foi determinado. O desvio padrão é uma medida das flutuações dos resultados do experimento e é, portanto, uma medida adequada de incerteza. Para distribuições normais, a incerteza equivale a dois desvios padrão – intervalo no qual 95% das medidas são encontradas (Benvington & Robinson, 2003).

Quanto ao relato dos resultados de uma medida e de sua incerteza, o Guia para a expressão da incerteza de medição (GUM) sugere que é preferível errar no sentido de fornecer informação em excesso, do que o contrário e sugere uma lista do tipo de informação que deve estar disponibilizada (Joint Committee for Guides in Metrology - JCGM, 1995):

- i. Descrever explicitamente os métodos usados para calcular o resultado da medida e sua incerteza a partir das observações experimentais e condições iniciais;
- ii. Listar todos os componentes de incerteza e documentar completamente como eles foram avaliados;
- iii. Apresentar a análise dos dados de tal forma que cada passo possa ser acompanhado e que cálculos do resultado reportado possam ser repetidos independentemente;
- iv. Disponibilizar todas as correções e constantes usadas na análise e suas fontes.

O manual ainda completa com uma sugestão: para saber se essas condições foram satisfeitas a pesquisadora deve se questionar “Eu forneci informação o bastante e clara o suficiente para que meus resultados sejam atualizados no futuro caso novas informações ou dados sejam disponibilizados?” (JCGM, 1995).

Calibração

Antes ou após as comparações pode-se tentar corrigir os erros causados pelo abrigo ou pelo sensor por meio de uma calibração ou métodos de correção. Isso pode ser feito com calibrações do sensor antes e depois do experimento, como fez Lacombe (2011); com a aplicação de ajustes – obtidos experimentalmente – nos valores medidos de cada abrigo no período do ano mais propícios ao erro, como sugeriu Sparks (1972); ou pode ser estimado com *softwares* de simulação de fluidos e de temperatura, como feito por Yang et al. (2016).

2.4 Análise estatística

O presente trabalho realiza uma grande quantidade de medidas de modo que, para tornar os resultados explícitos e inteligíveis, é necessário recorrer a uma análise estatística. Serão computadas as médias, desvios padrões e desvios padrão estimados da população.

Média e Desvio Padrão

As médias calculadas neste trabalho são médias aritméticas da população de tamanho N e são definidas por

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_i^N X_i$$

Equação 2.2

O desvio padrão S da população com N elementos - também conhecido como raiz quadrada da variância - é dado por

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2 - \bar{X}^2}$$

2.3

Equação

O desvio padrão é um valor sempre maior que zero e tem as mesmas unidades de medida das quantidades analisadas (Benvington & Robinson, 2003).

Desvio Padrão Estimado da População

Quando são realizadas medições em uma amostra composta de uma fração dos elementos de uma população, o mais apropriado é usar o desvio padrão estimado da população (Benvington & Robinson, 2003). Para uma amostra de tamanho N , o desvio padrão estimado da população S_E é dado por

$$S_E = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}$$

Equação 2.4

O Desvio padrão estimado da população será utilizado para estimar as incertezas associadas às medições de temperatura pelos sensores DHT22, buscando verificar as informações fornecidas pelo fabricante no datasheet a partir das medidas de um número reduzido de sensores.

3 Materiais e Métodos

3.1 Estação Meteorológica

O conjunto testado, na Figura 3.1, consiste na placa de controle – descrita na seção 3.3 -, que coleta e armazena os dados de 1 LDR¹⁹ e 7 DHT22, uma estrutura mecânica de sustentação e os 8 abrigos - posicionados a 1,50 m de altura.



Figura 3.1: Estação meteorológica e seus 7 abrigos durante um ensolarado dia no INMET.

O suporte mecânico da estação consiste em 3 tripés de caixa de som conectados por várias barras de ferro pintadas de branco. No total, possui 8 m de comprimento e 1,50m de altura. Foi fixado no chão com cabos de aço e barras de cobre enterradas. Cada abrigo foi fixado de uma maneira diferente, mas todos foram fixados para cima da barra. A distância entre os abrigos é de 80 cm. Detalhes sobre o posicionamento e características do local estão detalhadas no Anexo C - Detalhes sobre o local período dos teste.

Em cada abrigo foi instalado 1 sensor, na Tabela 3.1 estão os sensores associados a cada abrigo. Os abrigos foram instalados na estação em ordem alfabética dos seus sensores, ou seja, na sequência: Pagoda, Aspirado, Pratos I, Pratos II, Pratos III, Pet e Gill. O abrigo Pagoda ficou mais ao Norte e o Gill mais ao Sul.

Sensor	Abrigo
A*	Pagoda
B	Aspirado

¹⁹ LDR é um sensor analógico capaz de medir a presença e intensidade de luz visível. As medidas de luminosidade feitas com o LDR não foram analisadas neste trabalho.

C	Pratos I
D	Pratos II
E	Pratos III
F	Pet
G	Gill

Tabela 3.1: Sensor associado a cada abrigo. * O sensor instalado no Pagoda não é o mesmo no qual foram realizados os testes de calibração e caracterização.

A estação foi instalada no INMET no dia 21 de Março e permaneceu lá até meados de Julho, e os dados analisados são do período de 22 de Maio a 7 de Junho. A princípio, sua alimentação foi feita com uma placa solar e uma bateria, mas esta opção se mostrou insuficiente para manter o sistema ligado. Por isso, a alimentação passou a ser feita diretamente pela rede elétrica.

Os problemas enfrentados com alimentação, o planejamento da montagem e instalação do suporte da estação, as alterações nos *firmwares*, bem como as adaptações na placa estão detalhados nos cadernos de laboratório listados no Anexo B - Caderno de Laboratório Aberto.

3.2 Sensor DHT22

O DHT22 – também conhecido pelo nome AM2302 - é um sensor digital que mede temperatura e umidade relativa do ar. É fabricado pela Aosong²⁰, tem baixo custo (R\$15-25) e, possivelmente por isso, disseminado entre as comunidades *makers*, *hackers* e hobistas. O sensor de temperatura é o pt100. O pt100 é um termo resistor de platina com resistência de 100 Ω . Neste tipo de sensor a variação da temperatura causa uma variação na resistência elétrica do material, que é medida pela alteração na queda de tensão no sensor.

A umidade relativa do ar é medida com um sensor capacitivo polimérico. Sensores capacitivos de umidade consistem em um substrato com um filme fino dielétrico depositado entre dois eletrodos condutores, formando um capacitor. Considerando que a distância entre os dois eletrodos é a mesma durante toda sua extensão, e negligenciando o efeito de borda, é possível aproximar a capacitância do sensor a de uma capacitor de placas paralelas. Para este capacitor, a capacitância C é calculado pela Equação 3.1, onde A é a área das placas, d sua distância e ϵ_m é a constante dielétrica do material. A mudança na constante dielétrica do filme é proporcional à umidade do ar a que está exposto, o que conseqüentemente altera a capacitância deste pequeno capacitor. Uma compensação de temperatura é feita²¹ pois a quantidade de água adsorvida no

²⁰ Aoson é uma empresa chinesa de componentes eletrônicos e sensor digitais e analógicos. Site oficial: <http://www.aosong.com/>

²¹ O fabricante informa que está compensação foi feita a partir de uma pré-calibração e está registrada na memória do chip embarcado do sensor.

dielétrico depende tanto da umidade relativa do ar quanto da temperatura. A umidade relativa do ar é então uma função da capacitância do dielétrico (o sensor de umidade) e da temperatura (medida pelo sensor de temperatura).

$$C = \frac{e_m A}{d}$$

Equação 3.1

O DHT22 é um sensor digital que possui um microchip embarcado que retorna as leituras de umidade relativa do ar e temperatura através de um sinal digital. Pode ser usado para transmissões a longas distâncias, possui baixo consumo de energia e não precisa de componentes extras para o funcionamento. O período mínimo de cada medição é de aproximadamente 0,2 s. Segundo informado pelo fabricante, a medida de umidade relativa do ar tem uma compensação da temperatura feita a partir da calibração de cada sensor.

3.2.1 Especificações do DHT22

A Tabela 3.2 traz os valores de exatidão, resolução, precisão e histerese especificados pelo pelo fabricante.

	Umidade relativa do Ar	Temperatura
Faixa de operação	0% - 100%	- 40°C ~ 80°C
Exatidão	± 2% * (25°C)**	± 0,5°C
Resolução	0,1%	0,1°C
Precisão	± 1,0%	± 0,2°C
Histerese	0,3%	-

Tabela 3.2 Especificações do DHT22 disponibilizadas pelo fabricante. * Alcança um valor máximo de ± 5%. ** Valor válido a 25°C.

A relação entre o erro na medida de umidade relativa do ar pode ser verificado na Figura 3.2. Para valores abaixo de 10% e superiores a 90% o erro sobre para 4%. Segundo este gráfico o erro da umidade relativa do ar é superior aos 2% declarados na Tabela 3.2. Esta contradição gera uma desconfiança em relação à veracidade dos dados informados. O erro da temperatura, Figura 3.3, aumenta para valores menores do que 10°C e maiores do que 60°C, ambos fora da faixa que foi analisada.

Os valores de resolução de ambos estão dentro das especificações da WMO (0,1°C e 1%), A exatidão de ambos é maior do que a recomendação da WMO (0,2°C e 1%), logo este sensor não é adequado para aplicações que se deseje seguir estas recomendações.

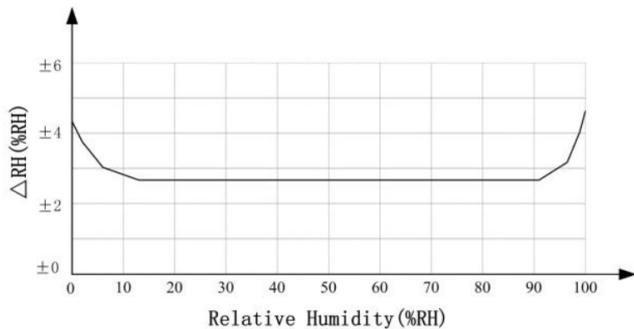


Figura 3.2: O gráfico apresenta o erro da umidade relativa em relação a faixa de umidade relativa do ar a 25°C; o eixo x são valores de umidade relativa do ar e no eixo y o erro na medida de umidade relativa do ar (em %). Imagem retirada de AOSONG.

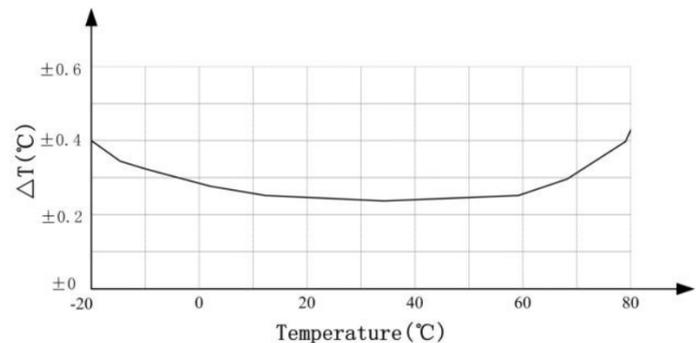


Figura 3.3: O gráfico apresenta o erro da temperatura; o eixo x são valores de temperatura e o eixo y o erro na medida (em°C). Imagem retirada de AOSONG.

3.2.2 Pesquisas com DHT22

Ao pesquisar sobre trabalhos realizadas com o DHT22, mesmo uma pequena busca na *internet* já resulta em uma série de tutoriais, vídeos e fóruns discutindo o uso deste sensor em estações caseiras e aplicações de internet das coisas. A mesma busca feita em portais como Periódicos CAPES²² e Lume²³ retornam poucos trabalhos. Alguns discutem a construção de sistemas de monitoramento agrícola ou científico, pesquisas relacionadas com o conforto térmico em edifícios e principalmente o monitoramento da umidade no concreto. Foram encontrados apenas dois trabalhos que discutem o desempenho do sensor DHT22 em relação as medidas de umidade relativa do ar: Alves (2018) e Mota et al. (2018) .

Na comparação de mediadas de umidade relativa do ar de uma estação meteorológica automática do INMET com medidas feitas pelo sistema EMM – mesmo sistema de aquisição usado no presente trabalho - usando um DHT22 dentro de um abrigo comercial multipratos, Alves (2018) concluiu que a diferença das respostas dos sensores é significativa. As diferenças médias de cada hora alcançaram máximos de 14,41% e permaneceram acima de 5% durante 2/3 do dia. Naquele trabalho foram coletadas 338 medidas em 14 dias.

Na pesquisa de Mota et al. (2018), o sistema analisado, chamado de SMTU, é baseado em Arduino e utiliza um DHT22 dentro de um abrigo meteorológico de baixo custo feito com um cano

²² O Periódicos CAPES é uma biblioteca virtual da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes). Acesso em: www.periodicos.capes.gov.br.

²³ O Lume é o repositório digital da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e consiste em coleções digitais produzidas no âmbito da Universidade. Acesso em: <http://www.lume.ufrgs.br> .

PVC e pratos plásticos. A comparação com a estação do INMET de Santa Maria (RS, Brasil) foi feita por apenas 4 dias. Nos gráficos apresentados é possível verificar visualmente que a diferença na umidade relativa do ar alcança máximos entre 10% e 20%, mas não foi feita uma análise mais completa sobre estas variações.

Discussões e pesquisas informais encontradas na internet indicam que mesmo para aplicações simples os usuários do sensor não estão satisfeitos com as medidas de umidade relativa do ar do DHT22. Kimberly e Robert Smith publicaram em seu blog pessoal diversas pesquisas e testes com o DHT22 e com outros higrômetros. Suas pesquisas foram realizadas em ambiente de temperatura e umidade controlados durante o período de 1 ano. Suas conclusões indicam que mesmo em medidas de curta duração (1 semana) a temperatura constante as medidas apresentam um erro de 6%. Já para um período de operação de 1 ano, pelo menos um dos sensores apresentou um erro de até 20%. Ao longo do tempo a precisão dos sensores também variou. Alguns sensores apresentaram autoaquecimento, o que causou erro nas medidas de temperatura e umidade relativa do ar. Outro importante fator exposto nestes trabalhos é que a variação de temperatura por si só causou um erro nas medidas superior a 2% (Smith & Smith, 2018).

Já para temperatura, Alves (2018) encontra que o quadrático médio de $0,3^{\circ}\text{C}$, e que as diferenças médias por horário variaram entre $0,3^{\circ}\text{C}$ a $0,2^{\circ}\text{C}$, concluindo que as diferenças entre temperatura medida e de referência não são estatisticamente significativas. O sistema desenvolvido por Mota et al. (2018) superestimou a temperatura durante todo o dia. O trabalho não detalha as diferenças de temperatura, pois foca as medidas de umidade relativa do ar. Como o abrigo utilizado era artesanal (de baixo custo), não é possível indicar se as diferenças de temperatura estavam associadas ao abrigo ou ao sensor.

Todos os trabalhos citados foram publicados em 2018. Não foi encontrado nenhum trabalho anterior a estes. Isso pode ser um indício de que mais pesquisas com DHT22 surgirão no futuro próximo, mas reforça a necessidade de que estudos mais extensos sejam feitos com o sensor DHT22 assim como outras alternativas de baixo custo.

3.3 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados foi adaptado do sistema da Estação Meteorológica Modular (Alves, 2018). A placa adaptada é a Shield EMM Memória V0.9. A placa possui entrada para duas

placas de prototipagem - NodeMCU²⁴ e Arduino²⁵ -, um relógio RTC e um módulo para cartão microSD. Originalmente, ela possui 8 entradas, sendo 1 analógica, 5 digitais e 2 analógicas/digitais. Para conectar os 7 DHT22's e 1 LDR foi necessário adaptar as conexões físicas para obter 7 entradas digitais alimentadas com 5 V.

O Arduino é responsável pela coleta e armazenamento dos dados, enquanto o NodeMCU controla a coleta, realiza a comunicação serial e a comunicação com o servidor da *internet*. Os *firmwares* destes microcontroladores foram desenvolvidos para operar com 3 sensores, 1 analógico e 2 digitais. Foi necessário alterar todos códigos, incluindo a biblioteca do DHT22, para que a coleta e armazenamento fosse realizada para 7 sensores digitais e 1 analógico. Tanto para a caracterização dos sensores, quanto para dos abrigos, o armazenamento foi feito num cartão microSD e não foi habilitada a conexão com a *internet*²⁶.

O caráter de ferramenta livre desta placa foi essencial para que as adaptações necessárias fossem realizadas. Sua documentação permitiu que alterações fossem feitas com quase total autonomia dos desenvolvedores, que foram consultados pontualmente para esclarecimento de dúvidas.

A configuração da amostragem dos dados pode ser feita por comunicação serial por qualquer usuário a qualquer momento, o que facilita a definição do intervalo entre cada medida, de quais sensores e quais medidas serão coletadas. Na caracterização dos sensores a amostragem foi de 1 min e na dos abrigos foi de 20 s. Durante o período de coleta dentro do laboratório e em campo, a placa não mostrou nenhuma instabilidade.

3.4 Abrigos Meteorológicos

Foram testados 7 abrigos meteorológicos, sendo 6 abrigos de baixo custo com quatro diferentes modelos e um abrigo comercial. Dos abrigos de baixo custo, três foram inspirados em artigos e trabalhos publicados no Brasil e nos Estados Unidos da América, e um não possui estudos realizados. O primeiro foi um abrigo vertical passivo confeccionado com polipropileno – “Pagoda”. O segundo foi um abrigo horizontal aspirado com uma entrada forçada de ar – “Aspirado”. O terceiro foi um abrigo vertical passivo confeccionado com pratos fundos de poliestireno – “Pratos” - ; foram construídos e testados 3 abrigos deste modelo - “Pratos I”, “Pratos II” e “Pratos III”. Por

24 NodeMcu é uma placa de prototipagem de código aberto com o microprocessador ESP 8266. Mais informações em: http://nodemcu.com/index_en.html

25 Arduino é uma placa de prototipagem com microprocessador ATM328. Mais informações em: <https://www.arduino.cc/>

26 A comunicação com o servidor <http://dados.cta.ufrgs.br> exige adaptações no servidor para que este seja capaz de receber dados de mais sensores.

fim, o quarto foi um abrigo vertical passivo confeccionado com uma garrafa PET 2L e recoberta de alumínio – “PET”. O abrigo comercial usado é do estilo Gill, ou multipratos - “Gill”. Mais detalhes da fabricação e construção de cada abrigo estão no Anexo A – Fabricação e construção dos abrigos meteorológicos .

3.4.1 Pagoda

Este modelo foi desenvolvido pela equipe do CTA e não possui nenhum estudo prévio. Sua fabricação foi feita com uma fresadora CNC, que recortou de uma chapa de polipropileno as peças do abrigo. O uso desta máquina com o polipropileno se mostrou problemática, como detalhado no Anexo A – Fabricação e construção dos abrigos meteorológicos .

O resultado final foi um abrigo de 179 mm de altura e 129 mm de largura com peças como as da foto na Figura 3.4 encaixadas de tal maneira a montarem um abrigo triangular como o da foto da Figura 3.5. Após sua fabricação, notou-se que o polipropileno é translúcido, como pode ser visto na Figura 3.6. Esta propriedade prejudicou a medida de temperatura, pois indica que o Pagoda não foi capaz de proteger o sensor da radiação infravermelha. O Pagoda não apresentou nenhuma instabilidade mecânica durante o período que ficou em campo, exposto ao sol, chuva e ventos.

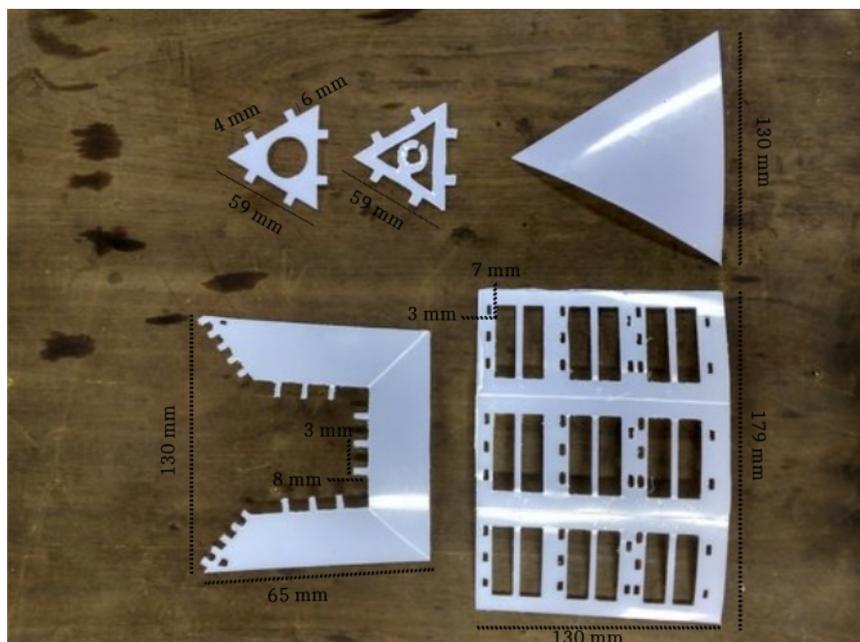


Figura 3.4: Peças do abrigo Pagoda com suas dimensões indicadas.



Figura 3.5: Abrigo Pagoda instalado no INMET; é possível verificar as cintas plásticas usadas para fixá-lo na barra.

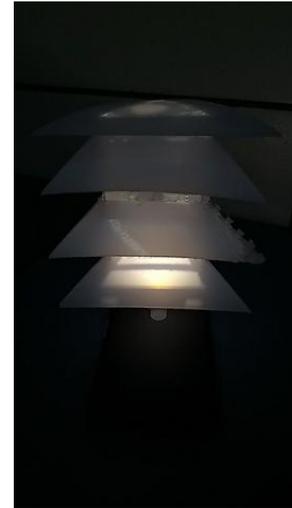


Figura 3.6: Abrigo Pagoda iluminado por uma lâmpada de LED; fica evidente que o material é translúcido pois a luz no seu interior é visível do lado exterior .

3.4.2 Aspirado

O abrigo Aspirado foi baseado no trabalho de Tarara e Hoheisel (2007). Consistiu num tubo PVC com um dos lados tapado e outro aberto e anexado a um cano intermediário ao qual se acoplou um ventilador que força a troca de ar no abrigo. Nas Figuras 3.7 e 3.8 é possível comparar o modelo descrito por Tarara e Hoheisel (2007) e o construído neste trabalho. O custo final da fabricação do Aspirado foi de aproximadamente R\$ 60,00.

Tarara e Hoheisel (2007) mediram durante 11 dias consecutivos a temperatura do ar em 9 diferentes modelos de abrigos artesanais e compararam com um abrigo padrão do tipo passivo do tipo multipratos. O modelo Aspirado apresentou o melhor desempenho, por isso foi o escolhido para esta pesquisa. A temperatura do ar neste modelo tendia a ser menor do que a temperatura medida no abrigo padrão quando a irradiação solar e a velocidade do vento externo eram baixas, porém maior quando a irradiação e a velocidade do vento eram maiores. As temperaturas do ar medidas neste modelo diferiram das da referência numa faixa de $-1,6$ a $1,24^{\circ}\text{C}$, como é possível verificar na Figura 3.9. O fato deste modelo ter alcançado temperaturas similares ao padrão, e frequentemente menores, indica que a ventilação forçada de $4,4\text{m/s}$ foi o suficiente para anular o superaquecimento devido à radiação solar.

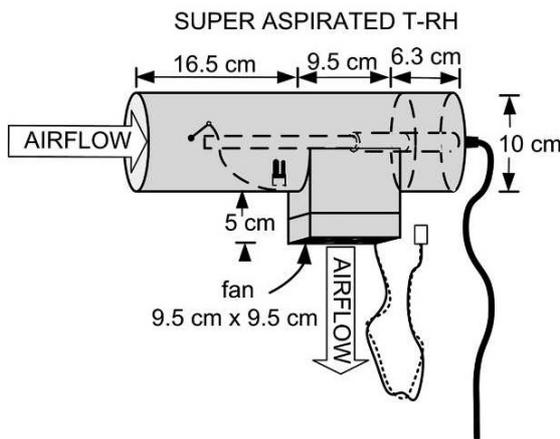


Figura 3.7: Modelo de abrigo aspirado testado por Tarara e Hoheisel (2007). Imagem retirada de Tarara e Hoheisel (2007).

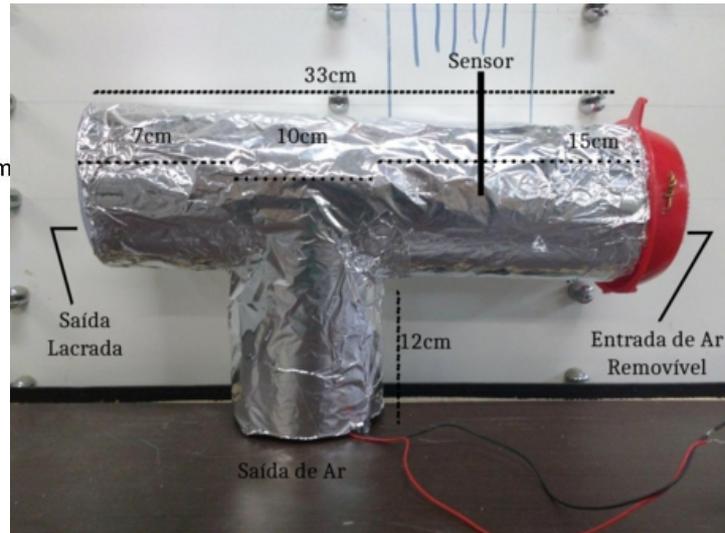


Figura 3.8: Dimensões detalhadas do abrigo Aspirado; uma peneira convencional foi usada como tampa removível, no lado direito, o lado esquerdo foi fechado uma tampa de um pote plástico perdido; o ventilador foi posicionado na saída de ar inferior.

É importante considerar que o recobrimento do abrigo foi feito com embalagens de alumínio, e não com folhas térmicas de alumínio, como sugerido em Tarara e Hoheisel (2007)²⁷. Isso possivelmente aumentou a temperatura das medidas, uma vez que as embalagens de alumínio refletem, mas também absorvem calor. Em contato direto com o PVC, o alumínio irá aquecer as paredes do tubo que, conseqüentemente, irão aquecer o ar no interior do abrigo.

A princípio, a alimentação do ventilador era feita junto com alimentação do sistema, mas devido problemas com a alimentação do sistema, foi trocada e feita separadamente por uma pequena placa solar e um conjunto de baterias. Testes posteriores à instalação desta alimentação mostraram que a bateria era capaz de suportar até dois dias sem alimentação da placa solar. O resultado final, instalado no INMET, pode ser visto nas Figuras 3.10 e 3.11.

Nem o abrigo, nem o sensor, apresentaram danos após os 3 meses expostos em campo. A fixação com barra rosqueada manteve o abrigo firme e fixo durante todo este período. O material aluminizado que cobria o abrigo não descolou, e nem as tampas dianteira e traseira.

²⁷ Esta troca foi feita devida uma tradução indevida do termo “bubble foil wrap” no artigo de Tarara e Hoheisel (2007). O termo foi primeiramente compreendido como “papel de alumínio”, mas só depois do abrigo ter sido construído e instalado é que o termo foi corretamente traduzido para “folhas térmicas”.

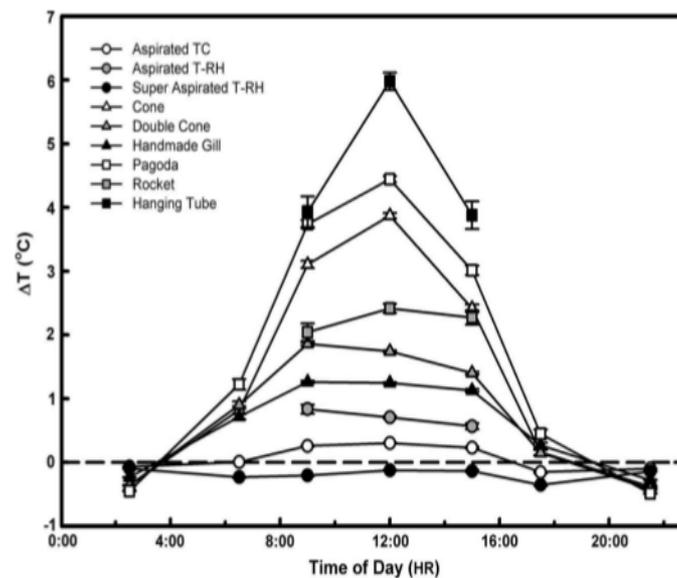


Figura 3.9: Diferença média de temperatura do ar medida (ΔT) entre sensores num abrigo de radiação experimental e o mesmo tipo de sensor num abrigo comercial padrão Gill para cada um dos 7 períodos no qual o dia foi dividido. Os símbolos foram graficados no ponto médio de cada período. As barras de incerteza representam ± 1 desvio padrão. Cada símbolo representa um abrigo de radiação experimental diferente, os círculos são abrigos aspirados, os de mais são abrigos estáticos. O círculo preenchido é o abrigo aspirado testado no presente trabalho. O eixo vertical representa as diferenças de temperatura e o eixo horizontal o horário do dia em horas. Imagem retirada de Tarara e Hoheisil (2007).

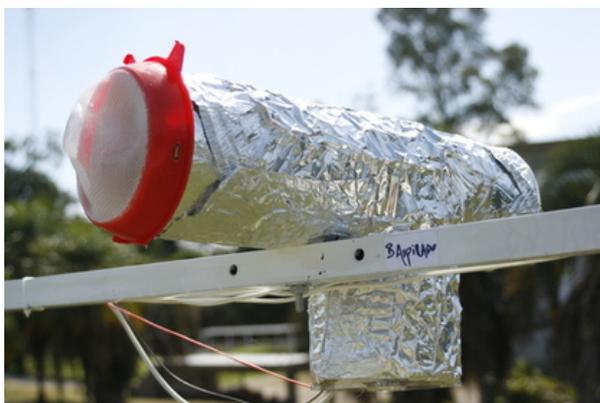


Figura 3.10: Perfil do abrigo Aspirado instalado no INMET.

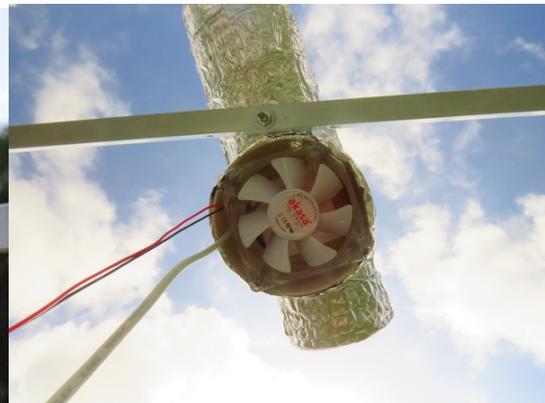


Figura 3.11: Visão inferior do abrigo Aspirado instalado no INMET.

3.4.3 Pratos

Este modelo é baseado no trabalho de Valin Jr. et al. (2016). Nesta pesquisa, 5 modelos de abrigos passivos artesanais foram testados e comparados com um abrigo de referência (estação automatizada Vantage Pro 2TM da marca Davis). Os dados foram coletados em dois períodos de 40 dias cada, na estação quente-úmida e na estação quente-seca de Cuiabá (MT, Brasil). Destes 5 modelos, o modelo de pratos, um modelo de PVC horizontal com ventilação forçada e um modelo

similar ao Stevenson apresentaram o melhor desempenho. No presente estudo optou-se testar o modelo de pratos pois outro abrigo artesanal testado nesta pesquisa já utiliza o modelo de PVC horizontal e porque o modelo de Stevenson já foi extensamente estudado e está estabelecido como abrigo meteorológico convencional. A fim de contribuir ao avanço do conhecimento na área, foi decidido escolher para os testes o modelo de pratos.

O abrigo foi feito com pratos plásticos empilhados, unidos por barras roscadas. Valin Jr. et al. (2016) afirmam que o poliestireno possui como principais características ser impermeável, inquebrável, rígido, leve e brilhante. Na pesquisa, as medidas de temperatura do ar diferiram das do abrigo padrão numa faixa de apenas $-0,52$ a $+1,21^{\circ}\text{C}$, como pode ser visto no gráfico da Figura 3.12. Já as medidas de umidade do ar diferiram entre $-2,89\%$ e $5,79\%$ (Valin Jr. et al., 2016). A Figura 3.13 mostra um esquemático do modelo testado por Valin Jr. et al. (2016).

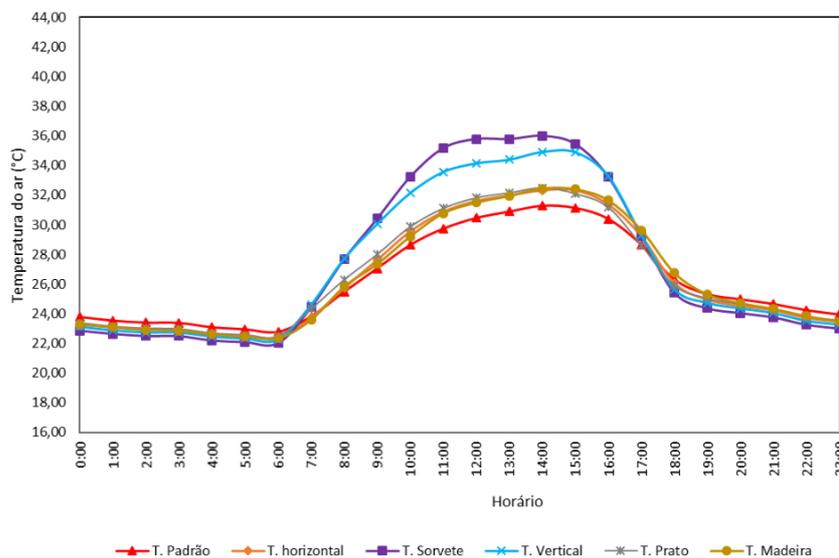


Figura 3.12: Temperaturas medidas no período quente-úmido. A curva vermelha com pontos em triângulo são os valores de referência. A curva cinza com pontos circulares e X são as medidas do modelo de pratos plásticos. Imagem retirada de Valin Jr. et al (2016).

No presente trabalho foram construídos e testados 3 abrigos deste modelo. Os pratos plásticos usados possuíam um diâmetro externo de 24 cm e diâmetro interno de 18 cm, o espaço de 2,5 cm entre cada prato foi garantido com pedaços de mangueira de nível. Cada abrigo possui 7 pratos - sendo dois para o teto - empilhados sob 3 barras de 20 cm. A abertura central do abrigo é de 6 cm de diâmetro.

As peças foram cortas, furadas e pintadas conjuntamente de maneira que os abrigos montados possuem peças fabricadas com as mesmas incertezas. A parte de baixo dos pratos, usadas nesta aplicação para cima, foram pintadas de branco. O sensor foi fixado com uma estrutura de

acrílico e PVC elaborada no CTA – mais detalhes da fabricação no Anexo A – Fabricação e construção dos abrigos meteorológicos .

O posicionamento do sensor dentro do abrigo não foi registrado, podendo estar voltado para diferentes direções em cada um e sendo essa uma possível fonte de incerteza entre os abrigos. Os pratos do abrigo III ficaram claramente mais desalinhados do que os do I e II. Os pratos utilizados têm uma pequena elevação na borda, que pode propiciar o acúmulo de água.

Após o encerramento da coleta de dados, não foi identificado nenhum sinal de danos, apenas alguns sinais de fezes secas de pequenos passarinhos. O resultado final dos abrigos pode ser visto nas Figuras 3.14, 3.15, 3.16 e 3.17.

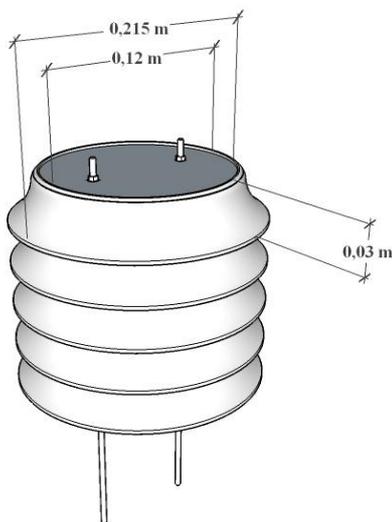


Figura 3.13: Desenho esquemático do abrigo construído por Valin Jr. et al..
Imagens retiradas de Valin Jr. et al (2016).



Figura 3.14: Abrigo Pratos I instalado no INMET.



Figura 3.15: Abrigo Pratos II instalado no INMET.



Figura 3.16: Abrigo pratos III instalado no INMET.



Figura 3.17: Visão geral dos três abrigos Pratos instalados no INMET; da esquerda para direita, abrigo I, II e III.

3.4.4 Pet

Este abrigo meteorológico foi baseado no trabalho de Barbosa, Lamberts & Guths (2008). É um abrigo vertical passivo feito de garrafa PET de 2L recoberta com papel alumínio. A garrafa é usada de “cabeça para baixo”, sem o bico e com aberturas para entrada de ar na lateral, conforme a Figura 3.18.

Barbosa et al. (2008) testaram 14 modelos de abrigos que consistiam numa variação e combinação de garrafas PETs e recipientes aluminizados usados para o transporte de alimentos. Estes modelos foram testados em ambiente fechado com temperatura e radiação controlada por 1 hora e comparados entre si e com um sensor de temperatura de referência. A Figura 3.19 mostra a comparação do modelo Pet com outros 3 modelos e com o sensor padrão. É possível verificar que o valor de temperatura medido no PET acompanha muito bem a curva T_{ar} , (padrão), tendo poucos décimos de diferença durante toda a análise.



Figura 3.18: A esquerda, foto do abrigo montado; a direita, desenho de protótipo do modelo. Imagens retiradas de Barbosa et al. (2008).

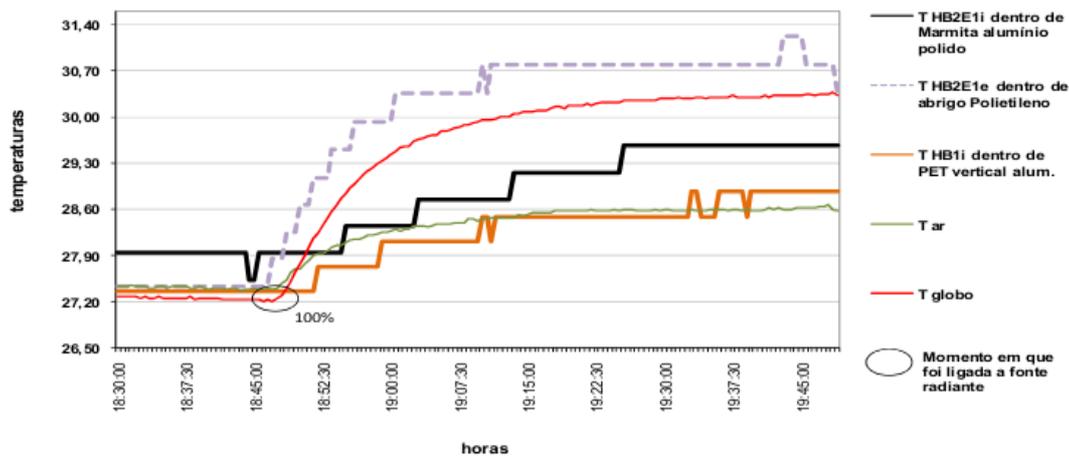


Figura 3.19: Dados obtidos durante o teste dos abrigos. Cada cor é um modelo diferente. A Linha verde representa a medida de referência, a linha laranja representa o abrigo vertical PET aluminizado. Os testes foram feitos em ambiente fechado com fonte de radiação controlada. Imagens retiradas de Barbosa et al. (2008).

O abrigo construído e testado no presente trabalho (Figura 3.21) foi um abrigo de 20 cm de altura, com uma abertura na base de aproximadamente 10 cm e 5 aberturas de 5x4 cm² no topo. No modelo original o teto do abrigo era feito de papel alumínio; por considerar que este material não iria suportar a chuva, foi usado como teto uma assadeira oval de alumínio (5,4cmx3,20cm, 4L). O custo final foi de aproximadamente R\$ 10.

Para fixar o sensor foi feita uma teia de fio nylon na parte superior do abrigo, logo abaixo das aberturas. Na Figura 3.20 é possível ver a entrada de ar inferior e o teto feito com a assadeira. A cinta plástica usada para fixar na estação o atravessa.



Figura 3.20: Visão inferior do abrigo Pet. É possível ver a entrada de ar inferior e o teto feito com a assadeira. A cinta plástica usada para fixar na estação o atravessa.



Figura 3.21: Abrigo Pet instalado no INMET.

Durante os 3 meses que ficou em campo, exposto ao sol, chuva e fortes ventos, bem como interagindo com insetos e pequenos passarinhos, o Pet não foi danificado. O uso de cola quente e

cintas plásticas se mostrou suficiente para a aplicação desejada. Não houve interrupção dos dados e o sensor não apresenta sinais claros de que foi danificado, indicando que o abrigo protegeu o sensor da chuva e geada.

3.4.5 Gill

Um abrigo comercial multiparto, também conhecido como modelo Gill, foi instalado juntamente com os demais abrigos. Como o sistema de aquisição de dados utilizado na estação referência do INMET é diferente do sistema de aquisição de dados utilizado nos abrigos artesanais, escolheu-se instalar este sistema de aquisição também num abrigo padrão. Desta maneira, eventuais erros devido ao sistema de aquisição, ou sensor, e não aos abrigos artesanais, puderam ser identificados. Este abrigo comercial foi cedido pelo Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM).

3.5 Estação de Referência

Os valores de umidade relativa do ar e de temperatura usados como valores de referência, como valores “reais”, bem como as medidas de velocidade do vento, foram medidos pela estação meteorológica automática A801 do 8º Distrito do INMET. A A801 é uma estação meteorológica automática da marca Vaisala, modelo MAWS 301²⁸. Ela coleta informações de temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade dos ventos e radiação solar. A cada hora, disponibiliza os dados para serem transmitidos (via satélite ou telefonia celular), para a sede do INMET, em Brasília. O conjunto dos dados recebidos é validado, através de um controle de qualidade, armazenado em um banco de dados e disponibilizado publicamente via internet²⁹ no fuso horário 0 UTC (Brasil, 2011).

A medida de temperatura é realizada por um termo resistor Pt100. Seu abrigo meteorológico, Figura 3.22, é do estilo multipratos, possui aproximadamente 30 cm de altura e 20 cm de diâmetro e está a 1,80 m de altura. A amostragem dos dados é feita a cada 5 segundos, mas o valor “instantâneo” disponibilizado é a média do primeiro minuto da hora (equivalente às 12 primeiras medidas da hora). A amostragem dos dados de umidade relativa do ar foram feitas da

28 O datasheet deste modelo de estação meteorológica indica que o sensor de temperatura e umidade relativa incluso são do modelo QMH102, porém não foi encontrado no site da Vaisala especificações deste modelo.

29 Os dados disponibilizados pelo INEMT podem ser acessados em http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/pg_automaticas.php

mesma maneira. As medidas de velocidade do vento tem uma amostragem de 1 s, e os dados disponibilizados usam valores médios de cada 1 min (INMET, 2011).



Figura 3.22: Abrigo meteorológico da estação A801, do INMET, usado como abrigo de referência.

3.6 Caderno de laboratório aberto e ferramentas livres

Com a ambição e genuíno interesse de fazer deste um projeto que contribui para o avanço da ciência aberta, todo o processo de pesquisa foi permeado por ferramentas livres e registrado em cadernos de laboratório disponibilizados publicamente³⁰.

Na escolha das ferramentas usadas neste trabalho foi sempre priorizada a versão livre³¹ disponível delas. Desde o sistema operacional, passando pelo *software* de edição de texto, até fresadora utilizada para confecção da placa de aquisição de dados.

A documentação da pesquisa foi realizada no formato de caderno de laboratório aberto. O caderno de laboratório aberto é uma prática comum na ciência aberta e tem como objetivo disponibilizar publicamente as anotações, estudos, códigos, testes e demais etapas de uma pesquisa. As diversas etapas desta pesquisa foram registradas, ao longo de seu desenvolvimento, no site do CTA (<http://cta.if.ufrgs.br>) e no repositório git do CTA (<https://git.cta.if.ufrgs.br/>). Todos os dados analisados foram disponibilizados nas mesmas plataformas e podem ser analisados por qualquer um. Estão sob a licença Creative Commons BY-SA 4.0³², o que significa que podem ser usadas para qualquer fim contanto que se cite a autora e que seu uso derivado possua a mesma licença de uso. Detalhes sobre o endereço eletrônico de cada um estão no Anexo B - Caderno de Laboratório Aberto.

³⁰ A licença de cada material está disponível junto a ele.

³¹ Vale reforçar que livre, neste caso, não vem de gratuito, mas de liberdade.

³² O texto completo em português está disponível em: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.pt>

3.7 Caracterização de instrumentos meteorológicos

A caracterização consistiu em calcular os desvios médios e máximos das medidas realizadas, o que consiste na exatidão do experimento. Quando adequado, os desvios padrão, tanto da amostra, quanto da população, são calculados e associados a incerteza e precisão do experimento. No caso dos sensores DHT22, foi estimado o quão distantes os valores das medidas de cada sensor são dos valores “reais”. Ao medir a exatidão de diversos sensores, foram estimadas as distribuições de exatidões da população utilizando o método descrito na sessão 2.4. Além disso, a informação sobre quão distantes estão as medidas de cada sensor dos valores reais foi utilizada para recalibrar cada sensor a fim de aprimorar a confiança em relação ao apresentado no *datasheet* do fabricante. Estes sensores recalibrados foram então utilizados para a caracterização dos abrigos meteorológicos. Da comparação entre as medidas feitas nos abrigos testados e as medidas de referência se estimou a exatidão desses abrigos.

Os cálculos e gráficos estatísticos realizados foram feitos com linguagem de programação R³³, com apoio do software Rstudio³⁴. O R é uma linguagem e um ambiente de desenvolvimento para cálculos estatísticos e gráficos. O Rstudio é um ambiente de desenvolvimento integrado para o R. Ambos são *software livre*, bem como todos os códigos desenvolvidos neste projeto. Mais informações sobre o código desenvolvidos estão no Anexo B - Caderno de Laboratório Aberto.

Nos cálculos foram considerados todos os dígitos possíveis, deixando o arredondamento como último passo, já ao apresentar os valores de desvio padrão o último algoritmo significativo considerado foi aproximadamente um a mais (segunda casa decimal) do que o definido pela resolução do sensor (0,1°C e 0,1% UR), como sugerido por Benvington e Robinson (2003).

3.7.1 Caracterização e calibração do DHT22

Para realizar a calibração e caracterização dos sensores utilizados no restante da pesquisa foi realizada uma coleta de dados em ambiente fechado. Foram coletadas medidas de temperatura e umidade relativa do ar de 7 DHT22's durante 10 dias. Desses, 6 são as mesmas unidades utilizadas nas seguintes etapas desta pesquisa. A cada sensor foi atribuída uma etiqueta com uma letra, de “A” a “F”, e esta etiqueta permaneceu associada a cada sensor até o final do trabalho. Apenas o sensor A foi trocado no decorrer da pesquisa.

Para garantir o equilíbrio térmico entre os sensores, as medidas foram feitas dentro de uma caixa de isopor fechada, com a circulação interna de ar forçada por um ventilador de baixa potência

33 Mais informações, licenças e códigos fontes disponíveis no site oficial: <https://www.r-project.org/about.html>

34 Mais informações, licenças e códigos fonte disponíveis no site oficial: <https://www.rstudio.com/>

posicionado como mostra a foto da Figura 3.23. Os sensores foram fixados na parede da caixa na ordem alfabética de seus rótulos.

Apesar da placa de controle ter ficado dentro da caixa durante a coleta, a sua influencia deve ser igual para cada sensor em função da ventilação forçada. O orifício pelo qual os cabos de alimentação da placa e do ventilador passavam era justo, praticamente bloqueando a troca de ar entre o meio interno e externo.

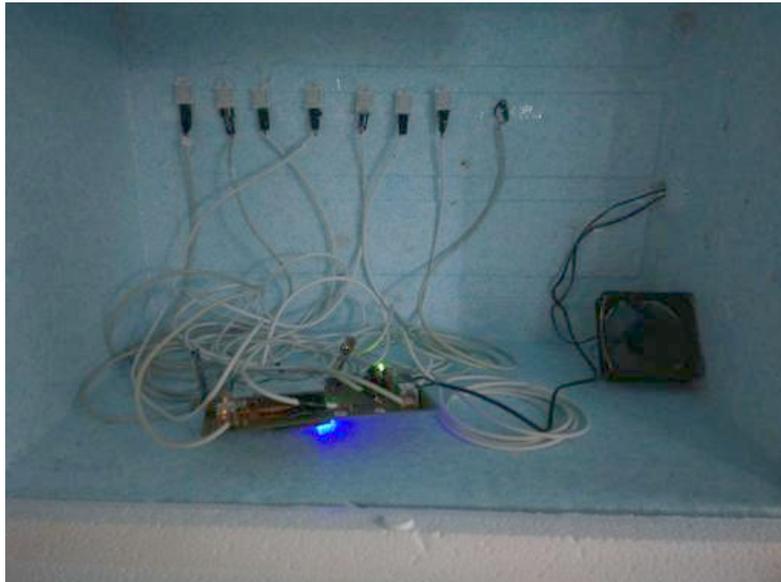


Figura 3.23:

Figura 3.23: Disposição dos sensores dentro da caixa de isopor; a direita, o ventilador e, ao centro, a placa de controle. Da esquerda para a direita os sensores estão posicionados de A a g em ordem alfabética.

A escolha da caixa de isopor se deu pela sua característica de isolante térmico, visando garantir a uniformidade da temperatura no interior da caixa. A caixa estava apoiada em uma mesa a cerca de 1 m do chão, dentro do Centro de Tecnologia Acadêmica, a uma distância de aproximadamente 3 m de uma janela, e 7 m da porta. No teto, a aproximadamente 4 metros de distância da caixa, havia um condicionador de ar que foi ligado, ocasionalmente, durante o período mais quente do dia. Por isso, espera-se que os dados mostrem uma queda de temperatura diferenciada durante o dia. A calibração foi feita a temperatura quase constante (entre 26,5°C e 28.5°) por falta de infraestrutura de controle de temperatura.

Para corrigir a exatidão das medidas de temperatura de cada DHT22 em relação às medidas de referência, foi determinado e subtraído destas um *offset* de cada sensor. O *offset* é equivalente ao ΔT médio de cada sensor foi calculado a partir da equação

$${}^i offset = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M {}^i T_j - TRef_j$$

Equação 3.2

onde i representa cada sensor (A, B, C, D, E, F e G), j é cada medida, M é o número total de medidas coletadas por cada sensor avaliadas e $Tref$ é a média de cada medida de todos os sensores. Este processo força que a média das medidas de todos os sensores estejam a mesma distância do valor “real”. Assume-se então que a calibração corrige a exatidão do sensor, mas não altera a precisão do sensor.

A medida de umidade relativa do ar possui forte dependência com temperatura e com sua faixa de operação, por isso os testes para sua calibração requerem um ambiente com umidade e temperatura controlados. Devido a falta de infraestrutura e disponibilidade de insumos, a calibração das medidas de umidade relativa do ar do DHT22 não foi realizada.

Após a coleta de dados em campo, os 7 sensores devem passar pelo mesmo processo de calibração. Seus resultados e *offsets* devem permanecer os mesmos, caso contrário, a calibração efetuada perde o valor.

3.7.2 Caracterização dos abrigos meteorológicos

O desempenho de um sensor está associada aos desvios Δ das medidas temperatura (T) e umidade relativa do ar (U_{mid}) em relação às medidas de referência ($Tref$ e U_{midRef}), onde

$$\Delta T = T - TRef$$

$$\Delta U = U_{mid} - U_{midRef}$$

ΔT positivos indicam que o abrigo tende a aquecer o sensor ou o ar interno, que permite a passagem de radiação infravermelha e/ou não possuem boa ventilação; ΔT negativos indicam que o abrigo tendem a esfriar o sensor ou o ar no seu interior, o que tipicamente ocorre durante o período noturno, ou que o abrigo apresenta um melhor desempenho do que a referência. Outros fatores, como diferenças na posição dos abrigos comparados, podem causar essas diferenças.

Para as medidas de temperatura, a calibração permitiu corrigir a exatidão do sensor, mas não alterou a precisão. Entretanto, como foram observados valores diferentes entre a precisão dos sensores, as diferenças ΔT (médias e máximas) entre as medidas dos abrigos e da referência foram comparadas com a precisão observada dos sensores (calculadas na caracterização descrita em

3.7.1). Para estas comparações com a precisão observada, a precisão foi considerada como sendo três desvios padrão das distribuição de de valores. Consideramos que nos casos em que a diferença é menor do que a recomendação da WMO, o abrigo apresentou um bom desempenho. Quando é menor do que a precisão observada do sensor, não é possível observar efeito do abrigo nas medidas, pois sua influência é menor do que a capacidade do sensor de distinguir as medidas. Se é maior, isto é uma evidência de que as medidas de temperatura sofreram influência do abrigo. Como a caracterização foi realizada a temperatura - quase - constante não podemos descartar a hipótese de que a precisão do sensor é uma função da temperatura, os valores de precisão observados nesse trabalho podem estar subestimados, portanto as diferenças foram também comparadas à precisão do DHT22 como especificada pelo fabricante.

Para as medidas de umidade relativa do ar, os valores de Δ e de incerteza foram comparados com a precisão especificadas pelo fabricante Nos casos em que as diferenças estão dentro das recomendações da WMO, o abrigo apresentou um bom desempenho, quando estão dentro da faixa de exatidão do sensor, não é possível observar efeito do abrigo nas medidas. Valores de ΔT_{MAX} fora desta faixa indicam que a presença do abrigo alterou as medidas.

De acordo com a ISO 17714:2007³⁵ (como citado por Lacombe et al., 2011), abrigos meteorológicos que são mais frios durante o dia e mais quentes durante a noite têm maiores chances de darem medidas mais próximas da “real”. Logo, foram analisadas as amplitudes térmicas diárias e os valores máximos diários.

Para o modelo Pratos, que possui 3 réplicas, será estimado o desvio padrão das diferenças. Nesta etapa da caracterização, os resultados dos Pratos foram comparados aos resultados do abrigo Gill, não do A801. O número de medidas comparadas com o A801 é de apenas 408 - limitação imposta pela disponibilidade de dados do próprio A801 -, já o número de medidas do Gill disponíveis é o mesmo que dos três abrigos Pratos: 122 384. Por isso o abrigo Gill foi usado como referência nas comparações a seguir. Para os demais abrigos o desvio padrão calculado foi o da amostra.

Para melhor visualizar o comportamento geral das variáveis, seus histogramas foram analisados. Os histogramas das diferenças informam, visualmente, onde a distribuição está centrada, qual a densidade dos valores nos diferentes pontos da distribuição e a extensão desta distribuição. A largura das colunas dos histogramas – em % de umidade relativa do ar - variam entre 0,05 e 0,1 nos gráficos de temperatura, e 0,25 e 0,5 nos gráficos de umidade relativa do ar.

35 A ISO17714:2007, documento desenvolvido pela International Organization for Standardization, define características dos abrigos meteorológicos e define normas de métodos de comparação de performance de abrigos meteorológicos. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/31498.html>

Com o objetivo de avaliar a ventilação de cada abrigo, será calculada a função da reta de correlação entre a velocidade do vento medida pela estação do INMET e os ΔT do mesmo instante. Para abrigos bem ventilados, a relação é pequena, enquanto para abrigos mal ventilados, velocidades de vento mais baixas resultam num ΔT mais alto.

4 Resultados e Discussão

4.1 Caracterização e Calibração dos DHT22's

Nesta seção estão apresentados os resultados da caracterização e calibração de 7 DHT22s, como descritos na seção 3.7.1. A faixa de temperatura analisada vai de 26,5 a 28,8°C e a umidade relativa do ar vai de 45 a 61%. Foi analisado um período de 10 dias com amostragem de 1 min (1 em 1 min).

4.1.1 Temperatura

O comportamento geral dos sensores pode ser conferido na Figura 4.1, que traz as médias por hora de temperatura para cada sensor ao longo dos 10 dias no interior da caixa de isopor. Fica evidente que o comportamento de todos os sensores é o mesmo mas que suas curvas estão deslocadas umas das outras por uma constante. Esta consistência garante que o erro não tem uma origem aleatória.

Para avaliar o desvio de cada sensor, foram montados histogramas que apresentam o desvio da medida instantânea de cada sensor em relação a temperatura referência. A temperatura referência foi tomada como sendo a média das medidas de cada sensor. As diferenças ΔT variaram dentro do intervalo de $\pm 0,5^\circ\text{C}$, abaixo da exatidão do sensor segundo o seu *datasheet*, como fica evidente Figura 4.2. e Tabela 4.1. Os sensores D e F apresentam um desvio negativo acentuado, enquanto os sensores C, E e G apresentam um desvio positivo. Já os sensores A e B estão centrados em 0.

A primeira informação obtida desta análise corresponde aos *offsets* de cada sensor, calculados através da equação 3.2. Eles variaram de $-0,5^\circ\text{C}$ até $0,4^\circ\text{C}$, todos dentro da faixa de exatidão nominal do sensor. Os desvios padrão de cada sensor, na terceira coluna da Tabela 4.1, indicam uma precisão melhor do que precisão apresentada pelo fabricante no *datasheet* do sensor ($0,2^\circ\text{C}$), mesmo se considerarmos dois ou três desvios padrões a fim de aumentar a confiança nos valores observados. Utilizando a equação 2.4 nos valores da Tabela 4.1, foi encontrado que desvio padrão estimado para os *offsets* da temperatura da população de DHTs é $0,25^\circ\text{C}$. A incerteza é então de $0,5^\circ\text{C}$, pouco mais do dobro da precisão nominal. Esta incerteza é próxima da precisão nominal para 68% das medidas, mas diferente quando considerada 98% das medidas. Os resultados demonstram que as especificações do fabricante estão próximas ao comportamento do sensor nesta faixa de temperatura.

Mesmo assim, foi considerada na análise uma incerteza equivalente a três desvios padrão da precisão medida de cada sensor, referida no trabalho como “precisão observada”. Os valores variam entre $0,09^{\circ}\text{C}$ e $0,12^{\circ}\text{C}$, considerando que a resolução do sensor é de $0,1^{\circ}\text{C}$, todos os resultados foram arredondados para $0,1^{\circ}\text{C}$.

Sensor	Offset ($^{\circ}\text{C}$)	S ($^{\circ}\text{C}$)
A	0,0	0,03
B	0,0	0,03
C	0,1	0,03
D	-0,4	0,03
E	0,3	0,04
F	-0,3	0,03
G	0,2	0,03

Tabela 4.1: Offsets observados para os sete sensores de cada DHT22.

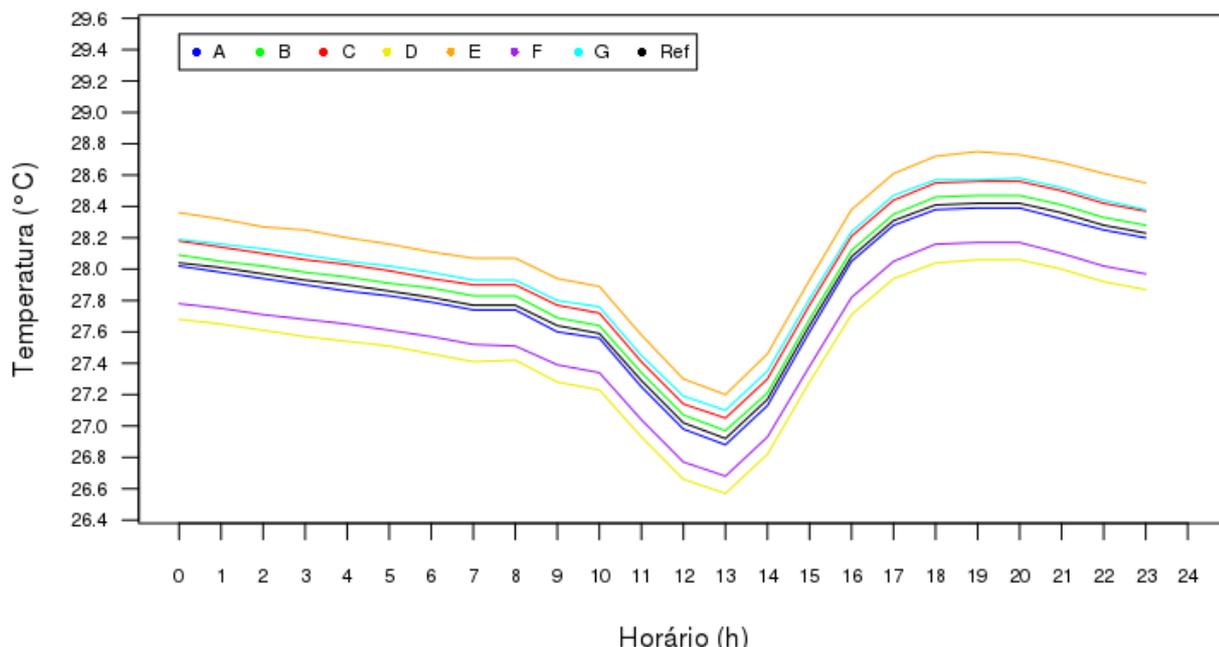


Figura 4.1: Temperatura média por hora de cada sensor do teste de caracterização; o valor de referência usado consiste na média dos valores medidos pelos sensores.

Para a calibração, os *offsets* da Tabela 4.1 foram subtraídos de cada sensor. Após aplicar a calibração, as diferenças foram novamente calculadas. O histograma da Figura 4.3 traz a distribuição de ΔT de todos os sensor, sem discriminá-los. Os valores calibrados variam principalmente entre $+0,1^{\circ}\text{C}$ e $-0,2^{\circ}\text{C}$. Esta variação era esperada, pois esta calibração pretendia melhorar a exatidão das medidas, não sua precisão. A média zero não significa que todas as

diferenças foram nulas e que a “máxima” exatidão foi alcançada, pois foi subtraída de cada uma a exata diferença média e a referência usada é a média dos resultados. Logo, a calibração centrou os resultados de cada sensor na média, e a diferença de cada um em relação a média será nula.

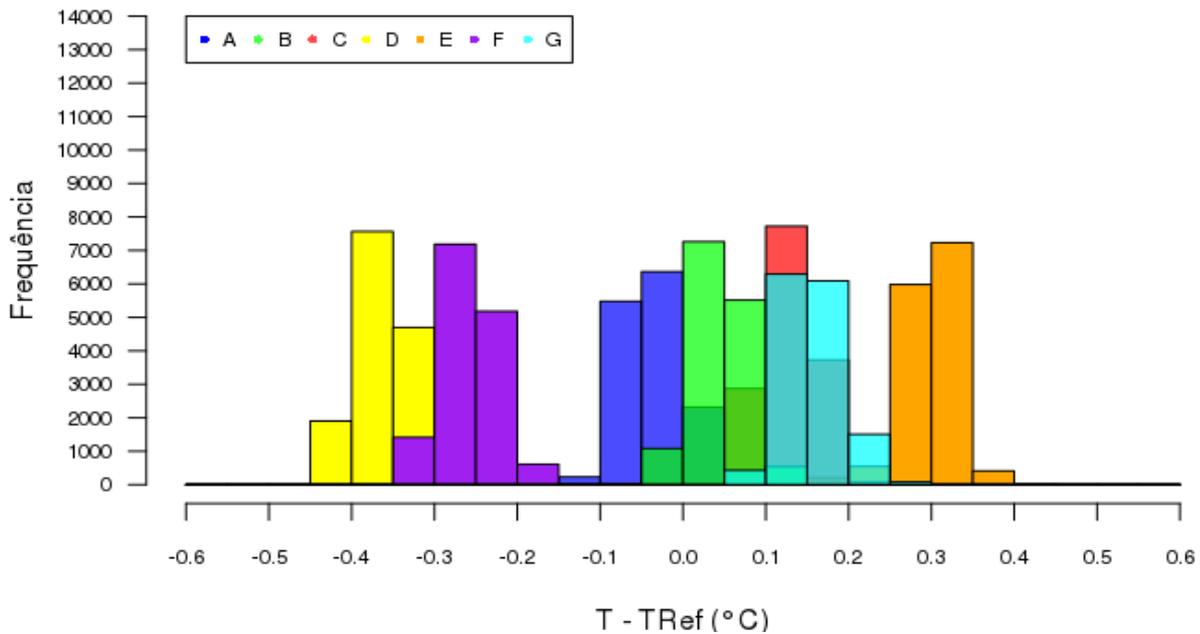


Figura 4.2: Histograma de ΔT de cada sensor do teste de caracterização do DHT22; o valor de referência usado consiste na média dos valores medidos pelos sensores.

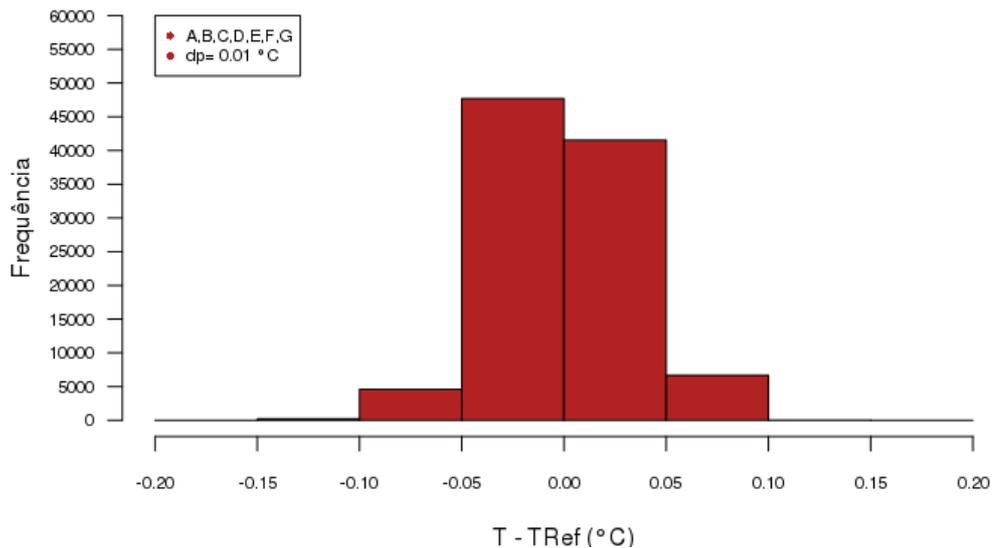


Figura 4.3: Histograma de ΔT do teste de caracterização após a calibração.

Após a coleta de dados para calibração, o sensor A foi danificado e trocado, por isso não foi aplicada a calibração a ele. Foram adicionados alguns metros de fio a cada sensor, de maneira

que possíveis influências da resistência do fio foram consideradas desprezíveis e ignoradas. Como o DHT é um sensor feito para medidas de longa distância (até 20 m), e o comprimento máximo de fio utilizado foi 8 m, e seu sinal de saída é digital, o efeito do comprimento do fio pode ser negligenciado. A pós-calibração não foi realizada, mas conforme for, seus resultados serão registrados no caderno de laboratório correspondente.

4.1.2 Umidade relativa do ar

O comportamento geral dos sensores pode ser conferido na Figura 4.4, que traz as médias por hora de umidade relativa do ar para cada sensor. É possível verificar que todas as curvas seguem o mesmo comportamento, mas estão deslocadas de uma constante, assim como a temperatura.

A Figura 4.5 mostra os histogramas de ΔU de cada sensor. Este gráfico permite visualizar as informações da Tabela 4.2, mas também deixa evidente que as diferenças se concentram em valores bem diferentes, concentrados em -4%, 0% e 6%. Os sensores B, C, D e G apresentam ΔU menores do que $\pm 2\%$, a exatidão do DHT22. Os sensores A e F apresentam valores maiores do que $\pm 2\%$, mas menores do que a exatidão máxima de $\pm 5\%$, enquanto o valor do sensor E foi superior a $\pm 5\%$.

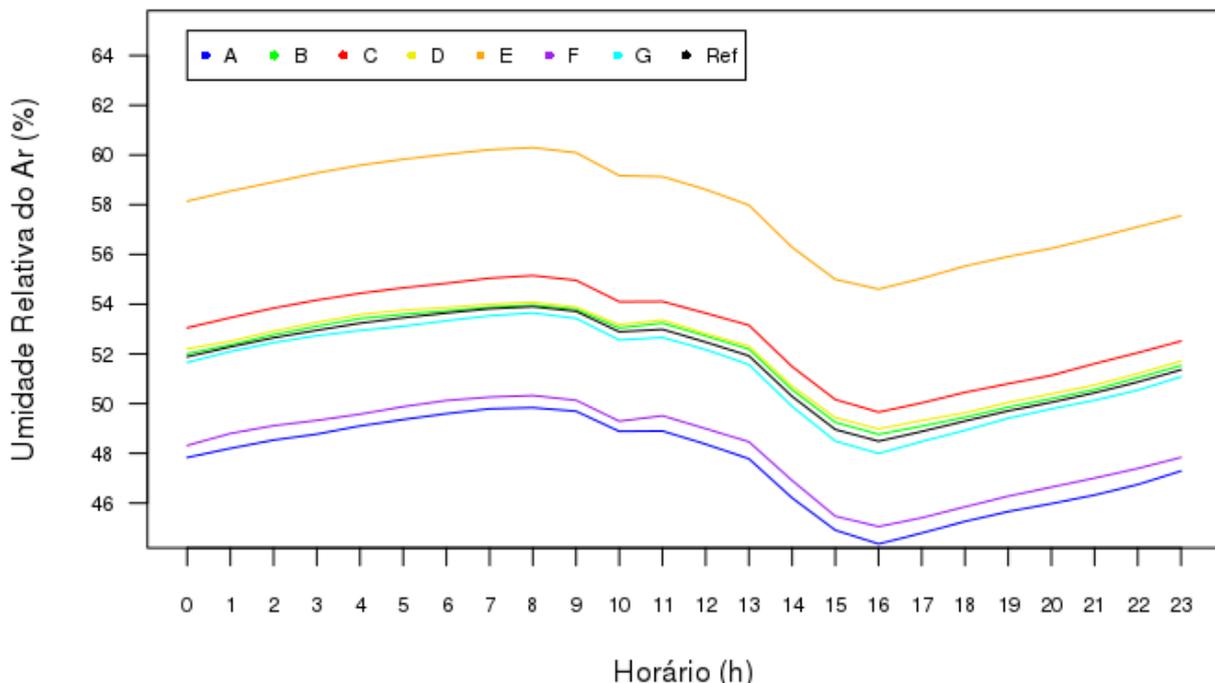


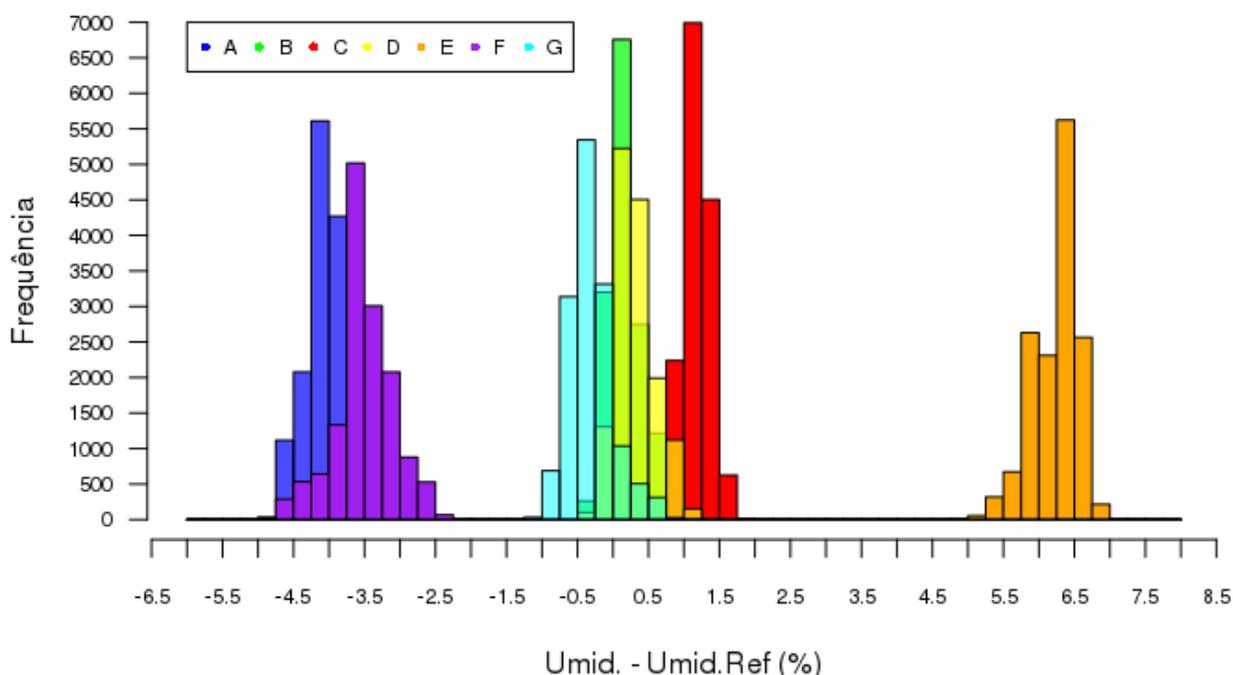
Figura 4.4: Umidade relativa do ar média por hora de cada sensor do teste de caracterização do DHT22; o valor de referência usado consiste na média dos valores medidos pelos sensores.

Utilizando a equação 2.4 nos valores da Tabela 4.2, o desvio padrão estimado encontrado para os *offsets* da umidade relativa do ar da população de DHTs é 3,4%, logo, sua incerteza é de 6,8%. Este valor supera em quase 7 vezes a precisão nominal do sensor, demonstrando que o comportamento das umidades relativas do ar estão em desacordo com as especificações do fabricante.

Sensor	Offset (%)
A	-4,1
B	0,2
C	1,2
D	0,30
E	6,2
F	-3,5
G	-0,3

Tabela 4.2: *Offsets observados para os sete sensores de cada DHT22.*

Estes resultados alertam que as especificações do fabricante não representam o comportamento do DHT22 para medidas de umidade relativa. A ausência de maiores detalhes sobre as características do sensor em diferentes temperaturas limita maiores conclusões.



Com o objetivo de investigar a origem deste comportamento, as informações fornecidas no *datasheet* do DHT22 foram comparadas com a de sensores de umidade relativa do ar e temperatura fabricados pela Vaisala. A Vaisala foi escolhida porque como seus sensores já foram escolhidos como referência em diversas pesquisas (Nordli et al., 1997; Tarara & Hoheisel, 2007; Lacombe et al., 2011; Smoot & Thomas, 2012; Holden et al., 2013; Yang et al. 2016) ela foi considerada uma fabricante de referência. Na Tabela 4.3 estão listados a exatidão de 3 sensores de temperatura e umidade relativa do ar fabricados pela Vaisala.

Modelo	Exatidão em Temperatura	Exatidão em Umidade relativa do ar	Preço ³⁶	Nome completo
HMS83	$\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ a 20°C	$\pm 3\%$ de 0 a 90% , $\pm 5\%$ de 90 a 100% , entre $+10$ a $+30^{\circ}\text{C}$	US\$290	Outdoor Humidity and Temperature Transmitter for Building Automation

36 Preços consultados na loja online da Vaisala: <https://store.vaisala.com/us/>

HMS112	$\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ a 20°C	$\pm 2\%$ de 0 a 90% , $\pm 3\%$ de 90 a 100% , entre $+10$ e $+30^{\circ}\text{C}$	U\$470	Outdoor Humidity and Temperature Transmitters for High-Accuracy Measurements in Building Automation Applications
HMT120	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ entre $+15$ e 25°C	$\pm 1,5\%$ de 0 a 90% , $\pm 2,5\%$ de 90 a 100% , entre 0 e 40°C	U\$1115	Humidity and Temperature Transmitters for Cleanrooms and Light Industrial Applications

Tabela 4.3: Valores de exatidão de sensores de temperatura e umidade relativa do ar de 3 sensores fabricados pela Vaisala.

Todos os documentos verificados indicavam uma faixa, ou um valor, para qual o valor de exatidão indicado era válido. Isso permite uma análise mais confiável dos dados à medida que a pesquisadora pode considerar estes erros na análise. Todos os modelos possuem uma exatidão nas medidas de temperatura melhores do que a do DHT22, o que era de se esperar. Porém, o mesmo não acontece nas medidas de umidade. O modelo HMS83 possui uma exatidão de umidade relativa do ar pior do que a do DHT22, alcança a mesma exatidão máxima, mas custa quase 100 vezes mais (considerando o preço do DHT22 de U\$3,00). Já o modelo HMS112 possui a mesma exatidão que o DHT22, mas custa quase 160 vezes mais.

Apesar de custo maior não significar maior qualidade, as diferenças evidenciadas reforçam a dúvida sobre a validade de as especificações do DHT 22 em relação as medidas de umidade relativa do ar.

4.2 Caracterização dos abrigos meteorológicos

Os dados analisados são do período de 22 de Maio a 7 de Junho, com as medidas de temperatura calibradas como descrito em 4.1.1. A amostragem foi de 20 segundos, totalizando 122400 medidas. Para a comparação com os dados do INMET, foi realizada a média dos primeiros

3 min de cada hora, equivalente a 15 medidas, totalizando 408 pontos (para cada abrigo). A faixa de temperatura medida variou entre 10 e 25°C e as de umidade relativa do ar variaram entre 50 a 100%. Já na caracterização da população de abrigos pratos I, II e III, os dados foram comparados aos do abrigo Gill e os valores comparados foram as médias de cada minuto. Mais informações sobre as condições climáticas do período de testes no Anexo C - Detalhes sobre o local período dos teste.

4.2.1 Temperatura

As curvas das médias de temperatura por hora de cada abrigo - incluindo a média de todos os abrigos -, Figura 4.6, segue o padrão do Outono gaúcho. Durante o período noturno, entre 00h e 8h, e entre 17h e 23h, as temperaturas são baixas e praticamente não variam. Durante o período diurno, a temperatura sobe rapidamente, com máximos durante o meio-dia e início da tarde, quando começa a cair.

A Figura 4.7 mostra a curva dos ΔT médios de cada hora. A diferença entre os abrigos Gill (G) e A801 (Ref), e também entre o Pratos I (C), II (D) e III (F), são quase imperceptíveis (nesta escala). O abrigo Pagoda (A) é o que apresenta diferenças mais destacadas, seguido dos abrigos Aspirado (B) e Pet (F).

Os abrigos Pagoda e Pet apresentaram o maior ΔT_{MED} , 0,6°C, e também as maiores ΔT_{MAX} , 5,4°C e 4,7°C, respectivamente (Tabela 4.4). Dos abrigos de baixo custo, os abrigos Pratos I, II e III apresentaram a menor ΔT_{MAX} . Os abrigos Pratos I, II, III e Gill apresentam um ΔT_{MED} dentro da precisão nominal do DHT22 ($\pm 0,2^\circ\text{C}$), mas todos os abrigos apresentaram ΔT_{MAX} (e ΔT_{MIN}) maiores (menores) do que esse valor. Os Pratos I, II e III e Gill mostraram um bom desempenho por que estão dentro das recomendações da WMO no quesito exatidão (desvio padrão menor que $\pm 0,2^\circ\text{C}$). No histograma dessas diferenças, Figura 4.8, se verifica que as diferenças se concentram entre -1°C e $+1^\circ\text{C}$, mas possuem longas caudas que se estendem até $+5^\circ\text{C}$.

Abrigo	ΔT_{MED} (°C)	ΔT_{MIN} (°C)	ΔT_{MAX} (°C)	$2S_{dif}$ (\pm °C)
Pagoda (A)	0,6	-1,1	5,4	3,27
Aspirado (B)	0,3	-1,3	4,4	2,60
Pratos I (C)	0,2	-0,7	1,6	0,47
Pratos II (D)	0,2	-0,8	1,5	0,50
Pratos III (E)	-0,2	-1,1	1,7	0,55
Pet (F)	0,6	-1,2	4,7	2,27
Gill (G)	0,1	-0,9	1,4	0,43

Tabela 4.4 Média, mínimo e máximo da diferenças entre a temperatura medida em cada abrigo e da temperatura de referência, bem como a incerteza destas distribuições.

Na regressão linear das médias diárias de ΔT e da velocidade do vento, a Figura 4.9, a diferença de temperatura dos abrigos Pagoda e Pet aumentam rapidamente com a diminuição da velocidade do vento. O comportamento do abrigo Aspirado se compara ao desses dois abrigos passivos, quando deveria ser contrária. Destaca-se também a curva do Pratos III, que possui uma variação maior do que os Pratos I e II. Os demais abrigos não apresentam grandes alterações na diferença de temperatura com a mudança na velocidade do vento. Mais informações sobre a regressão linear no Anexo E - Velocidade do vento e regressão linear

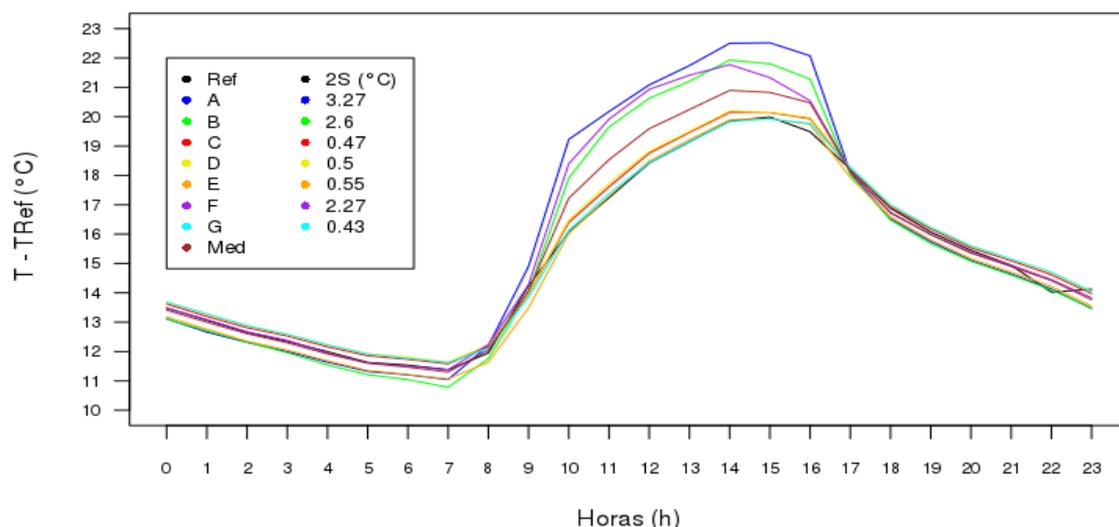


Figura 4.6: Média da temperatura por hora de cada abrigo. "Ref" são as medidas da estação A801 e "Med" é o valor médio de todos os abrigos. No quadro, está associada a cada abrigo o valor da incerteza associada. Dados do período de 22 de Maio a 7 de Junho de 2018. Etiquetas dos abrigos: A = Pagoda, B = Aspirado, C = Pratos I, D = Pratos II, E = Pratos III, F = Pet, G = Gill.

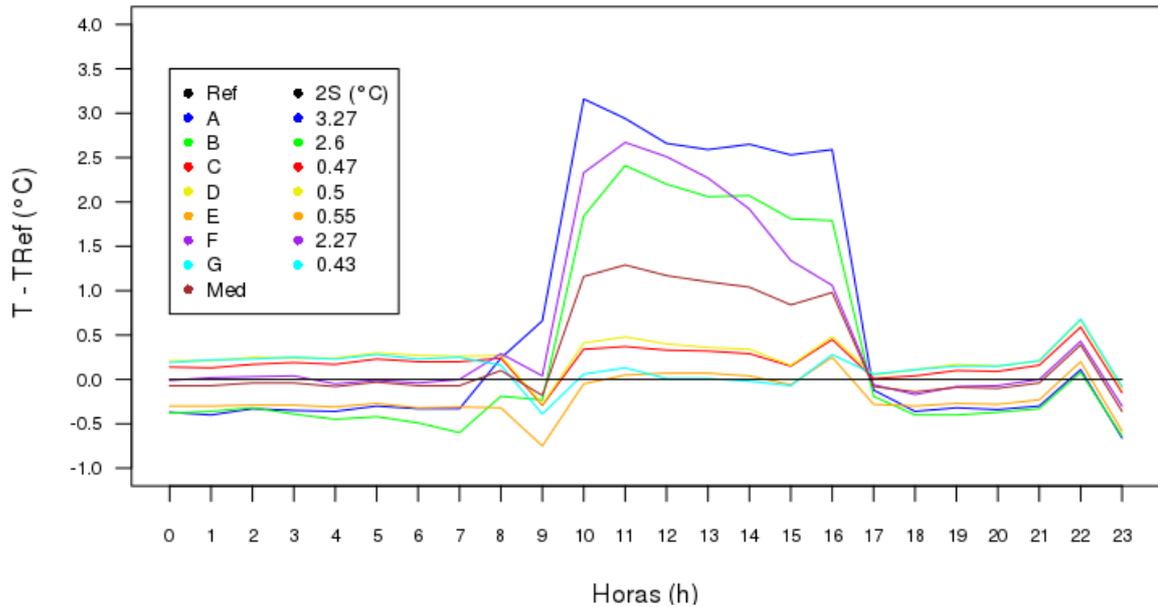


Figura 4.7: Diferenças ΔT entre as temperaturas médias de cada hora de cada abrigo. "Ref" são as medidas da estação A801 e "Med" é o valor médio de todos os abrigos. No quadro, está associada a cada abrigo o valor de 2 desvios padrão das diferenças. Dados do período de 22 de Maio a 7 de Junho de 2018. Etiquetas dos abrigos: A = Pagoda, B = Aspirado, C = Pratos I, D = Pratos II, E = Pratos III, F = Pet, G = Gill.

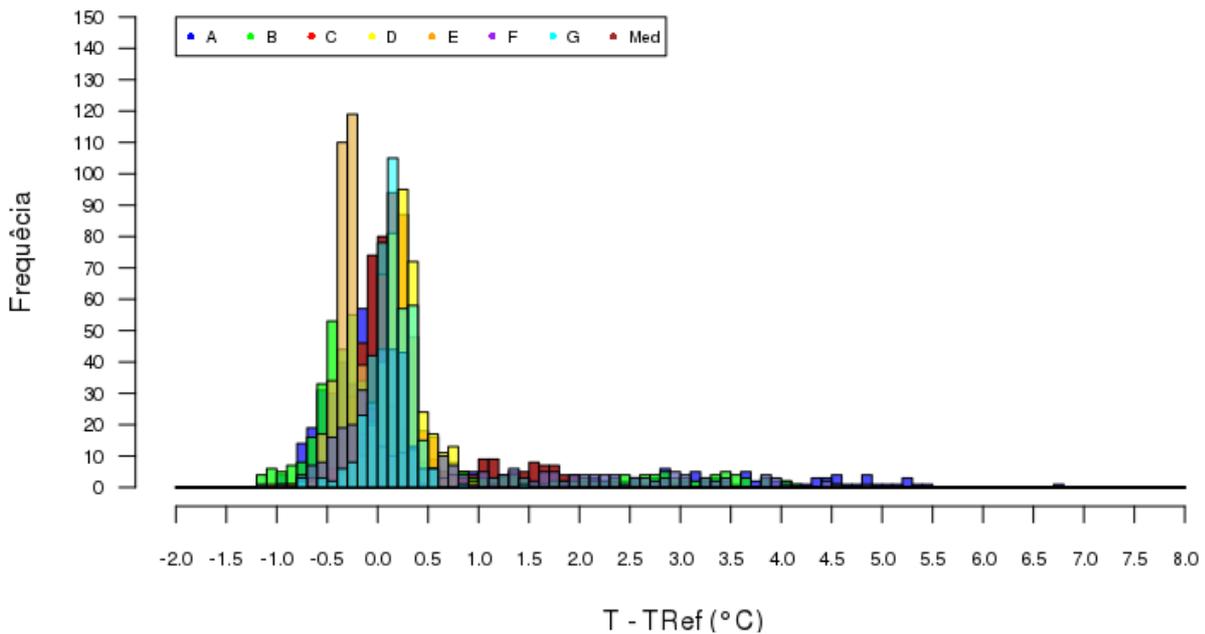


Figura 4.8: Histograma da distribuição das diferenças ΔT de temperatura de cada abrigo e do seu valor médio. Dados do período de 22 de Maio a 7 de Junho de 2018. Etiquetas dos abrigos: A = Pagoda, B = Aspirado, C = Pratos I, D = Pratos II, E = Pratos III, F = Pet, G = Gill.'

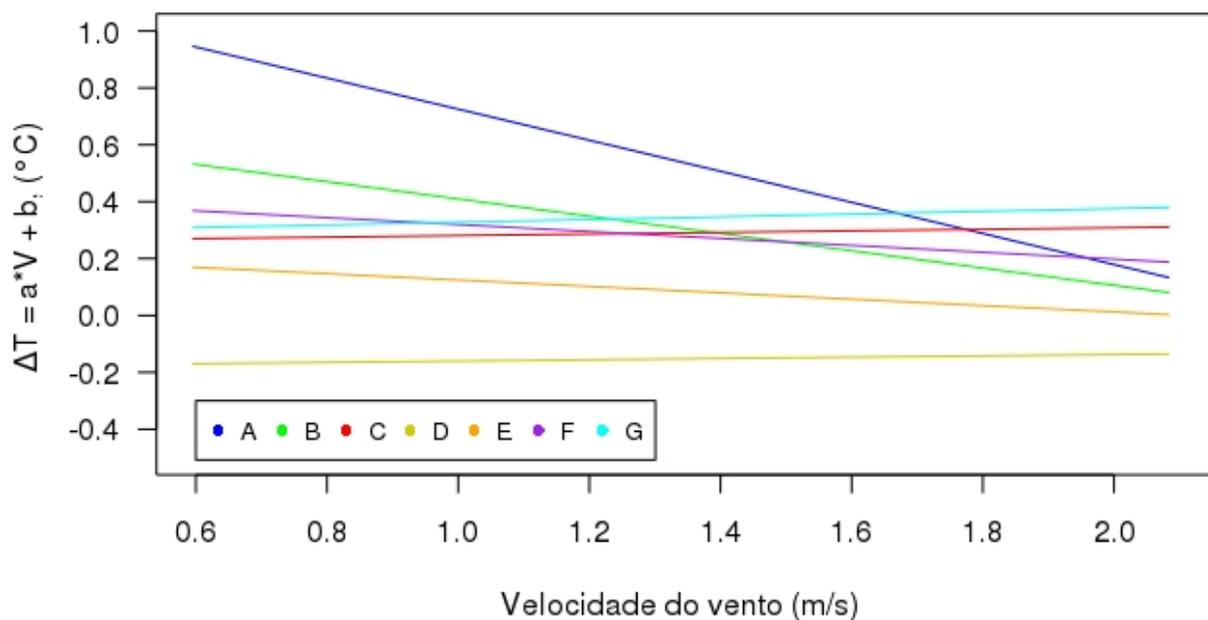


Figura 4.9: Regressão linear entre a média diária da velocidade do vento e as diferenças de temperatura. Dados do período de 22 de Maio a 7 de Junho de 2018. Etiquetas dos abrigos: A = Pagoda, B = Aspirado, C = Pratos I, D = Pratos II, E = Pratos III, F = Pet, G = Gill. Detalhes da regressão linear no Anexo E.

4.2.1.1 Abrigo Gill

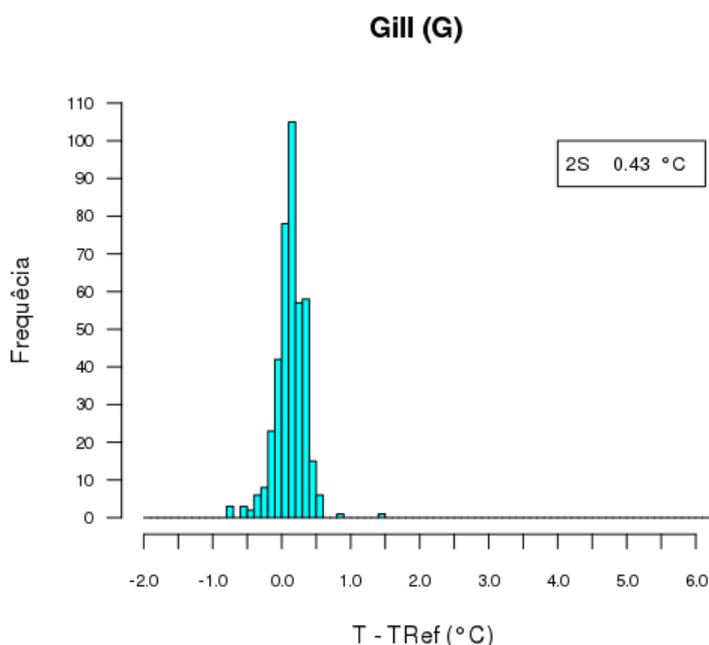


Figura 4.10: Histograma da distribuição de ΔT do abrigo Gill; no quadro a incerteza associada.

A diferença média na temperatura medida no abrigo Gill em relação à referência é de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, diferença máxima de $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, com e 98.5% das diferenças entre $\pm 0,43\text{ }^{\circ}\text{C}$, como pode ser visto na Figura 4.10. Considerando apenas um desvio padrão, 68% das diferenças estão dentro a precisão nominal do sensor DHT22 ($\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) e dentro das recomendações da WMO ($\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$).

A diferença máxima foi maior do que a precisão observada do sensor ($\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), enquanto ΔT_{MED} foi igual. Esse resultado indica que há influência do abrigo Gill nas medidas de temperatura. Estas conclusões diferem dos resultados de correspondência positiva entre medidas da estação A801 e medidas de temperatura utilizando um abrigo do estilo Gill e um sensor DHT22 encontrados por Alves (2018).

4.2.1.2 *Abrigo Pagoda*

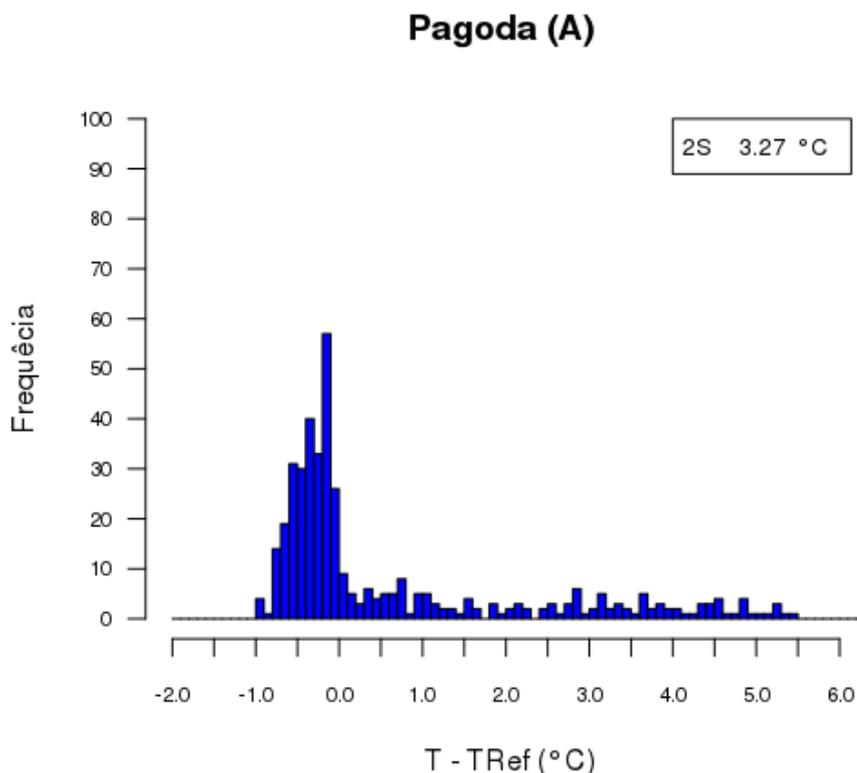


Figura 4.11: Histograma da distribuição de ΔT do abrigo Pagoda; no quadro a incerteza associada.

O abrigo Pagoda se destaca nas Figuras 4.6 e 4.7 por apresentar as maiores diferenças de temperatura. Sua diferença média de $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ e máxima de $5,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ são as maiores, ambas maiores do que a precisão nominal do sensor ($\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) – como o sensor A, usado neste abrigo, foi trocado, a precisão medida na calibração não representa o sensor usado nesta coleta. O histograma na Figura 4.11 mostra uma alta concentração de diferenças com valores negativos, mas expõe também que as

diferenças estão bem distribuídas para valores positivos. A concentração em valores negativos é estreita, consistente, e está concentrada entre $-0,5^{\circ}\text{C}$ e $0,0^{\circ}\text{C}$, dentro do intervalo de exatidão do sensor, o que indica que é um erro do sensor. O sensor A não foi calibrado, por isso erros associados a exatidão do sensor se somam aos erros causados pela influência do abrigo, resultando em erros maiores do que dos de mais.

Já as diferenças positivas se distribuem igualmente entre 0°C e $5,4^{\circ}\text{C}$. As diferenças positivas se concentram no período diurno (Figura 4.7), o de maior insolação, quando a incidência de radiação infravermelha é maior. Este aumento reforça a hipótese de que o Pagoda não bloqueia radiação infravermelha, que atravessa o abrigo e aquece o sensor. O aquecimento é agravado quando a velocidade do vento é baixa, na Figura 4.9 é verificado que para baixas velocidades do vento, ΔT do Pagoda cresce rapidamente e, para altas velocidades, a temperatura se aproxima da referência. Este comportamento sugere um *design* do abrigo não favorece a ventilação.

Como indicado pela regressão linear em 4.9, diminuição na velocidade do vento diminui as ΔT , indicando que este abrigo favorece a ventilação em relação ao abrigo A801.

4.2.1.3 *Abrigo Aspirado*

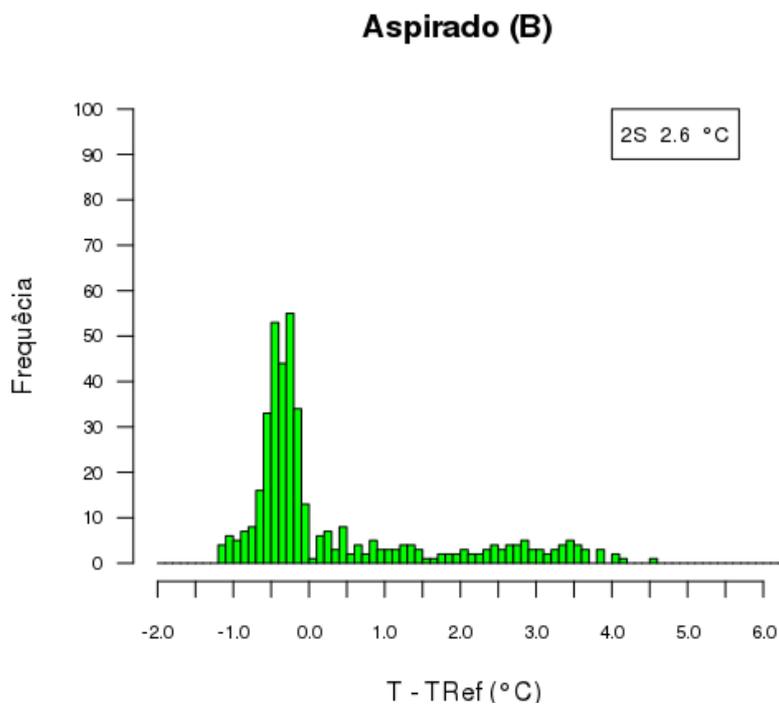


Figura 4.12: Histograma da distribuição de ΔT do abrigo Aspirado; no quadro a incerteza associada.

O abrigo Aspirado apresentou uma diferença média de $0,3^{\circ}\text{C}$ e uma máxima de $4,4^{\circ}\text{C}$, ambas maiores do que a precisão nominal ($\pm 0,2^{\circ}\text{C}$) e observada ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$) do sensor. Esses resultados evidenciam que o abrigo exerceu influência nas medidas de temperatura. Seu histograma de ΔT , Figura 4.12, mostra alta concentração de ΔT entre $-0,5^{\circ}\text{C}$ e $0,0^{\circ}\text{C}$, e uma distribuição homogênea para valores positivos. Assim como no Pagoda, este comportamento pode estar relacionado com um erro no sensor, que consistentemente retorna medidas entre $-0,5^{\circ}\text{C}$ e $0,0^{\circ}\text{C}$ menor do que a de referência.

Seu histograma possui uma longa extensão no sentido positivo, muito similar ao comportamento apresentado pelos abrigos passivos (Figura 4.11, Figura 4.13) e muito diferente do comportamento esperado, o qual deveria se aproximar ao do abrigo Gill (Figura 4.10). Abrigos aspirados artificialmente costumam não apresentar aquecimento durante o período diurno, e apresentar temperaturas abaixo da referência no período noturno. Como fica evidente nos gráficos das Figuras 4.6 e 4.7, o Aspirado sofre grande aquecimento no período diurno.

Ambas características indicam que a velocidade do ventilador não foi o suficiente para renovar o ar no interior do abrigo e que o uso de embalagens aluminizadas, em contrapartida de isolantes térmicos, prejudicou o desempenho do abrigo. Como não houve nenhum controle ou monitoramento do funcionamento do ventilador, a possibilidade do ventilador ter se desligado durante alguns períodos não pode ser excluída. Ainda assim, seu funcionamento foi suficiente para manter as diferenças abaixo das apresentadas pelo Pagoda. O desempenho desta versão do modelo foi inferior ao testado por Tarara e Hoheisel (2007) e não representa um abrigo aspirado padrão.

4.2.1.4 *Abrigo Pet*

O comportamento das respostas de temperatura do abrigo Pet é similar aos dos abrigos Pagoda e Aspirado. A média de ΔT é de $0,6^{\circ}\text{C}$, com máximo de $4,7^{\circ}\text{C}$, ambos maiores do que a precisão nominal ($0,2^{\circ}\text{C}$) e observada ($0,1^{\circ}\text{C}$) do sensor, resultados esses que corroboram que o abrigo exerceu influência nas medidas de temperatura. As diferenças ΔT se concentram em 0 e se distribuem até $5,0^{\circ}\text{C}$ (Figura 4.13). A sua curva de ΔT (Figura 4.7) apresenta um comportamento diferente das outras: alcança a diferença máxima entre 10h e 12h, e então decresce lentamente até alcançar as demais curvas ao anoitecer. Mesmo com baixas velocidades de vento, a temperatura no abrigo Pet não sofre, segundo a regressão linear, alteração maior do que $0,5^{\circ}\text{C}$, como é possível verificar na Figura 4.9.

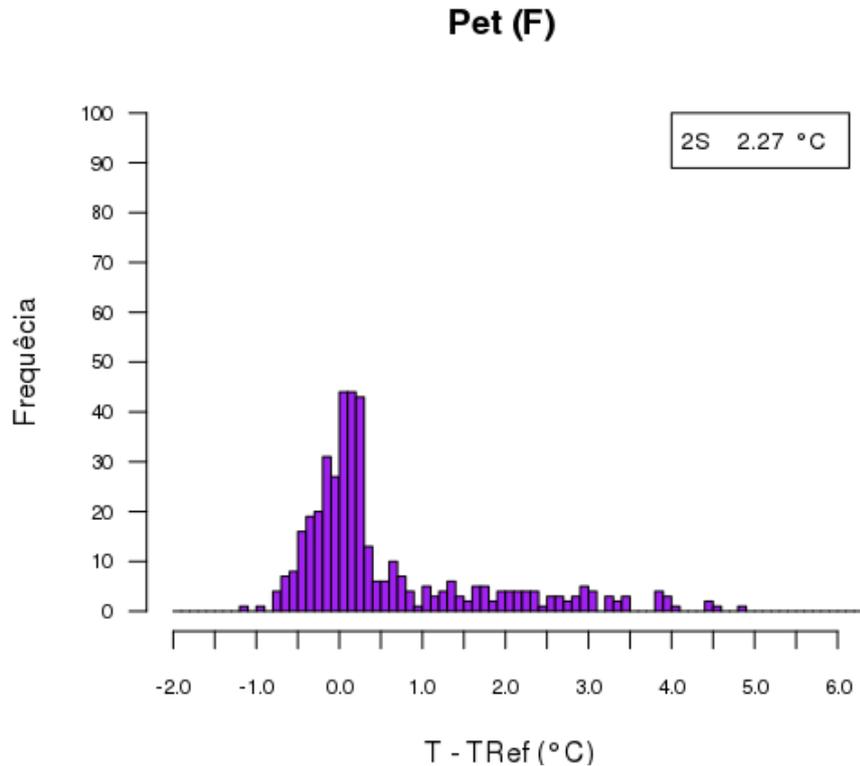


Figura 4.13: Histograma da distribuição de ΔT do abrigo Pet; no quadro a incerteza associada.

A queda suave na temperatura pode estar associada a sombra de algum obstáculo projetada sobre o abrigo. Considerando sua posição, o único obstáculo seria o mastro central da estação A801 (com 10m de altura) a noroeste do Pet. Porém o mastro é muito estreito e sua sombra não geraria um efeito tão pronunciado. Além disso, efeito similar iriam aparecer no abrigo Gill, que está ao sul do abrigo Pet.

O recobrimento de alumínio absorve ou reflete toda a radiação infravermelha que chega ao abrigo, bloqueando a passagem de infravermelho. O alumínio quente esquenta o ar em contato com as paredes, o que gera este erro na medida de temperatura. A diferença de temperatura é causada então principalmente pelo aquecimento do ar embaixo do abrigo, e não pelo aquecimento do sensor. Neste caso, a ventilação do abrigo ajuda a diminuir estas diferenças. Uma boa ventilação pode estar por trás desta queda suave de temperatura.

4.2.1.5 *Abrigos Pratos I, II e III*

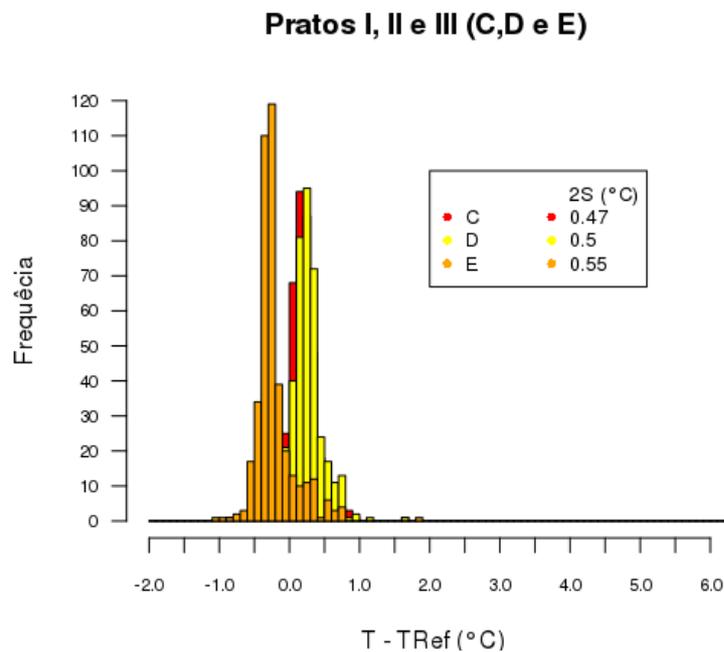


Figura 4.14: Histograma da distribuição de ΔT dos abrigos Pratos I (C), II (D) e III (E); no quadro a incerteza associada.

Os três abrigos do tipo Pratos possuem um comportamento bem similar entre si, como pode ser visto nas Figuras 4.6 e 4.7. Os Pratos I e II apresentaram o ΔT médio de $0,2^{\circ}\text{C}$, enquanto o III apresentou um ΔT médio simetricamente oposto e igual a $-0,2^{\circ}\text{C}$, todos no limite da precisão nominal do sensor e das recomendações da WMO ($\pm 0,2^{\circ}\text{C}$). As máximas, alcançaram $1,6^{\circ}\text{C}$, $1,5^{\circ}\text{C}$ e $1,7^{\circ}\text{C}$ para os abrigos I, II e III, respectivamente. A incerteza das diferenças ΔT dos abrigos é aproximadamente $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ para 98% das medidas. Para 68% delas, as diferenças encontram-se entre \pm um desvio padrão de aproximadamente $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$, resultado muito próximo a recomendação da WMO ($\pm 0,2^{\circ}\text{C}$) e, por isso, considerado um bom desempenho. Os resultados foram comparáveis ao do abrigo comercial Gill, um ótimo resultado para um abrigo artesanal. Apesar disso, todos esses resultados foram maiores do que a precisão observada do sensor ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$), o que evidencia que os abrigos exerceram influência nas medidas de temperatura.

No histograma de ΔT , Figura 4.14, a similaridade entre I e II fica evidente. A centralização dos dados em 0, com uma distribuição mais ou menos equilibrada a a partir de zero indica que os erros são de origem do sensor, e não do abrigo – caso no qual as diferenças estariam distribuídas por valores positivos.

Segundo a regressão linear da Figura 4.9, ΔT do Pratos III aumenta com a diminuição do vento, enquanto ΔT dos Pratos I e II diminui, indicando que eles favorecem a ventilação em relação ao abrigo A801. De maneira geral, eles tiveram um desempenho muito melhor do que a versão

testadas por Valin Jr. et al. (2016), pois, considerando uma distribuição normal, 98.5% das medidas encontram-se entre $-0,7^{\circ}\text{C}$ e $0,7^{\circ}\text{C}$

As diferenças entre os modelos III e o I e II pode ser também explicada pela direção do sensor dentro do abrigo, mas como esta informação não foi registrada, não é possível aprofundar este aspecto dos abrigos. Uma alteração no comportamento do sensor, ou erro de calibração, também pode ter gerado estas diferenças.

Caracterização da população de abrigos do modelo Pratos

A Tabela 4.5 traz os valores máximos e mínimos de ΔT , bem como os desvios padrão destes. A diferença com o abrigo de referência foi menor do que a precisão do DHT22 em todos os casos e permanece no limite das recomendações da WMO. O desvio padrão estimado das diferenças máximas foi zero, pois todos os abrigos alcançaram o mesmo ΔT_{MAX} , indicando que os comportamentos das réplicas são similares. Já o desvio padrão estimado de ΔT_{MED} foi $0,22^{\circ}\text{C}$. A incerteza estimada é então de $0,44^{\circ}\text{C}$, maior do que a precisão observada do sensor e confirma que este modelo aumenta a incerteza das medidas e que as réplicas não são idênticas e suas interferências nas medidas diferem entre si.

Temperatura	Pratos I ($^{\circ}\text{C}$)	Pratos II ($^{\circ}\text{C}$)	Pratos III ($^{\circ}\text{C}$)
ΔT_{MAX}	1,3	1,3	1,3
ΔT_{MIN}	-0,6	0,6	-1,0
ΔT_{MED}	0,0(5)	0,1	-0,3

Tabela 4.5 - Diferenças de temperatura entre os abrigos Pratos I, II e III e o abrigo de referência, nesta análise, o abrigo Gill.

4.2.2 Umidade Relativa do Ar

As médias por hora das medidas de umidade relativa, na Figura 4.15, apresentaram grandes diferenças. As alterações na umidade relativa do ar durante um dia apresentam o ciclo esperado para esta grandeza. A partir do nascer do Sol, quando a temperatura aumenta, as medidas decrescem até alcançar seu ponto mínimo, por volta das 14h, e então voltam a subir lentamente.

As medidas de A801 não permanecem constantes em nenhum momento. A partir do instante que retornam do ponto mínimo, permanecem crescendo durante a noite e madrugada, inclusive no período da manhã. De maneira geral, as medidas dos abrigos testados rapidamente alcançam um patamar próximo a 99,9%, a saturação do sensor, e ali permanecem até o próximo ciclo diurno. O

Pet é o único que não alcança a saturação do sensor e cuja curva acompanha de perto a curva de A801.

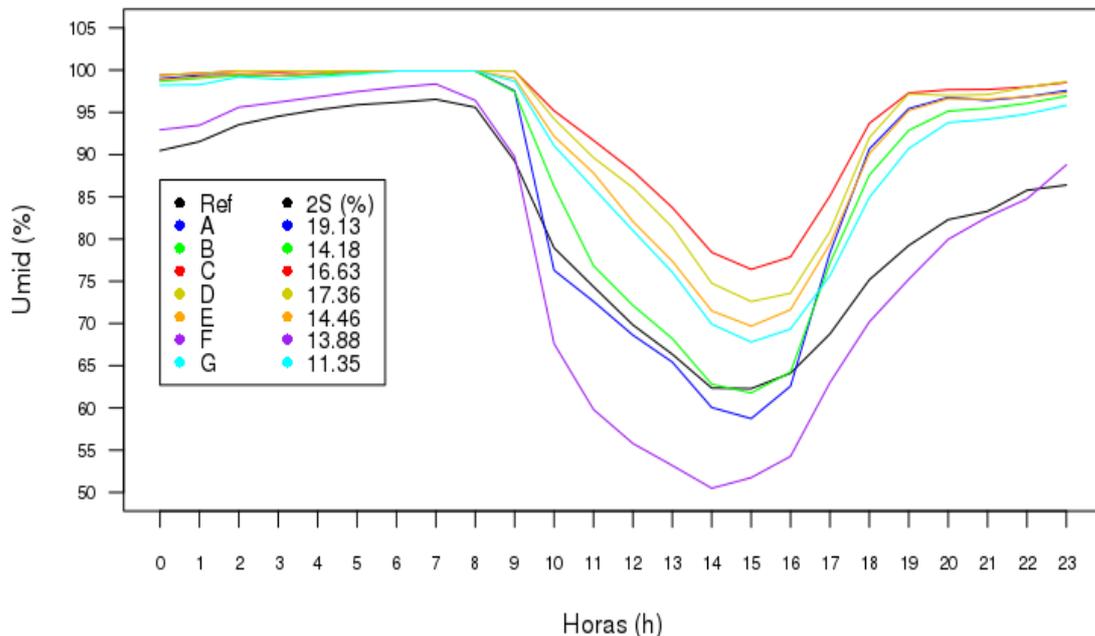


Figura 4.15: Umidade relativa do Ar medida em cada abrigo. No quadro, os valores de incerteza associados. Dados do período de 22 de Maio a 7 de Junho de 2018. Etiquetas dos abrigos: A = Pagoda, B = Aspirado, C = Pratos I, D = Pratos II, E = Pratos III, F = Pet, G = Gill.

As curvas da diferenças médias de cada hora entre a umidade relativa do ar medida por cada abrigo e pela referência (ΔU), Figura 4.16, seguem, de maneira geral, três padrões. Os abrigos Gill e Pratos I, II e III possuem dois pontos de máximo, aproximadamente ao meio-dia e às 19h. Os abrigos Pagoda e Aspirado também apresentam um ponto de máximo por volta das 19h, mas estão em seu patamar mínimo durante o meio-dia. O abrigo Pet apresenta um pico de mínimo, mas não apresenta nenhum pico de máximo.

Os histogramas dos ΔU de cada instante de todos os abrigos testados, Figura 4.17, apresentam uma alta concentração de medidas em toda sua extensão, principalmente na região de diferenças positivas. As maiores concentrações estão entre 0 e 15%, mas os histogramas se estendem de -20 % a 30%

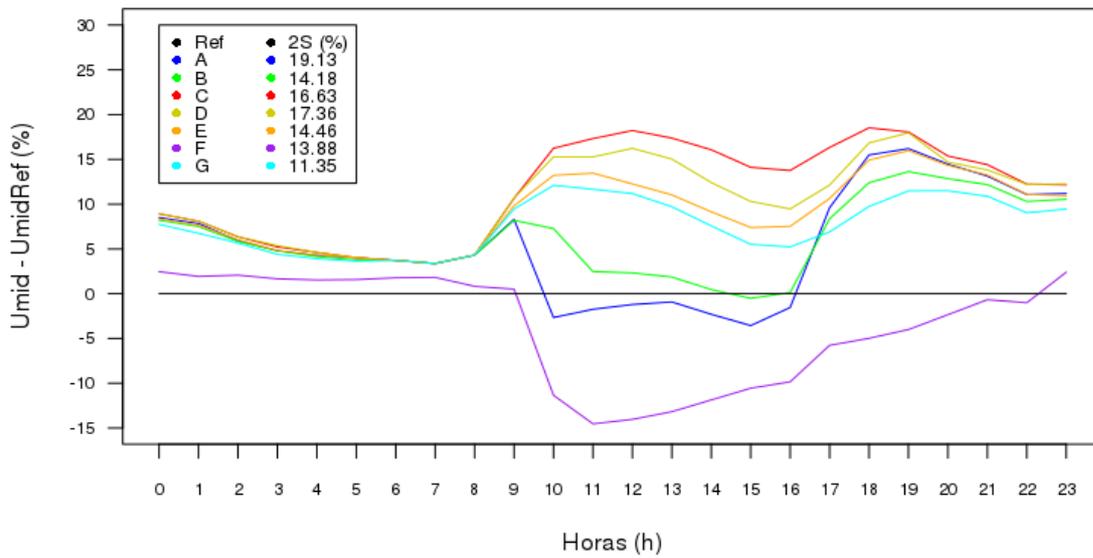


Figura 4.16: Diferenças ΔU média entre a umidade relativa de cada hora. "Ref" são as medidas da estação A801 e a média de todas as medidas é o valor médio de todos os abrigos. No quadro, está associada a cada abrigo o valor da incerteza. Dados do período de 22 de Maio a 7 de Junho de 2018. Etiquetas dos abrigos: A = Pagoda, B = Aspirado, C = Pratos I, D = Pratos II, E = Pratos III, F = Pet, G = Gill.

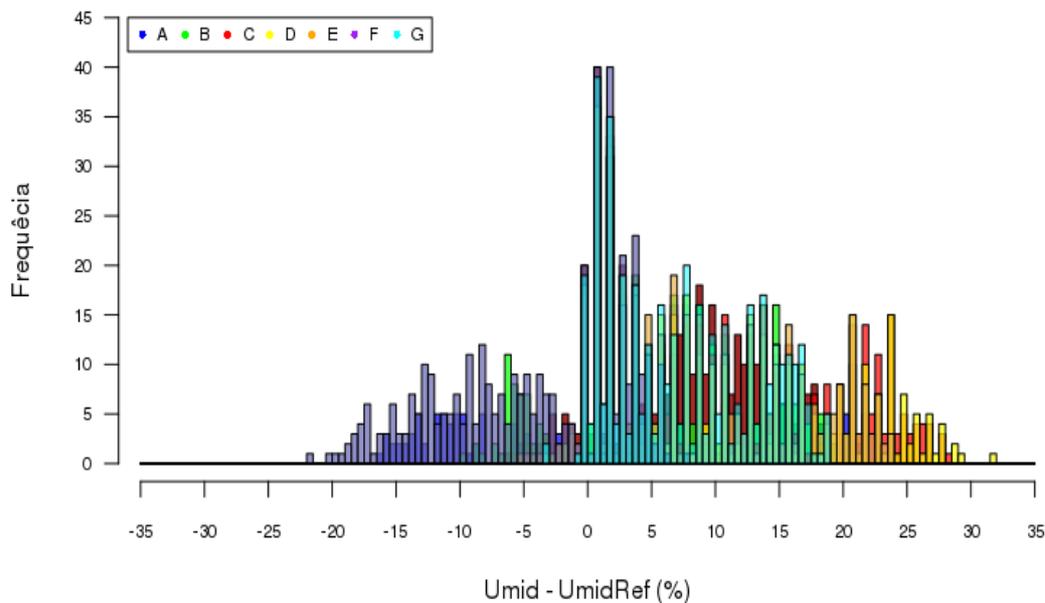


Figura 4.17: Histograma da distribuição das diferenças de umidade relativa do ar instantâneas. Dados do período de 22 de Maio a 7 de Junho de 2018. Etiquetas dos abrigos: A = Pagoda, B = Aspirado, C = Pratos I, D = Pratos II, E = Pratos III, F = Pet, G = Gill.

Na Tabela 4.6 estão os valores de ΔU médios, máximos e mínimos, bem como as incertezas associadas. Todos os ΔU_{MED} são maiores do que a exatidão mínima do DHT22 ($\pm 2\%$), também suas diferenças máximas e mínimas, que superam em várias vezes esta exatidão. Apenas as medidas do Pet estão abaixo da exatidão máxima de $\pm 5\%$ do sensor. Os abrigos Pratos I e II apresentaram os maiores ΔU médio e máximo, de aproximadamente 10%, o dobro do apresentado pelo Pagoda e o triplo do apresentado, em módulo, pelo Pet.

Abrigo	ΔU_{MED} (%)	ΔU_{MIN} (%)	ΔU_{MAX} (%)	$2S_{\text{dif}} (\pm\%)$
Pagoda	5,4	-16,5	24,5	19,13
Aspirado	6,1	-10,0	20,5	14,18
Pratos I	11,6	-1,5	26,5	16,62
Pratos II	10,5	-5,5	31,0	17,36
Pratos III	9,0	-11,5	17,5	14,46
Pet	-3,6	-18,5	11,5	13,88
Gill	7,6	-3,5	19,5	11,35

Tabela 4.6 Média, máximo e mínimo de ΔU e incerteza.

Os valores de incerteza são altos e superam a precisão de 1% do DHT22 em mais de 10 vezes, 15 em vários casos, e quase 20 vezes maior no caso do Pagoda. O abrigo Gill apresenta o menor valor de incerteza, 11,35%, enquanto o Pagoda apresenta o maior valor, 19,13%.

Abrigo	Umid. Máxima (%)	Umid. Média (%)	Umid. Mínima (%)	Amplitude diária média (%)
Pagoda	99,9	87,9	31,1	46,1
Aspirado	99,9	88,6	36,6	42,3
Pratos I	99,9	94,1	48,3	26,0
Pratos II	99,9	93,0	39,9	30,5
Pratos III	99,9	91,6	40,6	32,9
Pet	99,9	78,8	33,5	51,5
Gill	99,9	90,1	42,7	34,8
A801	100,0	82,5	43,0	37,9

Tabela 4.7: Os valores de umidade relativa do ar máximos, médio e mínimo medidos durante todo o período,

A média das medidas feitas durante todo período de coleta é menor para o Pagoda, 78,8%, e para o A801, 82,5%. Como é possível verificar, todos mediram, pelo menos uma vez, o valor

máximo de 100% (para o DHT22, 99,9%). Todos os Pratos e o Gill tiveram mínima maior do que 90%. As médias diárias seguem o mesmo padrão, os Pratos e o Gill apresentaram as menores amplitudes (próximas, ou menores, a 30%) enquanto o Pagoda apresentou a maior amplitude (51,5%).

Como a medida de umidade relativa do ar depende da temperatura, erros nas medidas de temperatura causam erros nas medidas de umidade relativa do ar. Os maiores ΔT médios foram apresentados pelos abrigos Pet e Pagoda, e os menores pelo abrigo Gill e pelos Pratos I, II e III. Caso as variações na umidade relativa do ar tivessem sido causadas majoritariamente pelas diferenças na temperatura, os abrigos Pet e Pagoda apresentariam um valor médio maior de diferença, enquanto os Pratos apresentariam um menor. Como o abrigo Gill apresentou diferenças dentro das especificações do sensor e seu modelo é similar ao do A801, suas medidas de umidade relativa do ar não deveriam diferir mais do que 2%.

O resultado apresentado na Tabela 4.5 não indicou esta relação entre ΔT e ΔU médios. Isto não significa que o erro na temperatura não esteja contribuindo para o erro na umidade relativa do ar, mas indica que outros fatores estão alterando as medidas. Estes fatores podem ser a influência da histerese do sensor, acúmulo de água na superfície do sensor ou que o sensor foi danificado.

A histerese do DHT22 é de $\pm 0,3\%$, 12 vezes menor do que o menor ΔU médio apresentado (3,6%), o que indica que sua influência nestas diferenças é pequena. O acúmulo de água pode ocorrer caso gotas de água entrem no interior do abrigo e permaneçam sob a superfície do sensor. Neste caso, o *design* dos abrigos poderia estar favorecendo esta situação. Se este fosse o caso, o abrigo Gill - por ter o mesmo modelo de abrigo do A801 - apresentaria variações menores do que as dos demais abrigos e não apresentaria diferenças superiores à exatidão do sensor. Muito pelo contrário, o que se verificou foi um ΔU_{MAX} de 10 vezes a exatidão do sensor.

Há também a possibilidade de que a estrutura dos abrigos acumule água e que sua evaporação aumente a umidade do ar dentro dele. Estas condições podem alterar a umidade do ar no interior do abrigo, de forma que a umidade medida pelo sensor não estaria errada, apenas diferente da umidade do ar externo. Pelos mesmos motivos citados acima, se esta fosse a causa principal do erro, não seria verificada no abrigo Gill, mas pode ter influenciado as medidas dos abrigos Pratos e Aspirado. Os discos dos abrigos Pratos possuem uma pequena elevação nas suas bordas, o que favorece o acúmulo de água. Tanto a água da chuva quanto da formação de orvalho tendem a ficar acumuladas na superfície de cada prato e isto poderia causar uma alteração na umidade do ar dentro dos abrigos Pratos. No abrigo Aspirado, como sua ventilação se mostrou incapaz de trocar o ar do interior do abrigo, a umidade do ar pode ter sido alterada pela evaporação do orvalho que ficou preso dentro do abrigo.

Há na história dos sensores usados nesta pesquisa existe dois momentos em que eles podem ter sido conjuntamente danificados: no armazenamento e na exposição a radiação ultravioleta. Segundo recomendações do fabricante, os sensores devem ser armazenados em ambientes com umidade relativa do ar entre 0 e 60% e não devem ser expostos a radiação ultravioleta durante longos períodos.

Antes do início desta pesquisa, os sensores foram armazenados durante aproximadamente 1 ano dentro da sede do CTA, no campus do Vale da UFRGS. Nesse espaço não há controle da umidade do ar. Por ser um local com pouca ventilação e insolação, localizada em Porto Alegre, numa região arborizada e próxima a um corpo de água, são encontradas umidades relativadas o ar maiores do que 60%. É possível que o armazenamento incorreto do DHT22 tenha danificado o dielétrico do sensor de umidade antes mesmo do início desta pesquisa.

A outra situação foi a exposição a radiação ultravioleta. Os abrigos e sensores estiveram expostos ao Sol e, conseqüentemente, a radiação ultravioleta, durante 75 dias. A princípio, o material de que são feitos todos os abrigos seria capaz de bloquear maior parte da radiação ultravioleta. Novamente, se este fosse o caso, o abrigo Gill não deveria apresentar diferenças tão grandes.

Todos estes aspectos podem estar atuando conjuntamente e individualmente em cada sensor e abrigo, de maneira que nenhuma das causas sugeridas respondem o erro apresentado, mas podem estar contribuindo para ele. Devido a falta de estudos do comportamento do DHT22 em qualquer circunstância, ainda menos em medidas de longo prazo, expostos as ambiente externo, não é possível aprofundar nenhuma das hipóteses. Os comportamentos apresentados reforçam o resultado de Alves (2018) de que há diferença significativa entre as medidas de umidade relativa do ar do DHT22 e da estação A801, bem como estão de acordo com os resultados expostos por Smith e Smith (2018).

O comportamento individual dos abrigos não foi analisado pois as medidas de umidade relativa do ar feitas pelo DHT22 não se mostram confiáveis. No Anexo D - Histogramas de ΔU estão detalhados os histogramas de ΔU cada abrigo.

4.2.3 Qualidade do abrigo de referência

Os valores de temperatura máximo, médio e mínimo medidos durante os 17 dias, bem como a amplitudes térmicas diárias médias seguem na Tabela 4.8³⁷. A Figura 4.18 traz a distribuição das amplitudes térmicas por dia; na Tabela 4.8 estão as médias totais. As amplitudes dos abrigos

³⁷ No cálculo da amplitude térmica se analisou apenas os valores instantâneos médios das estações, não foram usados os valores máximos e mínimos de cada instante.

Pagoda, Aspirado e Pet são maiores do que as demais. Já as amplitudes dos abrigos Pratos I, II e III, bem como do Gill e do A801 seguem próximos. A Figura Erro: Origem da referência não encontrada traz o detalhe do comportamentos destes 4 abrigos.

Abrigo	Máxima (°C)	Média (°C)	Mínima (°C)	Amplitude diária média (°C)
Pagoda	34,7	15,8	4,8	13,4
Aspirado	31,4	15,5	4,4	12,7
Pratos I	29,7	15,4	5,7	9,7
Prato II	29,6	15,4	5,7	9,7
Prato III	29,8	15,0	5,0	10,1
Pet	30,9	15,8	5,1	11,6
Gill	29,5	15,3	5,7	9,4
A801	28,6	15,2	5,3	9,8

Tabela 4.8: Valores máximos, mínimos e médios medidos, bem como as amplitudes térmicas de cada abrigo.

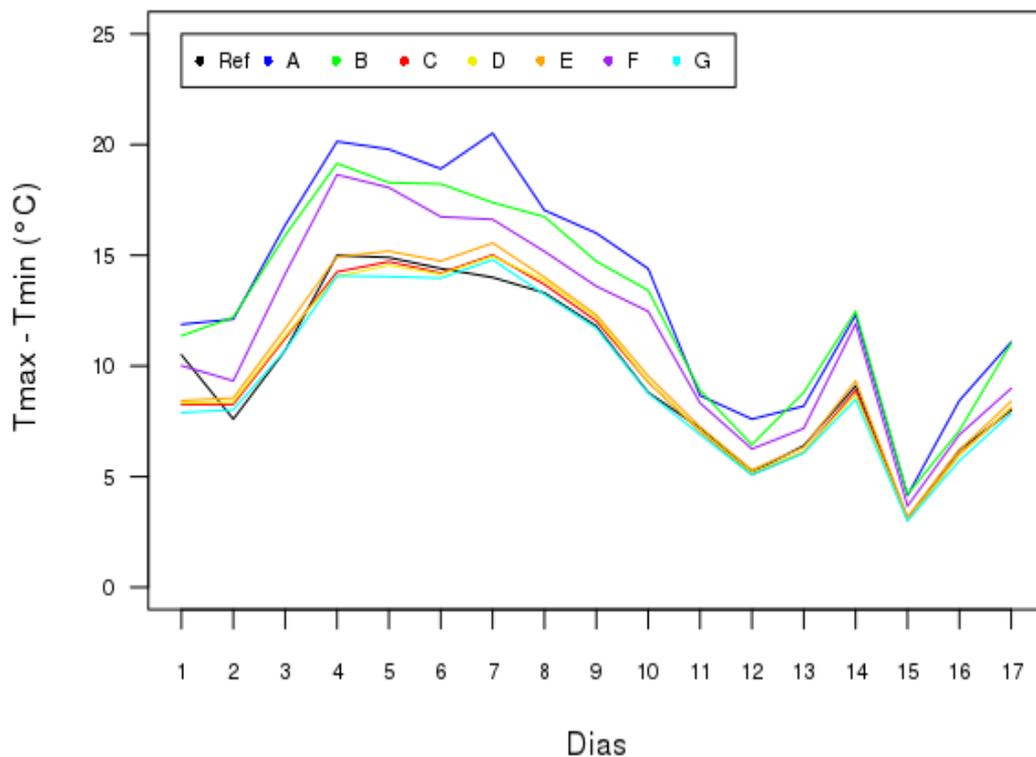


Figura 4.18: Amplitude térmica por dia de cada abrigo. Dados do período de 22 de Maio a 7 de Junho de 2018. Etiqueta dos abrigos: A = Pagoda, B = Aspirado, C = Pratos I, D = Pratos II, E = Pratos III, F = Pet, G = Gill.

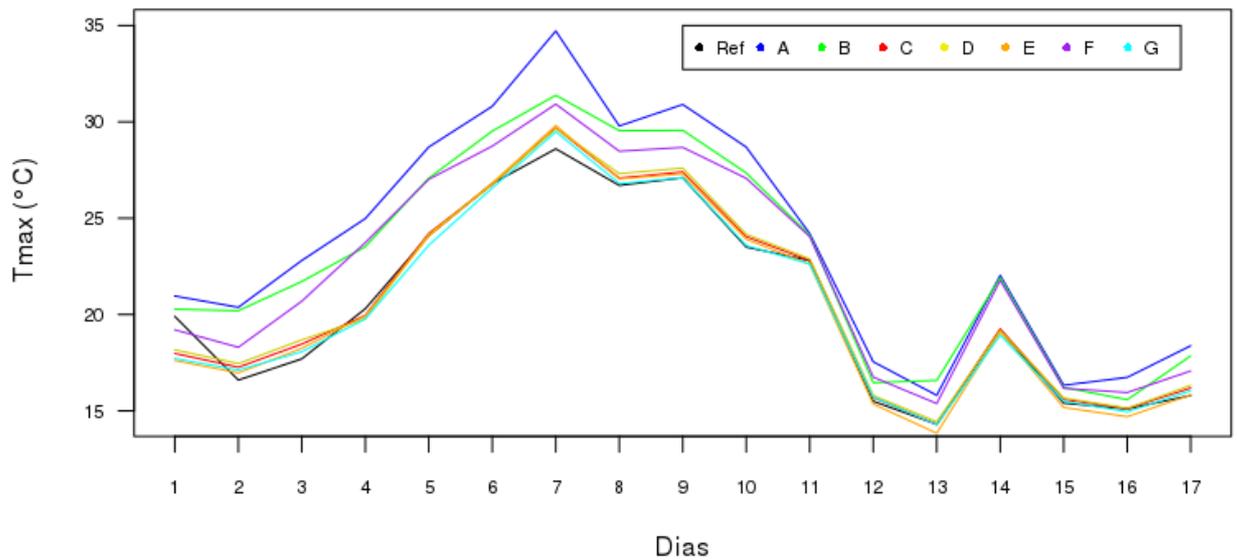


Figura 4.20: Temperaturas máximas diárias de todos os abrigos. Dados do período de 22 de Maio a 7 de Junho de 2018. Etiquetas dos abrigos: A = Pagoda, B = Aspirado, C = Pratos I, D = Pratos II, E = Pratos III, F = Pet, G = Gill.

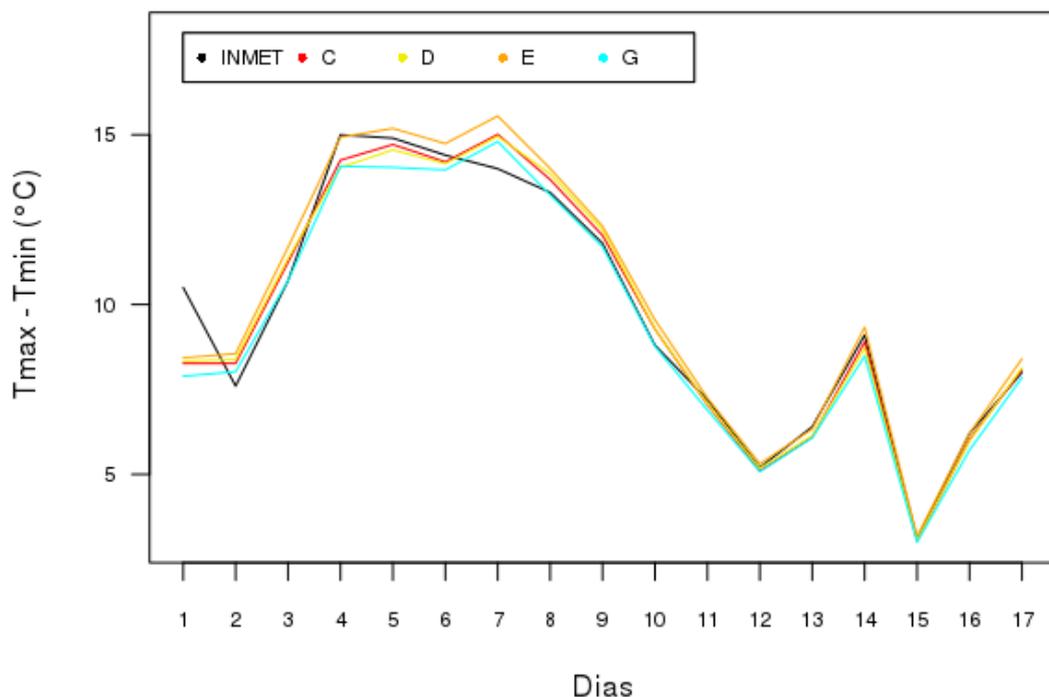


Figura 4.19: Amplitude térmica por dia dos abrigos A801, Gill e Pratos I, II e III. Dados do período de 22 de Maio a 7 de Junho de 2018. Etiquetas dos abrigos: A = Pagoda, B = Aspirado, C = Pratos I, D = Pratos II, E = Pratos III, F = Pet, G = Gill.

Durante maior parte do dia, as curvas na Figura Erro: Origem da referência não encontrada se misturam, sendo difícil afirmar qual é maior e qual é menor. Durante aproximadamente o 3º e o 6º dia, as curvas dos Pratos III e A801 são maiores, seguidos dos Pratos I e II e então do Gill, com menores valores. Já entre 6º e 8º dia, o A801 passa a apresentar os menores valores, enquanto os demais permanecem na mesma sequência. As médias apresentadas na Tabela 4.8 indicam que o Gill

possui a menor amplitude térmica, de 9,4°C, logo antes dos Pratos I e II, com 9,7°C, e do A801, com 9,8°C, e então o Pratos III, com 10,7°C. Na sequência aparecem os abrigos Aspirado, com 12,7°C, Pet, com 11,6°C e Pagoda, com 13,4°C. Os máximos diários da Figura 4.20 expressam um comportamento similar, já que as curvas dos abrigos Gill, Pratos e A801 se sobre põem quase todos os dias. O abrigo Aspirado apresentou amplitudes térmicas muito altas, reforçando a hipótese de que a troca forçada de ar não ocorreu, e que uma velocidade do ventilador maior seria necessária realizar para a troca do ar.

Imaginou-se que aquele que apresentaria o melhor resultado seria o A801, por ser uma estação oficial do INMET, seguido do Gill, que consiste em um modelo comercial, mas que foi usado com um sensor e *datalogger* experimentais. Porém, um cenário diferente se formou: o Gill apresentou menor amplitude térmica, seguido de dois abrigos de baixo custo e, depois, do A801. Segundo este indicativo, mesmo abrigos de baixo custo e artesanais podem apresentar resultados análogos aos de abrigos comerciais.



Figura 4.21: Abrigo meteorológico do INMET, da estação A801, sob a sombra da própria placa solar.

A escolha da estação A801 como referência, como padrão, se baseou na confiança de que ela é capaz de medir valores próximos aos reais. Como discutido anteriormente, constantemente nos deparamos com a impossibilidade de definirmos qual é o valor real. Os resultados desta seção, em conjunto com a foto da Figura 4.21, são um bom exemplo disto. Nela, vemos o abrigo da estação A801 sob a sombra da própria placa solar, às 11h00, exatamente na faixa de horário mais crítica

para a medida de temperatura o abrigo fica protegido de radiação direta do sol. Mesmo assim, esta é uma estação meteorológica sob os cuidados de um instituto de pesquisa em meteorologia de referência no Brasil, o que deve ser levando em conta na validação dos resultados.

5 Conclusões

A facilidade com que o sistema de aquisição da EMM foi adaptado do seu propósito original reforça a importância da documentação e da disponibilização dos arquivos fontes – característica essencial de uma ferramenta livre - para uma produção de ciência aberta mais dinâmica e colaborativa.

A caracterização do sensor DHT22 mostrou que este sensor é uma boa opção para medidas de temperatura, porém requerem uma calibração adicional para apresentarem resultados de acordo com as orientações da WMO. O valor observado para a exatidão da medida da temperatura do DHT22 foi equivalente ao valor relatado no Datasheet ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$), enquanto a precisão observada foi de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, melhor que a precisão apresentada no Datasheet e de acordo com as orientações da WMO.

Por outro lado, o DHT22 não se mostrou confiável para medidas de umidade relativa do ar, apresentando exatidão e reprodutibilidade bem abaixo dos valores apontados pelo datasheet. Entretanto, não exclui-se a possibilidade dos sensores terem sido danificados pelo armazenamento em condições de umidade relativa do ar acima de 60%, conforme orientado pelo fabricante. Independente do DHT22 ter sido armazenado em condições um pouco mais úmidas que o recomendado, estas são condições típicas de armazenamento que serão encontradas em escolas e comunidades em geral. Por isso o DHT22 não se mostrou adequado para aplicações de ciência cidadã que requerem medidas de umidade relativa do ar.

No que tange os abrigos meteorológicos testados, apesar de terem sido construídos de maneira artesanal e terem sido fixados com ferramentas simples como cola quente e cinta plástica, ou de serem confeccionados por materiais comuns como pratos plásticos, assadeira de alumínio e garrafa PET, nenhum deles apresentou sinal de dano, não sendo necessários reparos durante os 3 meses em que ficaram em campo. Mostram-se, então, resistentes e aptos para serem usados em ambientes externos. Testes mais longos são necessários para averiguar o efeito do acúmulo de poeira e camadas biológicas nestes abrigos.

A semelhança entre os resultados dos abrigos Gill, Pratos I, II e III é uma evidência de que a calibração dos sensores de temperatura dos DHT22 corrigiu os efeitos das exatidões dos sensores DHT22. A calibração permitiu, então, avaliar os desempenhos do abrigos pela comparação das ΔT_{MED} e ΔT_{MAX} observadas nas distribuições de diferenças de temperaturas (T_{Tref}) em luz da precisão de cada sensor.

O fato do abrigo Gill apresentar a menor amplitude térmica diária média, em valor comparável com o abrigo oficial do INMET, valida seu uso como referência de medidas de temperatura. Já o abrigo Aspirado apresentou um desempenho pior do que o esperado, alcançando diferenças de 4,4°C. Conclui-se que a potência aplicada ao ventilador e os materiais utilizados não foram adequados para tornar desprezíveis o efeito da radiação solar nas medidas realizadas dentro deste abrigo.

O abrigo Pagoda apresentou uma amplitude térmica maior que a do abrigo Pet, e os dois apresentaram uma diferença média de 0,6°C entre sua medida e a referência, significativamente maior que a exatidão do sensor. Por ser um modelo de fabricação complexa, um desempenho tão ruim não compensa seu uso, principalmente se comparado ao abrigo Pet, que é muito mais fácil, barato e seguro de ser fabricado. A origem do seu aquecimento encontra-se no próprio material de que é feito, polipropileno translúcido. Por estes motivos, a continuidade do desenvolvimento deste modelo não se mostra promissora a não ser que o material de que é feito seja trocado e seu método de fabricação seja simplificado.

Já o modelo Pet, apesar de ter apresentado um dos piores desempenhos, tem potencial para aplicações educacionais e de baixo custo. Este modelo não tem vocação para aplicações científicas em que o abrigo ficará exposto a radiação solar, mas pode apresentar bons resultados em aplicações protegidas da radiação solar direta como no interior de construções, ou no interior de matas e florestas. Para isso, mais estudos e testes nestes espaços se fazem necessários.

O modelo de abrigos Pratos mostrou um desempenho promissor, pois sua amplitude térmica foi menor do que a do A801. Alcançou as menores diferenças máximas dos abrigos de baixo custo e resultados comparáveis ao abrigo comercial Gill. Com bons resultados, de fabricação fácil e de baixo custo, este modelo é o mais promissor para o uso em aplicações de ciência cidadã, como no projeto das Estações Meteorológicas Modulares.

Por fim, podemos afirmar que apenas os abrigos Gill e Pratos (I, II e III) apresentaram comportamento de acordo com as especificações da WMO ($\pm 0.2^\circ\text{C}$), quando considerado apenas 68% das medidas (equivalente a um desvio padrão). Quando considerado 98% das medidas (2 desvios padrão), nenhum dos abrigos esteve de acordo com as recomendações da WMO. Evidências de que todos os abrigos exerceram influência nas medidas de temperatura foram encontradas, dado que todos ΔT_{MED} e ΔT_{MAX} observados estavam fora da faixa de precisão observada de cada sensor ($0,1^\circ\text{C}$). Foi observado que os abrigos Pratos apresentaram um desempenho comparável ao abrigo Gill, indicando que estes podem fornecer informações quase tão confiáveis quanto os abrigos comerciais. Estes resultados são animadores para projetos de ciência cidadã, uma

vez que o baixo custo destes abrigos pode efetivamente contribuir com medidas de temperatura para esclarecer os efeitos das mudanças climáticas.

6 Recomendações

Deve-se buscar um sensor de umidade relativa alternativo ao DHT22 que seja confiável e adequado para uso em ciência cidadã: este deve ter exatidão e precisão comparáveis às recomendações da WMO, ser de baixo custo e que aceite condições de armazenamento menos limitantes.

Pesquisas futuras com o DHT22 podem elucidar o comportamento de suas medidas de umidade relativa do ar, replicando o trabalho de Smith e Smith (2018) e também analisar o efeito do armazenamento acima da umidade recomendada são sugestões de próximos passos no estudo deste sensor.

Também caberia verificar a estabilidade da calibração de temperatura dos sensores DHT22 após a realização do teste em campo, uma vez que as constantes de offset aplicadas poderiam ter sofrido variação neste período.

A continuidade do desenvolvimento do modelo Pagoda deve ser repensada. Recomenda-se que sejam escolhidos materiais não translúcidos e que o processo de fabricação seja simplificado.

Para o modelo Pratos, são sugeridos estudos que incluam avaliação do desempenho para medidas de umidade relativa do ar com sensores apropriados, que incluam períodos mais longos que abranjam todas as estações do ano, assim como avaliar designs alternativos com uso de pratos com diferentes formatos, materiais e espaçamentos.

Referências

ALVES, L. S.. Ciência cidadã por meio das estações modulares: construindo as condições para um monitoramento meteorológico colaborativo. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2018. Disponível em <http://hdl.handle.net/10183/177609>, último acesso em Julho de 2018.

APOGEE INSTRUMENTS INC.. Air Temperature Measurement Sensors, 2015. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=LSQIA8dC9Lk>. Último acesso em Outubro de 2017.

AOSONG. Temperature and humidity module - AM2302 Product Manual (Aosong).

BARBOSA, M. J.; LAMBERTS, R.; GUTHS, S.. Uso de barreiras de radiação para minimizar o erro no registro das temperaturas do ar em edificações. Porto Alegre, Ambiente Construído, v. 8, n. 4, p. 117-136, 2008.

BENVINGTON, P. R.; ROBINSON, D. K.. Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences Third Edition. United States of America, New York: McGraw-Hill Higher Education, 2003.

BEZJAK, S.; CLYBURNE-SHERIN, A.; CONZETT, P.; FERNANDES, P.; GÖRÖGH, E.; HELBIG, K.; KRAMER, B.; LABASTIDA, I.; NIEMEYER, K.; PSOMOPOULOS, F.; ROSS-HELLAUER, T.; SCHNEIDER, R.; TENNANT, J.; VERBAKEL, E.; BRINKEN, H.; HELLER, L.. Open Science Training Handbook. Zenodo 2018. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1212496> .

BROWN, A.; FRANKEN, P.; BONNER, S.; DOLEZAL, N.; MOROSS, J.. Safecast: successful citizen-science for radiation measurement and communication after Fukushima. Japão: Journal of Radiological Protection, 6 , S82–S101, 2016 .

CRAWLEY, M. J. . The R Book. Imperial College London at Silwood Park, UK: Wiley, 2013.

HOLDEN, Z. A.; KLENE A. E.; KEEFE, R. F.; MOISEN G. G.. Design and evaluation of an inexpensive radiation shield for monitoring surface air temperatures. *Agricultural and Forest Meteorology Journal*, 180, 281– 286, 2013.

HOPPE, I. L.; IENSSE, A. C.; SIMIONI, J. P. D.. Comparação entre um abrigo meteorológico de baixo custo e a estação meteorológica oficial no INMET, em Santa Maria (RS). Brasil, Rio Grande do Sul, Santa maria: *Ciência e Natura*, v. 37 Ed. Especial SIC, p. 132 – 137, 2015. DOI: 10.5902/2179460X16228.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instituto Nacional de Meteorologia. Nota Técnica No.001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET - Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET. Brasília, DF, 2016. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/topo_iframe/pdf/Nota_Tecnica-Rede_estacoes_INMET.pdf . Último acesso em Julho de 2018.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM). Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). Switzerland, Geneva: International Organization for Standardization, 1995. Disponível no idioma português: Guia para a expressão da incerteza de medição, 3ª edição, ABNT e INMETRO (2003).

KUERZEJA, Robert. Accurate Temperature Measurements in a Naturally-Aspirated Radiation Shield. *Boundary-Layer Meteorol*, 134:181–193, 2010. DOI 10.1007/s10546-009-9430-2.

LACOMBE, M.; BOUSRI, D.; LEROY, M.; MEZRED, M.. [Field Intercomparison of Thermometer Screens/Shields and Humidity Measuring Instruments](#). Switzerland, Geneva: World Meteorological Organization, Instruments and Observing Methods Report, No. 106,, 2011.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H.. Principles of environmental Physics. USA, New York: Edward Arnold, 2, 53-54, 1990.

SERAFINI Jr, S.; ALVES, R. R. Miniabrigos meteorológicos: comparação e análise estatística para avaliação de eficiência. Brasil, São Paulo: GEOUSP – Espaço e Tempo, v. 18, n. 1, p. 198-210, 2014.

MOTA, W. N.; J. ALVES, J.,;EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D.. SMUT – Sistema de baixo custo para aquisição de temperatura e umidade relativa do ar para manejo de irrigação. Revista Engenharia na Agricultura, V.26, n.01, p.89-99, 2018. DOI: <https://doi.org/10.13083/reveng.v26i1.897> .

NORDLI, P.; ALEXANDERSSON, H.; FRICH, P.; FÉRLAND, E. J.; HEINO, R.; JO, T.; TVEITO, D. O. E.. The Effect of Radiation Screens on Nordic Time Series of Mean Temperature. International Journal of Climatology, vol. 17, 1667±1681, 1997.

OPEN KNOWLDGE INTERNATIONAL (OKI). Definição de conhecimento aberto. Disponível em: <https://opendefinition.org/od/2.0/pt-br/> . Último acesso em Junho de 2018.

PEZZI, R. P.; FERNANDES, H. M.; BRANDÃO, R. V.,; FREITAS, M. P. P.; ALVES, L. S.; SILVA, R. B.; TAVARES, J. L. S.; WEIHAMANN, G. R.. Desenvolvimento de tecnologia para ciência e educação fundamentado nos preceitos de liberdade do conhecimento: o caso do Centro de Tecnologia Acadêmica. Brasil: Liinc em revista, 13, 1, 2017.

SILVA, R.B.; LEAL, L.S.; ALVES, L.S.; BRANDÃO, R.V.; ALVES, R.C.M.; KLERING, E.V.; PEZZI, R.P.. Estações meteorológicas de código aberto: um projeto de pesquisa e desenvolvimento tecnológico. Brasil: Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 37, n. 1, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11173711685>>.

SMITH, K.; SMITH, R.. Test and Calibrate DHT22 Hygrometers (2018). Disponível em: http://www.kandrsmith.org/RJS/Misc/Hygrometers/calib_dht22.html . Acessado em Junho de 2018

SOARES, M.D.; SANTOS, R.D.C.. Ciência cidadã: o envolvimento popular em atividades científicas. Brasil: Ciência Hoje, v. 47, n. 281, p. 38-43, 2011.

SPARKS, W. R.. The effect of thermometer screen design on the observed temperature. Switzerland, Geneva: World Meteorological Organization, 1972.

TARARA, J.M.; HOHEISEL, G.. Low-cost Shielding to Minimize Radiation Errors of Temperature Sensors in the Field. HortScience Journal, 42(6),1372–1379, 2007.

THOMAS, C. K.; SMOOT, A. R.. An Effective, Economic, Aspirated Radiation Shield for Air Temperature Observations and Its Spatial Gradients. United States of America, Oregon, Corvallis: College of Earth, Ocean, and Atmospheric Sciences, Oregon State University, 2012.

Valin Jr. Jr., M. O.; SANTOS, F. M. de M.; RIBEIRO, K. F. A.; NOGUEIRA, M. C. de J. A.; NOGUEIRA, J. de S.. Análise da relação entre abrigos meteorológicos alternativos para pontos fixos e o comportamento de variáveis termo-higrométricas. Brasil: Revista Brasileira de Climatologia, vol. 18, ano 12, 2016.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, WMO. Disaster Risk Reduction Roadmap for the World Meteorological Organization. Switzerland, Geneva:Autor, 2017. Disponível em: <https://www.wmo.int/pages/prog/drr/documents/DRRRoadmap.pdf>. Último acesso em Outubro de 2017.

_____. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Switzerland, Geneva:Autor, 2014.

YANG, J.; LIU, Q.; DAI, W.; DING, R.. A temperature error correction method for a naturally ventilated radiation shield. Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics 149, 40–45, 2016.

Anexo A – Fabricação e construção dos abrigos meteorológicos

Seguem neste anexo informações detalhadas sobre a fabricação de cada abrigo. Desafios, problemas e comentários estão incluídos.

Modelo Pagoda

O modelo Pagoda foi desenvolvido com o objetivo de ser de fácil replicação. Por isso, foi escolhido usar a fabricação digital. A fabricação digital consiste em um processo de fabricação comandado por máquinas a partir de um arquivo digital com informações sobre o objeto em fabricação. A impressora 3D, por exemplo, imprime em plástico um arquivo digital, já uma fresadora corta, fresa, fura um objeto a partir de um arquivo digital. Por isso, o modelo foi desenhado com *software* de desenho 3D FreeCAD³⁸. Os desenhos podem ser usados em diversos tipos de fabricação digital, basta exportar os arquivos para o formato aceito pela máquina de fabricação desejada.

O *design* foi baseado em origamis. As peças foram feitas para serem cortadas em chapas, dobradas e encaixadas de maneira a minimizar a necessidade de colas, apenas o teto exige uma fixação de cola. Cola quente foi usada para fixar o teto a estrutura central, e também para dar uma fixação extra, foi usada em todos os encaixes e contados entre peças. Nem o fundo nem o mezanino foram colados por serem peças móveis que facilitam a manutenção do sensor. Uma cinta plástica une as pontas de cada veneziana como apoio para a montagem.

A primeira versão do Pagoda foi feito em uma fresadora CNC grande. Como a disponível no CTA é de menor porte, foi necessário redesenhar a peça para que coubesse na mesa. O Pagoda é composto de 7 peças. A estrutura central, chamada de "prisma", é um retângulo dobrado em dois pontos, ao longo do seu comprimento maior, de forma a formar um prisma. O prisma possui 12,9 cm de altura e cada lado possui pouco menos de 6 cm. São 18 aberturas de ar de 4 cm de largura e 1 cm de altura. O prisma possui também aberturas que são encaixes para as demais peças, que podem ser vistas na Figura 1. O fundo e o mezanino são um triângulo equilátero com 5,9 cm de lado. O fundo possui um buraco para passagem de fios e do sensor, enquanto o mezanino possui pequenas garras para segurar o sensor. A veneziana são 3 trapézios encostados. A dobra é feita neste contato e, quando dobrado, formam uma figura triangular que envolve o prisma, como na Figura 2.

³⁸FreeCAD é um software livre de desenho de peças 3D. Site oficial em <https://www.freecadweb.org/>.

A base maior de cada trapézio possui 13 cm, a base menor 6,5 cm, altura do trapézio 3,5 cm e o ângulo entre as duas bases menores é de 95°. O teto é um triângulo equilátero de 13 cm de largura.



Figura 1: Prisma dobrado com o fundo e o mezanino encaixados no seu interior.

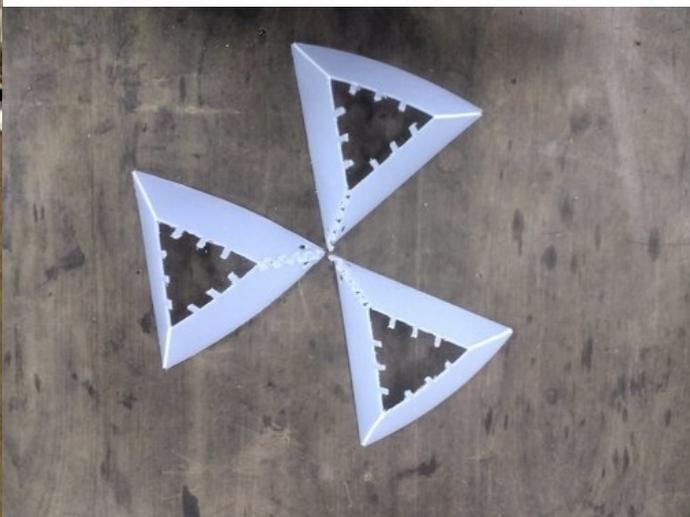


Figura 2: Venezianas dobradas.

Todas estas peças possuem abas que se encaixam em aberturas do prisma. A veneziana engloba o prisma e ajuda a mantê-lo fechado. O uso de uma cinta plástica fechando as venezianas se mostrou essencial para que ficassem firmes em volta do prisma.

Desejava-se que este abrigo fosse fácil de ser replicado e montado, por isso foi dada preferência para materiais que pudessem ser dobrados a mão. A chapa de polipropileno foi escolhida por ser fácil de ser dobrada sem quebrar (basta fazer um vinco na linha da dobradura), ser branca³⁹ e um material que poderia ser cortado com tesoura e estilete⁴⁰. O corte a LASER teria sido preferível para garantir a precisão e facilidade de replicação, já que máquinas de corte a LASER são comuns em gráficas e similares. Porém, o polipropileno não pode ser cortado a LASER, mas é facilmente cortado com fresas. A impressão 3D também foi considerada, mas estas impressora não são tão fáceis de ser encontradas Brasil a fora e tornaria a produção em escala do abrigo mais difícil, já que o custo de terceirizar uma impressão 3D costuma ser maior do que o de outras máquinas com fresadoras, tornos e corte a LASER.

³⁹Quando este critério foi avaliado, não se sabia da característica translúcida do material.

⁴⁰Este critério era importante por se acreditar ser essencial que o abrigo fosse capaz de ser fabricado a partir de um arquivo digital, mas também a mão.

Para cortar o modelo em uma fresadora, é necessário exportar o arquivo .fstd (padrão do FreeCAD) para o formato gcode⁴¹. É nesta fase que a saga do Pagoda começa. O *plugin* do FreeCAD para exportar diretamente para gcode não apresentou bons resultados. Algumas das peças exportadas não eram equivalente a peça desenhada e foi necessário selecionar cada parte de cada peça para que elas fossem exportadas corretamente. Além disso, o código gerado não apresentava alguns comandos básicos de inicialização do corte, como ligar o *spindle*, posicionar em zero, definição do passo; os comandos foram adicionados a mão, mas este processo não seria aceitável dentro de um critério de “fácil modificação” e “fácil reprodução” (algumas especificações mudam de máquina para máquina, então não basta ter um gcode padrão, é preciso permitir que a usuária conseguir alterar algumas configurações associadas as configurações da máquina).

Buscou-se então a opção de exportar para .dxf⁴² e, com o *software* de edição de imagem Inkscape⁴³, exportar para o gcode. Os *plugins* do Inkscape parecem não funcionar com arquivos .dxf⁴⁴, por isso partiu-se para um novo *software*: Cam.py⁴⁵. Esta tentativa também falhou e foi necessário partir para outra opção.

Esta opção, que poderia ser a primeira, é usar o *software* FlatCAM⁴⁶, o mesmo já usado pela equipe do CTA para gerar arquivos gcode. O FlatCAM aceita apenas arquivo nos formatos gerber, excellen e svg. O FreeCAD tem a opção de exportar para svg, porém o plano escolhido para ser planificado é fixo: xy. Como algumas das peças desenhadas estavam no plano zx, elas tiveram que ser redesenhadas (não foi encontrado uma maneira de mudar o planos do objeto). Apesar de alguns imprevisto, esta foi a opção mais bem sucedida e que possibilitou a correta geração de arquivos gcode que representam as peças associadas⁴⁷.

Nenhum dos *softwares* testados permitia considerar a espessura da ferramenta no desenho. Isso faz com que o centro da fresa, sua ponta, passe por cima da linha do desenho. Acontece que como a espessura desta ferramenta não é nula, ela corta alguns milímetros a mais do que a linha de espessura infinitesimal do esquemático. Todas as peças tiveram que ser redesenhadas considerando o tamanho da ferramenta. Isso, por si só, já acaba com a vantagem da fabricação digital de facilitar a replicação, pois alguém que usasse outra ferramenta, outra espessura, já não poderia usar os mesmos arquivos.

41G-code é uma linguagem de programação usadas para o controle de máquinas de controle numérico computadorizado (CNC).

42Mias detalhes sobre este teste em: <http://cta.if.ufrgs.br/issues/471#Exporta%C3%A7%C3%A3o-de-dxf-para-gcode>

43O Inkscape é um software livre de edição de imagem. Mias informações em: <https://inkscape.org/>

44Mais detalhes sobre este teste em: <http://cta.if.ufrgs.br/issues/471#Teste-1-com-Inkscape>

45O Cam.py é um scripit em python capaz de transfrmar imagens em arquivos g-code. Mais informações sobre este teste em: <http://cta.if.ufrgs.br/issues/471#Teste-2-com-Campy>

46O Flatcam é um software livre CAM e CAD para placas de circuito impresso. Mais informações em: <http://flatcam.org/>

47Mais detalhes sobre o teste com o Flatcam em: <http://cta.if.ufrgs.br/issues/471#FlatCAM>

O problema da exportação para gcode não era o único. A chapa de polipropileno é levemente curvada, o suficiente para não ser possível fixá-la na mesa de sacrifício apenas com fita adesiva dupla (como se costuma fazer com placas de cobre). A solução foi fixar a chapa com os próprios parafusos da mesa de sacrifício. Mesmo assim, a chapa não ficou rente a mesa, a região central ficou com uma “barriguinha”. Esta barriga fazia com que os vincos acabassem atravessando a peça - por isso nenhum vinco foi feito com a máquina, foram todos feitos a mão - e, em alguns pontos, a base da ferramenta alcançava a chapa, de maneira a cortar a chapa com uma espessura maior do que a da ponta da ferramenta.

Não bastando estes problemas, a ferramenta aquece - devido a alta velocidade e atrito - e derrete o plástico. Em alguns casos pequenos lascas da peça cortada derretiam, grudavam na ferramenta e passam a fresar a peça junto com a fresa. Estas duas situações alteravam as dimensões das peças, o que não é nada desejável para uma estrutura baseada na precisão dos encaixes. Devido a essas dificuldades, e também da impossibilidade de descontar a espessura da fresa, as dimensões finas da peça não são equivalentes as dimensões nos desenhos.



Figura 3: Resultado de um corte no qual lascas da chapa aderiram a fresa e passaram a contribuir no corte.

Apesar de todos estes obstáculos, foi possível fabricar um Pagoda funcional, com todas as peças encaixadas corretamente e que durou 3 meses exposto ao ambiente externo. A caracterização deste abrigo mostra que o polipropileno não bloqueia a radiação infravermelha, o que não bom para um abrigo meteorológico. Acredita-se também que a ventilação natural é bloqueada pelo comprimento das abas, o que não é difícil de ser adequado.

A proposta de origami funcionou bem, o maior obstáculo está na fabricação. Muitos dos desafios não foram superados e irão reaparecer na fabricação de um segundo protótipo. Caso desejado seja continuar o desenvolvimento deste modelo, é crucial que o material de que é feito o

abrigo seja alterado. É fortemente sugerido que também o método de fabricação também seja alterado.

Modelo Aspirado

A fabricação deste modelo foi simples e levou apenas uma tarde. A Tabela 1 lista os materiais usados para a construção deste modelo, bem como o preço e comércio onde foi adquirido.

As ferramentas usadas foram:

- Serra fina;
- Lima;
- Cola quente;
- Tesoura;
- Alicates com ponta fina e afiada;
- Micro-retífica.

Material	Tipo de Comércio	Preço Unitário	Unidades Adquiridas	Comentários
Cano PVC de 10cm diâmetro	Ferragens	< R\$ 10,00	50cm	Ferragens pequenas costumam vender este cano por metro, o que lojas maiores não fazem
Embalagem de Alumínio 500ml	Mercado	R\$8,00	1	-
Embalagem de Alumínio 1100ml c/4	Mercado	R\$13,00	1	-
Ventilador/Cooler 80x80x25mm, 12v	Comércio especializado de computadores e eletrônica	< R\$ 20,00	1	-
Transformador 7,5V	Comércio especializado de computadores e eletrônica	R\$20,00	1	-

Peneira Convencional 11cm A	Mercado	R\$ 2,99	1	-
Cola epoxi	Material de construção	R\$ 11,00	1	Atenção! Deve ser manuseada com luva ou utensílios molhados
Super cola	Mercado	R\$ 2,00	1	-
Arame	-	-	100 cm	Material Reciclado
Tampa de plástico com diâmetro maior do que 10cm	-	-	-	Material reciclado

Tabela 1: Lista de materiais, custo e loja onde se pode encontrar os materiais para a construção do Aspirado.

A construção do abrigo seguiu os seguintes passos:

1. Com um lápis, foi marcado no cano onde o corte deveria ser realizado. Do mesmo cano foi feita o parte horizontal e a saída de ar. Com uma serrinha foi cortado 35 cm do cano, do restante, foi cortado 15 cm. As extremidades do cano foram lixadas para ficarem regulares (Figura 5).
2. Encaixe dos canos: dois sulcos em forma de U foram cortados do cano de 15cm para que este se encaixasse no cano de 35cm. A profundidade do sulco foi de aproximadamente 5cm e a largura de 9cm. Para iniciar os cortes foi usada a serrinha, mas para fazer as curvas foi necessário usar uma tesoura ou alicate de corte (Figura 4);



Figura 5: Marcas para o corte dos canos.



Figura 4: Corte em U feito com a serra da foto.

3. Na posição onde foi fixado o cano de 15cm, foi recortado do cano de 35 cm um quadrado de 8cm por 8cm (Figura 6).

4. Encaixe do ventilador: para encaixar o ventilador na entrada de ar (cano de 15cm) foi cortado (com tesoura e serrinha) quatro retângulos, distanciados entre si de 8cm (largura do ventilador), com 2,5cm de profundidade (espessura do ventilador), o ventilador deve funcionar como um exaustor, por isso foi posicionado com a direção do vento para fora do abrigo (Figura 7).

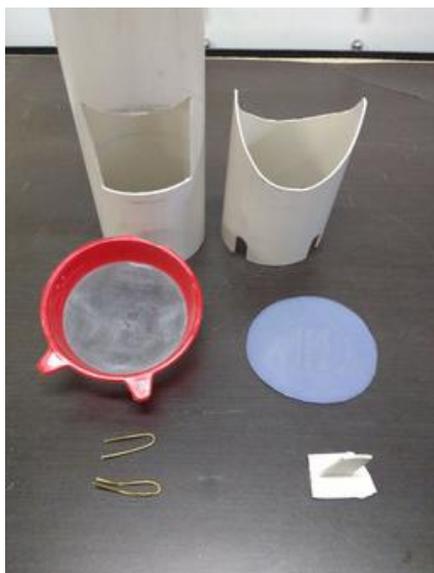


Figura 6: Na esquerda superior, cano de 35cm com entrada de ar cortada, a direita superior, cano de 15cm com encaixe para o ventilador e para o outro cano cortados, no centro e esquerda, peneira, a direita a tampa e embaixo os arames usados para fixar a peneira.



Figura 7: Cortes de encaixe do ventilador sendo lixados com uma lima de metal.

5. Saída lacrada: usando uma tampa de plástico de pote de cozinha, um disco de 10cm de diâmetro foi recortado e colado com super cola em uma das aberturas do cano de 35 cm (Figura 8).

6. Entrada de ar removível: o cabo da peneira foi cortado fora, dois pequenos furos foram feitos de cada lado da peneira e do cano PVC de 35cm, no lado da entrada de ar removível (Figura 9), pequenos pedaços de arame foram cortados para fixar a peneira no cano.

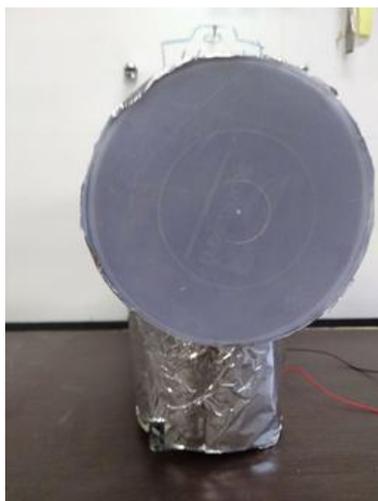


Figura 8: Tampa plástica colada de forma a bloquear a passagem de ar.



Figura 9: Detalhe dos furos para fixação da peneira.

7. Apoio do sensor: para fixar o sensor no centro do cano foi usado arames, um círculo duplo de arame com o mesmo perímetro interno do cano foi feito, as duas pontas do arame travessam o cano no centro. Quanto mais próximo o perímetro do perímetro interno do cano, mais firme o círculo ficará, melhor. Foram coladas algumas fitas adesivas para fixar o arame no cano. Não é desejado que o sensor seja fixado de maneira permanente, para facilitar a manutenção (Figura 10).

8. Com super cola, o cano de 15cm foi colado no cano de 35cm e o ventilador no cano de 15cm. Para tapar os vãos entre os canos foi usado durepoxi (Figura 11)

9. As embalagens de alumínio foram desmontadas até ficarem o mais planas possível e coladas por todo o abrigo.



Figura 10: Detalhe dos arames enrolados para segurar o sensor, na foto representado pelo cabo USB.



Figura 11: Detalhe do da cola epoxi usada para tapar os buracos entre os dois canos.

O resultado final, possui 33 cm de comprimento e 22 cm de altura, na Figura 12 estão detalhados as demais dimensões do abrigo. O custo final foi fi entre R\$60,00 e R\$70,00. A alimentação e corrente nominal do ventilador usado é de 12V- 0,18A. Como inicialmente a alimentação seria a mesma do restante do sistema (12V), foi soldado ao fio do ventilador um resistor de 100ohm de forma que a tensão que chega no ventilador é de ~6V. A placa solar fornece 5 V apenas. Para fixação no Varal de Abrigos, um furo foi feito bem perto do cano curto e, com uma barra roscada, duas porcas e duas arruelas, o abrigo foi fixada na barra.

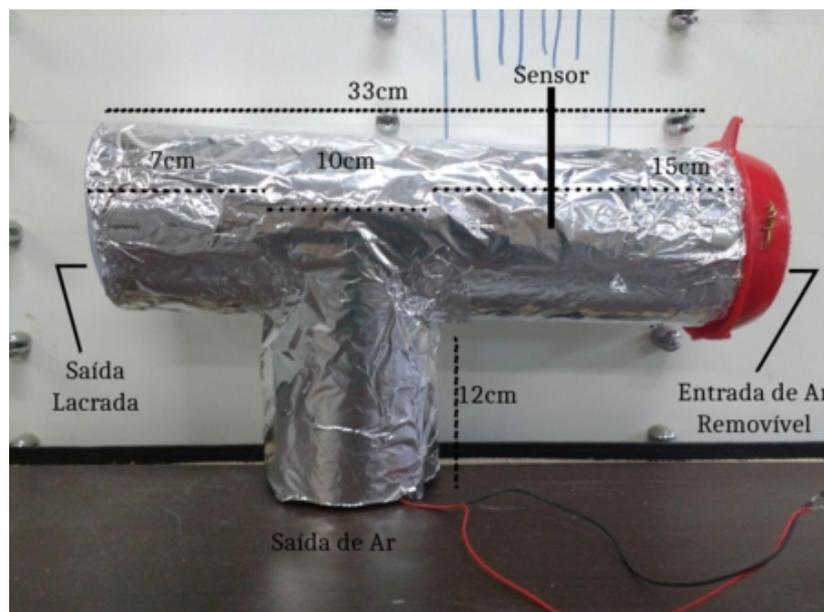


Figura 12 Abrigo aspirado com as dimensões finas; na foto o abrigo estava coberto apenas com papel alumínio, só depois foram acrescentadas as embalagens de alumínio.

Modelo Pratos

Foram construídos 3 réplicas deste modelo, os chamados Pratos I, Pratos II e Pratos III. Os pratos utilizados são do tipo fundo, com diâmetro externo de 24 cm e diâmetro interno de 18 cm. Segundo suas etiquetas são de "PP", com validade indeterminada! Foram usados 21 pratos, 7 para cada abrigo. A cor com mais unidades disponíveis era azul bebê, complementou-se com verde-claro. Foram usados dois pratos no topo, para aumentar o bloqueio da radiação infravermelha. Uma funcionária da loja em que os pratos foram adquiridos espontaneamente informou a pesquisadora que "esses pratos duram para sempre".

Lista de materiais (para um abrigo):

1. 60 cm de barra roscada 1/4" ;
2. 8 porcas e 8 arruelas 1/4" ;
3. 45 cm de mangueira de nível ;

4. 7 pratos plásticos;
5. Chapa de acrílico 3 mm (10x10cm) ;
6. Cano PVC convencional (10cm de comprimento) ;
7. Cinta plástica (10mm) ;
8. 2 latas de 1l de Spray Branco Fosco Esmaltado - Uso geral ;
9. Durepox.

Lista de ferramentas:

1. Furadeira (brocas de 6,5 mm e serra copo de 57 mm) ;
2. Lima ;
3. Alicates italiano (ou similar) ;
4. Serra fina;
5. Tesoura
6. Régua com pelo menos 10 cm.

A fabricação possui várias etapas, a primeira dela é a dos cortes:

1. No centro de cada prato – com exceção dos do teto -, foi feita uma abertura de 6 cm de diâmetro com uma serra copo 57 mm. Tentou-se fazer os furos de todos os pratos alinhados, mas este resultado não foi alcançado. Na Figura 13 é possível ver a serra copo em foco.
2. São três furos para as barras de sustentação em cada prato, cada um a uma distância de 1.5 cm da extremidade. Os furos foram feitos com uma broca de 6 mm.
3. Com uma serrinha, as barras roscas de ¼" foram cortadas, cada uma com 22 cm .



Figura 13: Furo central realizado com a serra copo em destaque.

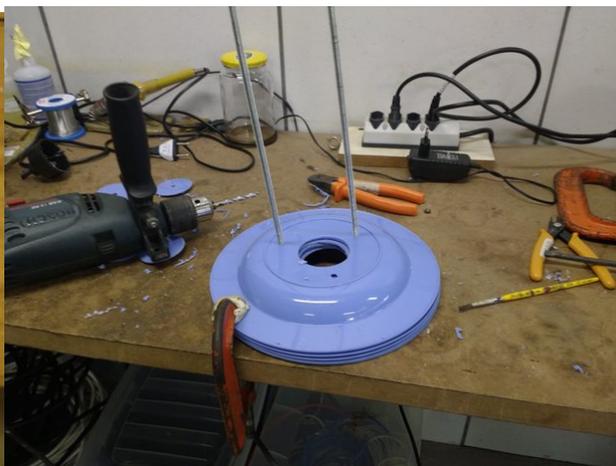


Figura 14: Corte dos furos para as barras; as próprias barras foram utilizadas para ajudar no alinhamento dos pratos.

A segunda etapa consiste nos cortes da peça de acrílico de sustentação do sensor. Ela não foi baseada em Valin Jr. et al. (2016), tendo sido adaptada com materiais disponíveis no CTA. Os paços feitos foram

1. Com um objeto afiado, foram marcados três triângulo equiláteros no acrílico. O acrílico foi posicionado sobre um dos pratos furados e foi marcada a posição de cada furo para a barra de sustentação e do furo central. Não foi registrado o tamanho do triângulo, mas pode-se afirmar que eram alguns centímetro maior do que o triângulo formado pelos furos das barras roscadas.
2. Com uma serra elétrica os triângulos foram cortados da peça maior.



Figura 15: Triângulos marcados na peça de acrílico.’



Figura 16: Triângulos cortados.

3. Com uma furadeira e broca de 6 mm foram feitos os furos para as barras.
4. Para fazer o furo central foi usada uma ferramenta conhecida como “broca de madeira”. Sua espessura era a mesma do cano PVC usado na próxima etapa. O resultado final é uma um triângulo de acrílico com um furo nomeio e 1 em cada ponta.



Figura 17: Furo central do acrílico feito com uma broca de madeira.



Figura 18: Resultado final dos cortes na peça de acrílico.

A terceira etapa são os cortes no cano PVC aonde o sensor em si será fixado.



Figura 19: Da esquerda para direita, alicate de corte, PVC cortado, DHT22 e uma régua.



Figura 20: Resultado final da peça de fixação do sensor.

1. Os canos foram cortados com uma serrinha, cada um com 10 cm de comprimento.
2. Com um alicate de ponta fina, o cano PVC foi cortado até sobrar um retângulo estreito e comprido.
3. Com uma micro-retificadora foi feito um pequeno furo no topo deste retângulo, do mesmo tamanho no furo no DHT22. Na Figura o sensor foi fixado com um parafuso, mas na instalação final foi usado uma cinta plástica.
4. Esta peça foi então fixada no acrílico com cola epoxi.

A quarta etapa foram os cortes da mangueira de nível. Com uma régua foram marcados riscos com 2,5 cm de distância. Com uma tesoura, a mangueira foi cortada nestas marcas.



Figura 21: Mangueira de nível marcada para o corte.



Figura 22: Separadores feitos com mangueira de nível

A quinta etapa, última antes da montagem, foi a pintura dos pratos. Eles foram pintados com tinta spray branca. Os pratos dos tetos foram completamente pintados, com mais de uma mão, enquanto os de mais pratos tiveram apenas o seu perímetro pintado.



Figura 23: Pratos secando após serem pintados de branco.

A montagem consistiu em empilhar os pratos, cada um separado por um pedaço da mangueira de nível. Nas duas extremidades de cada barra os pratos foram fixados com arruelas e

porcas. Logo abaixo do último prato foi firmado, também com porcas e arruelas, a peça de acrílico, de maneira que, nos 3 casos, a distância entre o último prato e o sensor eram a mesma.



Figura 24: Peças do abrigo dispostas na sequência de montagem.

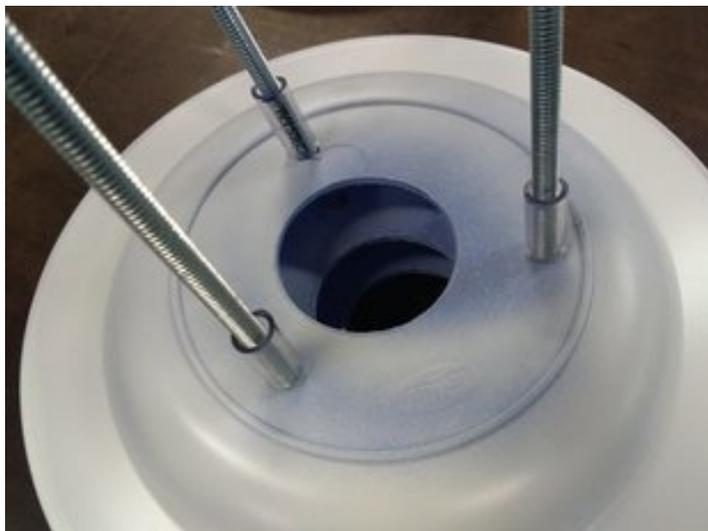


Figura 25: Detalhe dos separadores de nível em cima de uma prato durante a montagem.

Na Tabela 2 encontram-se a lista de materiais, custo e loja onde se pode encontrar os materiais para a construção deste abrigo.

Material	Tipo de comércio	Preço unitário	Unidades	Comentários
Barra Rosqueada 1/4	material para construção	6,69	1	A unidade possui 1m, a espessura é 1/4 de polegada
Barra Rosqueada 3/16	material para construção	5,39	1	A unidade possui 1m, espessura de 3/16 polegadas
Porca sextavada 1/4	material de construção	0,1120	-	
Arruela lisa 1/4	material de construção	0,12	20	-
Porca sextavada	material de	-	20	-

3/6	construção			
Arruela lisa 3/6	material de construção	0,13	20	-

Tabela 2: Lista de materiais, custo e loja onde se pode encontrar os materiais para a construção do Pratos.

Modelo Pet

A fabricação do modelo PET é simples e rápida. O custo final foi entre R\$10 e R\$20. Para a fabricação, foi usado uma garrafa PET de 2l de refrigerante com uma altura total de 35 cm.

A lista de ferramentas usadas é:

- Tesoura com ponta, estilete ou faca de cozinha;
- Cola quente;
- Cola branca.

A construção foi feita segundo o tutorial fornecido por Barbosa et al. (2008), replicado a seguir:

1. Corte fora o topo da garrafa, a uma altura de 20 cm da base;
2. Na base, corte 5 abas, espaçadas de 1,5 cm, elas podem ter o formato triangular propiciado pela própria estrutura dos pés da garrafa, a ponta deste triângulo deve permanecer fixado na garrafa, com um largura de 1,5 cm ainda fixos na garrafa;
3. As abas criadas devem ser erguidas até estarem no mesmo plano da base pois elas servirão como apoio do teto, como na Figura 26.
4. Com cola quente ou cola branca, cole o papel alumínio entorno da garrafa PET.
5. Com cola quente, cole topo de cada aba e a base da garrafa na assadeira (o modelo original usa o papel de alumínio ao invés da assadeira).

Os cortes foram feitos com estilete e tesoura, mas podem também serem feitos com uma faca quente. Foram feitas 5 aberturas no fundo da garrafa, aproveitando os nós dos pés da garrafa; cada abertura tem 5,5cm x 4,0cm. O diâmetro da base é de 10 cm e o do topo, com as abas das aberturas abertas, é de 19 cm. Para fixar na estação foram feitos dois furos separados de pouco mais de 3 cm. Um cinta plástica longa foi cruzada nestes dois furos e por outro furo na barra da estação, como na Figura 27.



Figura 26: Estrutura pronta para ser recoberta com as camadas de alumínio.



Figura 27: Visão inferior do abrigo Pet. É possível ver a entrada de ar inferior e o teto feito com a assadeira. A cinta plástica usada para fixar na estação o atravessa

Material	Tipo de Comércio	Preço Unitário	Unidades Adquiridas	Comentários
Garrafa PET	-	-	-	Material Reciclado
Papel alumínio	Mercado	< R\$10,00	1	Foi compartilhado com outros projetos, o que dividiu o custo final
Assadeira Oval 4L	Mercado	R\$ 7,00	1	Dimensões: 5,4cmx3,20cm, 4L
Fio de Nylon (pesca)	Ferragem	R\$0,50/m	1 m	-

Tabela 3: Lista de materiais usados na construção do abrigo Pet.

Anexo B - Caderno de Laboratório Aberto

O CTA possui o gerenciador de projetos Chilly projects e o repositório digital Git instalados no seu servidor. O repositório git estão todo tipo de código desenvolvido neste projeto, os dados coletados, bem como vários dos gráficos gerados e este relatório. Nas ferramenta “tarefas” disponibilizada pelo Chilly projects foram registrados comentários, anotações, estudos, arquivos , fotos, gráficos, artigos e qualquer tipo de informação considerada relevante pela pesquisadora. O estilo de escrita é informal, estando várias vezes em desacordo com as normas formais de escrita de português e inglês. O caderno de laboratório tende a ser um reflexo do fluxo de pensamento da pesquisadora, então pode conter informações erradas e não seguir uma sequencia lógica de pensamentos e conclusões e pode ser considerado confuso em algumas de suas partes. Foi feito o esforço de conclusões finas e informações de maior relevância fossem destacadas. Por esses motivos, o caderno de laboratório não pode ser considerado um documento final de documentação, e relatórios mais diretos e resumidos, como este, são necessários

As tabelas a baixo trazem o endereço eletrônico de cada tarefa e repositório associados ao conteúdo que contém. A Tabela 5 traz o endereço onde se encontram os dados analisados. Os resultados deste relatório serão gradualmente adicionados a página do projeto Estações Meteorológicas Modulares dentro das seções “Abrigos meteorológico” e “DHT 22”, disponíveis em http://cta.if.ufrgs.br/projects/estacao-meteorologica-modular/wiki/Abrigo_Meteorológico e http://cta.if.ufrgs.br/projects/estacao-meteorologica-modular/wiki/Sensor_DHT22 respectivamente.

	Repositório do código	Anotações e comentários de desenvolvimento	Data de criação	Última atualização	Número de atualizações
Adaptação do Firmware Arduino	https://git.cta.if.ufrgs.br/mfreitas/AbriigoMeteorologico/tree/master/Aquisicao de dados/firmwares/meteorolog_3	Adaptação do Sistema de aquisição de dados da EMM para os teste dos abrigos meteorológicos : http://cta.if.ufrgs.br/issues/481	21/05/2018	01/06/2018	18
Adaptação do Firmware NodeMCU	https://git.cta.if.ufrgs.br/mfreitas/AbriigoMeteorologico/tree/master/Aquisicao de dados/firmwares/esplogger_3	Adaptação do Sistema de aquisição de dados da EMM para os teste dos abrigos meteorológicos : http://cta.if.ufrgs.br/issues/481	21/05/2018	01/06/2018	18
Adaptações na placa de controle	-	Adaptação do Sistema de aquisição de dados da EMM para os teste dos abrigos meteorológicos : http://cta.if.ufrgs.br/issues/481	21/05/2018	01/06/2018	18

Tabela 1: Firmware do sistema de aquisição de dados e adaptações na placa de controle.

	Repositório do Script em R	Anotações, fotos e comentários de desenvolvimento	Data de criação	Última atualização	Número de atualizações
Caracterização e Calibração do DHT22, bem como estudos sobre análise de erro e incertezas, e análise descritiva.	https://git.cta.if.ufrgs.br/mfreitas/AbrigoMeteorologico/tree/master/Aquisicao de dados/Calibração	Comparação de dados entre diferentes DHTs : http://cta.if.ufrgs.br/issues/483 e Análise descritiva da temperatura – calibração : http://cta.if.ufrgs.br/issues/527 *	21/05/2018 (ambas)	01/06/2018 e 5/06/2018	17
Análises dos dados de 22 de Maio a 7 de Junho **	https://git.cta.if.ufrgs.br/mfreitas/AbrigoMeteorologico/tree/master/Aquisicao de dados/Análise-22-5-7-6	Análise descritiva dos dados de 22 de Maio a 7 de Junho - Varal de Abrigos: http://cta.if.ufrgs.br/issues/532	09/06/2018	14/06/2018	6
Pós-Calibração de 7 DHTS ***	-	Pós-Calibração de 7 DHTS - Varal de Abrigos: http://cta.if.ufrgs.br/issues/533	01/07/2018	-	-

Tabela 2: Códigos em R usados nas análises; gráficos e resultados das análises. * E também da umidade relativa do ar.
** Maior parte desta análise foi feita diretamente neste relatório, e será atualizada com ele em breve. *** A tarefa ainda está em andamento.

	Anotações, fotos e comentários de desenvolvimento	Data de criação	Última atualização	Número de atualizações
Revisão bibliográfica sobre medidas de temperatura e sobre abrigos meteorológicos	Estudos sobre medidas de temperatura e sobre o uso de abrigos meteorológicos, ou abrigos de radiação : http://cta.if.ufrgs.br/issues/529	04/06/2018	06/06/2018	10
Revisão bibliográfica sobre medidas de umidade do ar e sobre pesquisas com DHT22.	Estudos sobre medidas de umidade do ar : http://cta.if.ufrgs.br/issues/531	04/06/2018	12/06/2018	3

Tabela 3: Leituras, estudos e comentários sobre artigos, livros e outras fontes sobre temperatura, umidade do ar e abrigos meteorológicos.

	Anotações, fotos e comentários de desenvolvimento	Data de criação	Última atualização	Número de atualizações
Desenvolvimento de instalação da estrutura mecânica de sustentação da estação. Contém também os registros da manutenção e coleta de dados.	Instalação dos abrigos meteorológicos no INEMT : http://cta.if.ufrgs.br/issues/502	09/02/2018	31/05/2018	23
Aspectos gerais da fabricação de 6 abrigo meteorológico de baixo custo.	Construção de 4 abrigos meteorológicos para teste : http://cta.if.ufrgs.br/issues/468	07/12/2017	04/04/2018	17
Detalhes da fabricação do abrigo Pet.	Abrigo Vertical Passivo de Garrafa PET Aluminizada : http://cta.if.ufrgs.br/issues/478	14/12/2017	03/04/2018	4
Detalhes da fabricação do abrigo Aspirado.	Abrigo Meteorológico Aspirado Horizontal de Cano : http://cta.if.ufrgs.br/issues/477	13/12/2017	04/04/2018	5
Detalhes da fabricação do abrigo Pagoda.	Desenvolvimento do abrigo pagoda : http://cta.if.ufrgs.br/issues/471	07/12/2017	04/04/2018	15
Detalhes da fabricação do abrigo Pratos I, II e III.	Construção Abrigo vertical passivo com pratos de PS : http://cta.if.ufrgs.br/issues/482	30/12/2017	04/04/2018	6

Tabela 4: Fabricação e instalação dos abrigos de baixo custo testados.

Dados abertos

Todos os dados analisados estão disponíveis no repositório git do CTA e sob a licença Creative Commons BY-SA 4.0⁴⁸, o que significa que podem ser usadas para qualquer fim contanto que se cite a autora e que seu uso derivado possua a mesma licença de uso.

Dados	Período	Endereço do repositório
Usados para a caracterização e calibração.	26/01 a 02/02 de 2018	https://git.cta.if.ufrgs.br/mfreitas/AbrigoMeteorologico/blob/master/Aquisicao%20de%20dados/Calibra%C3%A7%C3%A3o/Testes%20com%20DHTs%20sem%20Abrigos/DATALOG_para_calibracao-26-1-a-2-2.csv
<i>Offset</i> da temperatura aplicado na calibração.		https://git.cta.if.ufrgs.br/mfreitas/AbrigoMeteorologico/blob/master/Aquisicao%20de%20dados/Calibra%C3%A7%C3%A3o/Temp_Offset.csv
Medidas de temperatura e umidade relativa não calibrados - com amostragem de 1 min.	22/05 a 5/06 de 2018	https://git.cta.if.ufrgs.br/mfreitas/AbrigoMeteorologico/blob/master/Aquisicao%20de%20dados/An%C3%A1lise-22-5-7-6/DATALOG-2018-22de5a7de6.csv
Medidas de temperatura calibradas - com amostragem de 1 min.	22/05 a 5/06 de 2018	https://git.cta.if.ufrgs.br/mfreitas/AbrigoMeteorologico/blob/master/Aquisicao%20de%20dados/Calibra%C3%A7%C3%A3o/Temp_Calibrado-22-5-7-6.csv
Medidas de temperatura	22/05 a 5/06 de 2018	https://git.cta.if.ufrgs.br/mfreitas

48 O texto completo em português está disponível em: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.pt>

calibradas - média dos primeiros instantes de cada hora.		s/AbrigoMeteorologico/blob/master/Aquisicao%20de%20dados/An%C3%A1lise-22-5-7-6/Temp_Media_Hora_Instante-22-5-7-6.csv
Umidade relativa do ar (não calibrada) - média dos primeiros instantes de cada hora.	22/05 a 5/06 de 2018	https://git.cta.if.ufrgs.br/mfreitas/AbrigoMeteorologico/blob/master/Aquisicao%20de%20dados/An%C3%A1lise-22-5-7-6/UmRelAr_Media_Hora_Instante-22-5-7-6.csv

Tabela 5: Associação entre cada conjunto de dados utilizados e seu endereço no repositório.

Anexo C - Detalhes sobre o local período dos teste

A estação foi instalada dentro do 8º Distro do Instituto Nacional de Meteorologia, em Porto Alegre, nas coordenadas 30°03'12.5"S 51°10'28.9"O. Os abrigos foram alinhados na direção Norte-Sul, a uma altura de 1,5 m, 8 metros a Nordeste da estação do INEMT. O solo é uma gramínea podada regularmente, não ultrapassando 10 cm.

Ao longo da estação, distante de aproximadamente 20 cm, há uma cerca de concreto e metal que cerca a estação do INMET. Há um arbusto na extremidade norte e outra estação experimental logo a frente, também ao norte. Dois altos pinheiros a 25 metros a nordeste, retardavam a iluminação direta do sol sua proximidade da estação bloqueava o sol e fez sombra sobre no início das manhãs. A sombra se movia na direção sul, de maneira que os abrigos mais ao norte recebiam a luz do sol antes das estações mais ao sul. A 25 metro ao norte há um prédio de alvenaria de 1 andar e 25 metros a leste um prédio de alvenaria de 2 andares. Ao sul e sudeste, a pouco mias de 10 m, um densa vegetação de árvores se estende morro a baixo, a uma altura menor do que a das estações. A sudoeste e oeste, a 25 metros, há uma pequena construção de 1 andar e uma horta de tamanho médio.



Figura 1: Visão da direção sudeste.

A coleta foi feita entre 22 de Maio a 7 de Junho, no meio do Outono. Este período é de transição, com grandes amplitudes térmicas e com a chegada das frentes frias. A velocidade máxima do vento foi 3,7 m/s, com média de 1,1 m/s e rajada máxima de 9,2 m/s é . O período foi de poucas chuvas, com uma precipitação total de 33,8 mm. Nas Figuras 2 e 3 estão os histogramas com a distribuição da velocidade do vento e da precipitação neste período. As temperaturas variaram entre 5°C e 30°C, com média de 15°C. A umidade relativa do ar variou entre 41% e e 100%, com média de 83%.

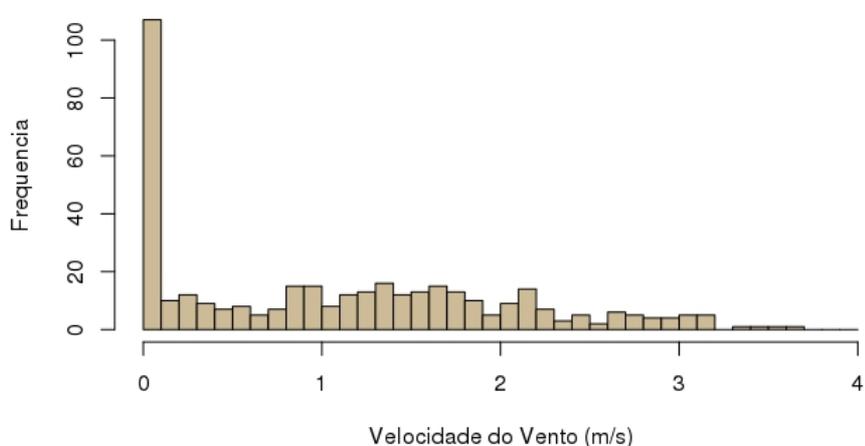


Figura 2: Histograma da distribuição da velocidade do vento (em m/s) para o período entre os dias 22 de Maio e 7 de Junho. A largura de cada coluna é de 0,1 m/s.

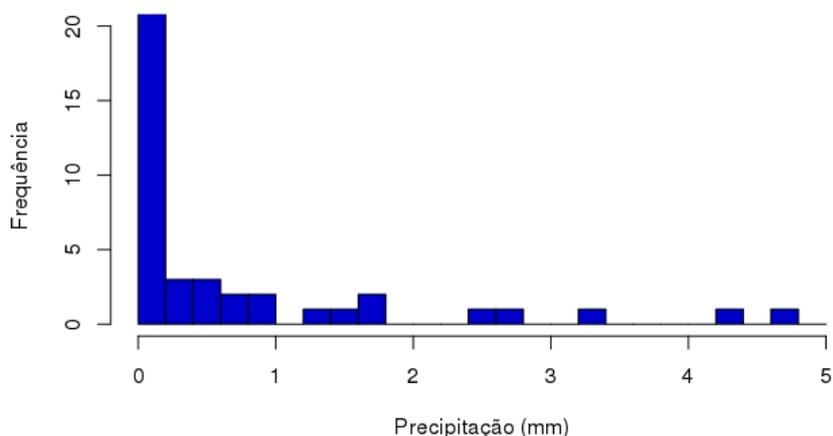


Figura 3: Histograma da distribuição da precipitação (em mm) para o período entre os dias 22 de Maio e 7 de Junho. O eixo das ordenadas foi cortado para ser possível visualizar a frequência dos de mais pontos. A frequência do valor 0 foi de 400. A largura de cada coluna é 0,2mm.

Anexo D - Histogramas de ΔU

Devido as incertezas geradas pelo DHT22 nas medidas de umidade relativa do ar, escolheu-se por não avaliar os erros das medidas a a partir dos abrigos. Seguem os histogramas de ΔU das medidas de cada abrigo.

Abrigo Gill

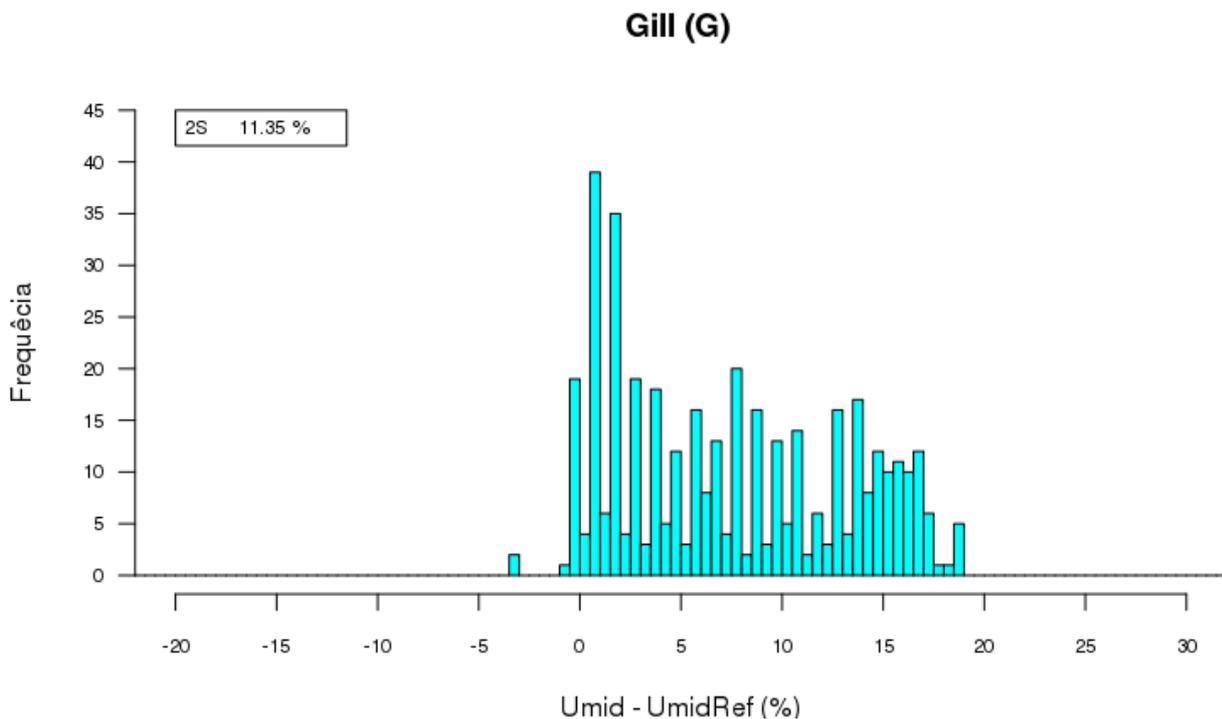


Figura 1: Histograma de ΔU medido no abrigo Gill; no quadro, 2 desvios padrão da distribuição.

O ΔU médio do abrigo Gill foi igual a 7,6%, mais do que 3 vezes a exatidão do sensor. Sua incerteza, igual a 11,35% é mais do que 10 vezes maior do que a especificação do sensor. Na Figura 1 está o histograma de ΔU de cada instante. Alguns picos perto de 0 e 1. Considerando que os resultados de temperatura estavam dentro do esperado para o DHT22, não seria esperado que os valores da umidade relativa do ar medidos pelo abrigo Gill estivesse fora das especificações do sensor.

Abrigo Pagoda

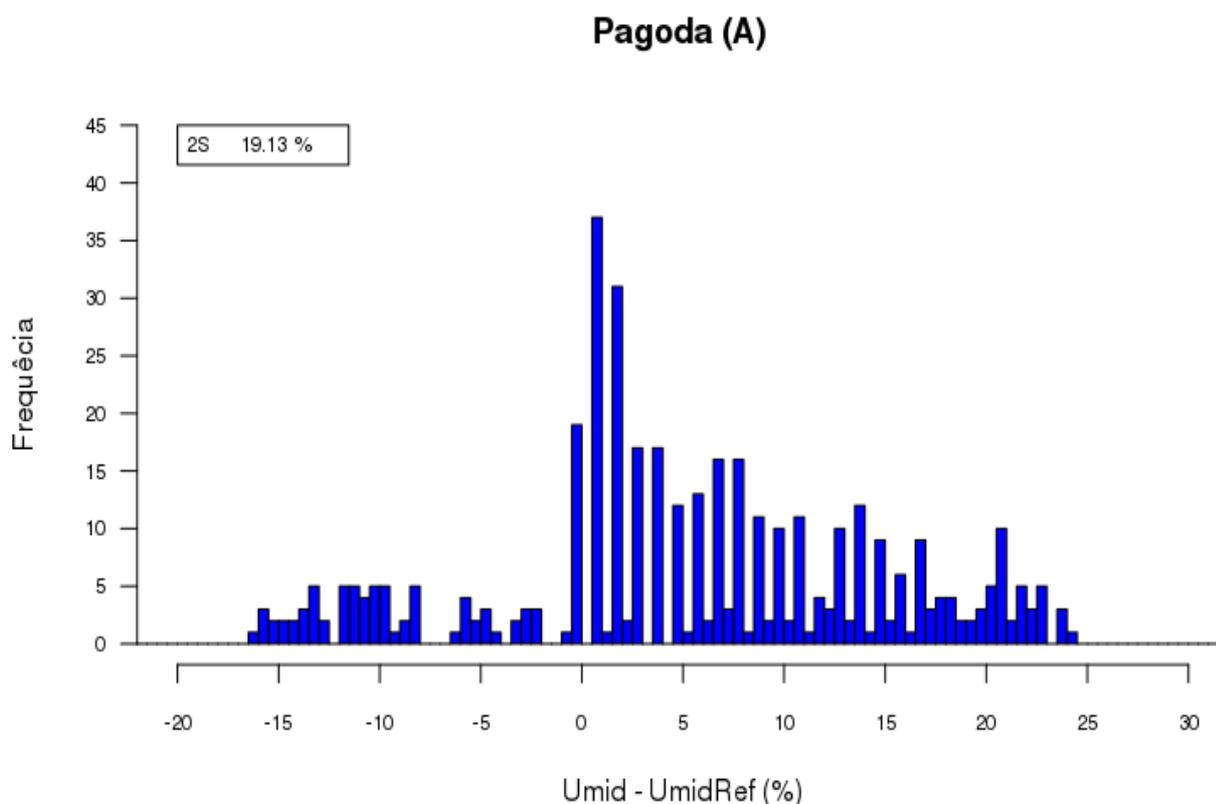


Figura 2: Histograma de ΔU medido no abrigo Pagoda; no quadro, 2 desvios padrão da distribuição.

Do histograma das diferenças de umidade relativa do ar, Figura 2, vemos uma distribuição mais centralizada em 0, com caudas similares nas duas direções, sendo um pouco mais populosa para diferenças positivas. As medidas no Pagoda apresentam uma diferença média de 5,4% e maior desvio padrão, com incerteza de de 19,3%.

Abrigo Aspirado

No histograma das diferenças de umidade relativa do ar, Figura 3, as diferenças estão centradas em 5,9%, com incerteza de 14,18%.

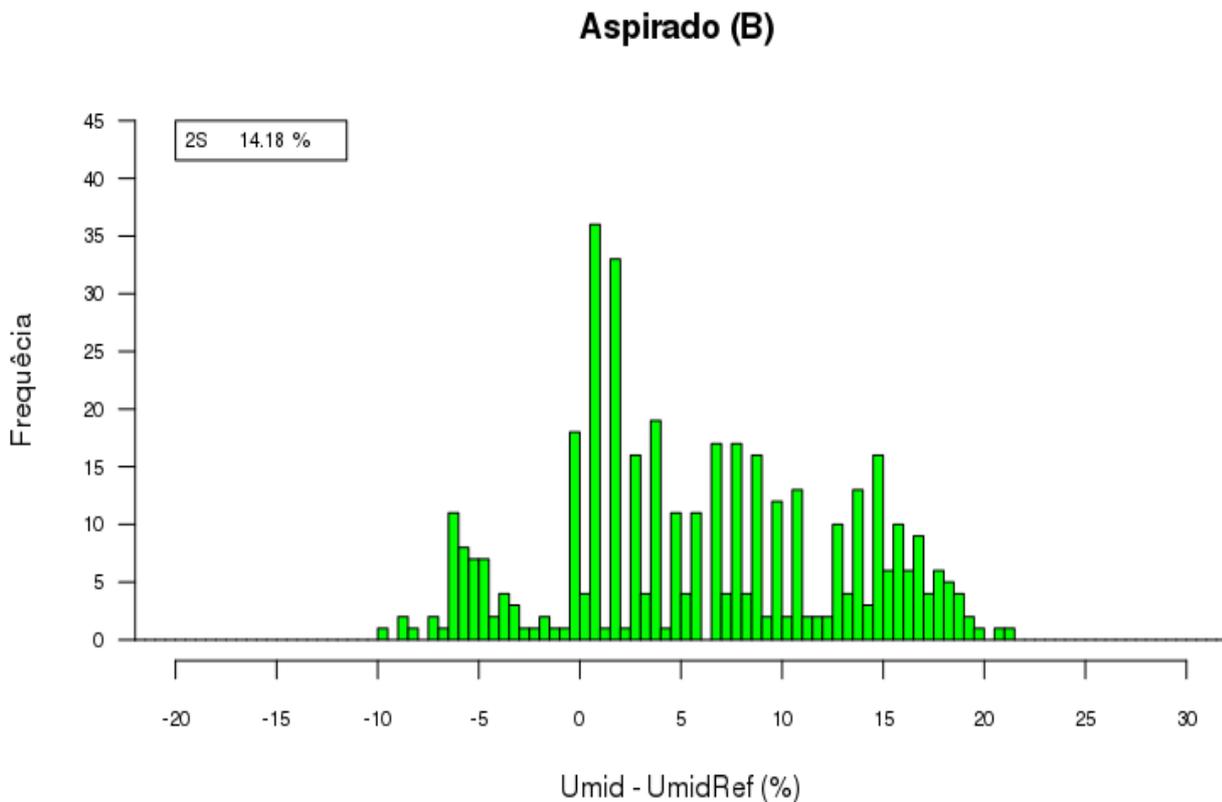


Figura 3: Histograma de ΔU medido no abrigo Aspirado; no quadro, 2 desvios padrão da distribuição.

Abrigo Pet

Em relação a umidade relativa do ar, o Pet obteve a menor diferenças em relação a referência. A análise da Figura 4 mostra que, ao contrário de todos os outros abrigos, as diferenças nas medias de umidade relativa do ar se concentram em valores negativos. A curva do Pet se destaca por alcançar valores de umidade muito menores do que os de mais abrigos, e por ter uma taxa de aumento da umidade menor e mais próxima da taxa do abrigo de referência.

Apesar do material que recobre o Pet ser altamente reflexivo, é material é também muito bom condutor térmico. O aquecimento do teto do abrigo – que consiste em uma assadeira de alumínio - deve aquecer o ar abaixo dela, gerando um efeito de aquecimento por condução, não por irradiação, como no caso do Pagado.

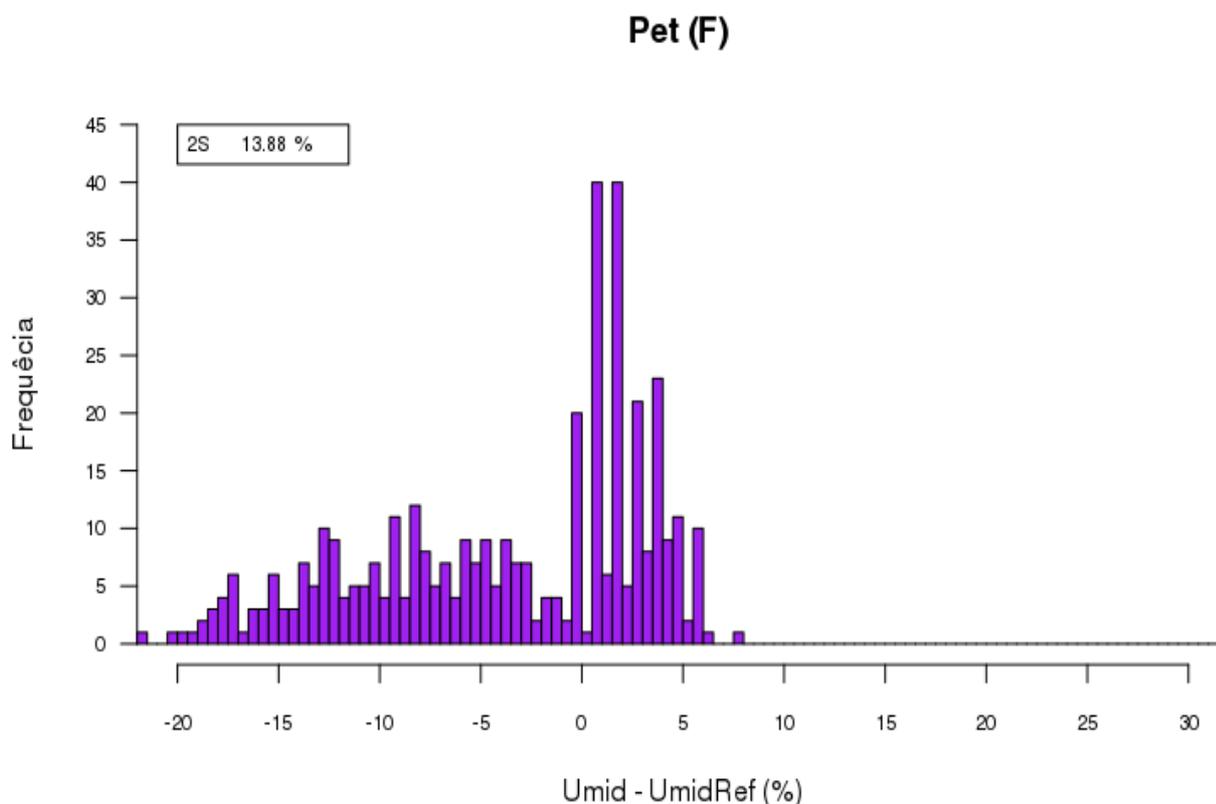


Figura 4: Histograma de ΔU medido no abrigo Pet; no quadro, 2 desvios padrão da distribuição.

O ar quente possui uma saturação maior do que o ar frio. Ao esquentar o ar dentro do abrigo, a mesma quantidade absoluta de umidade representa uma quantidade menor de umidade relativa do ar. Por isso os valores de umidade relativa do ar são negativos para o abrigo Pet. Além disso, o formato e largura da assadeira pode dificultar que o ar quente saia de baixo dela, e afeta também a umidade do ar, o que pode explicar o comportamento diferente que este abrigo apresenta ao final do dia.

Abrigo Pratos I, II e III

As médias de I e II diferem de III em 7% . É possível verificar visualmente no histograma das diferenças de umidade relativa do ar Figura 5, que os valores mais frequentes estão próximos nos 3 abrigos, mas suas médias estão distantes devido ao desvio padrão de I e II ser maior do que de III, o que se reflete no comprimento das distribuições, e da alta densidade de pontos para valores altos.

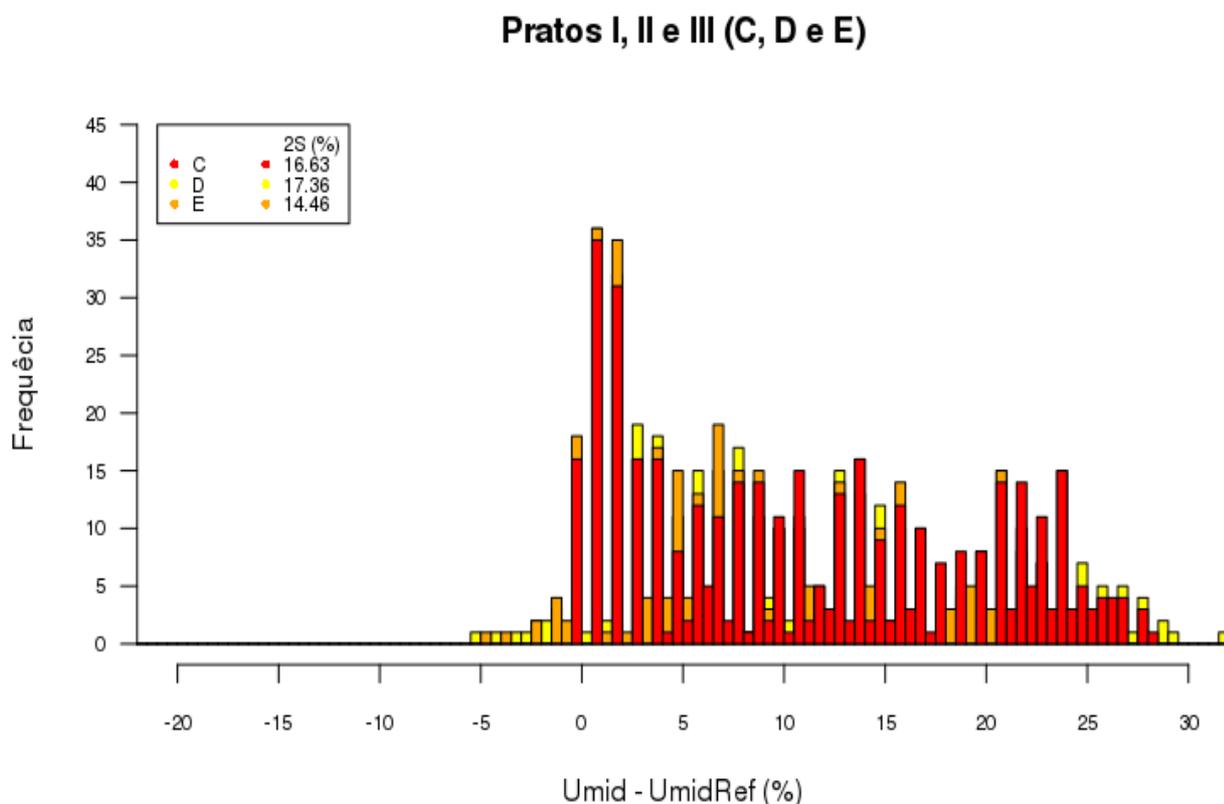


Figura 5: Histograma de ΔU medido nos abrigos Pratos I (C), II (D) e III (E); no quadro, 2 desvios padrão da distribuição.

A caracterização da população de abrigos Pratos feita para temperatura não foi feita para umidade relativa do ar. Sem compreender a causa deste comportamento, não é possível usar estas medidas para caracterizar a influência deste modelo de abrigo meteorológico sob as medidas de umidade relativa do ar.

Amplitude

O mesmo critério de tamanho da amplitude não se aplica para a umidade relativa do ar, mas as mesmas medidas expostas na Tabela 4.8 para temperatura, podem ser encontradas para umidade relativa do ar na Tabela 1 .

Umid. Rel. do Ar (%)	Máxima	Média	Mínima	Amplitude Média	Diária
Pagoda	99,9	87,9	31,1	46,1	
Aspirado	99,9	88,6	36,2	42,3	

Pratos I	99,9	94,1	48,3	26,0
Pratos II	99,9	93,0	39,9	30,5
Pratos III	99,9	91,6	40,6	32,9
Pet	99,9	78,8	33,5	51,5
Gill	99,9	90,1	42,7	34,8
A801	100,0	82,5	43,0	37,9

Tabela 1 Valores máximo, médio e mínimo, bem como amplitudes, dos valores de umidade relativa do ar medidos por todos os abrigos.

7 Anexo E - Velocidade do vento e regressão linear

Na Figura 7.1 é possível ver o ΔT dos abrigos Pagoda e Pratos II (tendo os dados da A801 como referência) e a regressão linear correspondentes. É possível afirmar deste gráfico que a relação entre ΔT e a velocidade do vento é aproximadamente linear. As demais relações não foram expostas por que são análogas e sua adição no mesmo gráfico dificultaria a visualização. A Tabela 7.1 traz os coeficientes angular e linear das funções.

Coefficients	Pagoda (A)	Aspirado (B)	Pratos I (C)	Pratos II (D)	Pratos III (E)	Pet (F)	Gill (G)
Angular	-0,5465	0,3037	0,02725	0,02294	-0,1123	-0,1216	0,04769
Linear	1,2717	0,7132	0,25365	-0,18338	0,2368	0,4410	0,28004

Tabela 7.1: Coeficientes da reta $\Delta T = a*V + b$, onde a é o coeficiente angular, b é o coeficiente linear da reta na abcissa e V é a velocidade do vento em m/s.

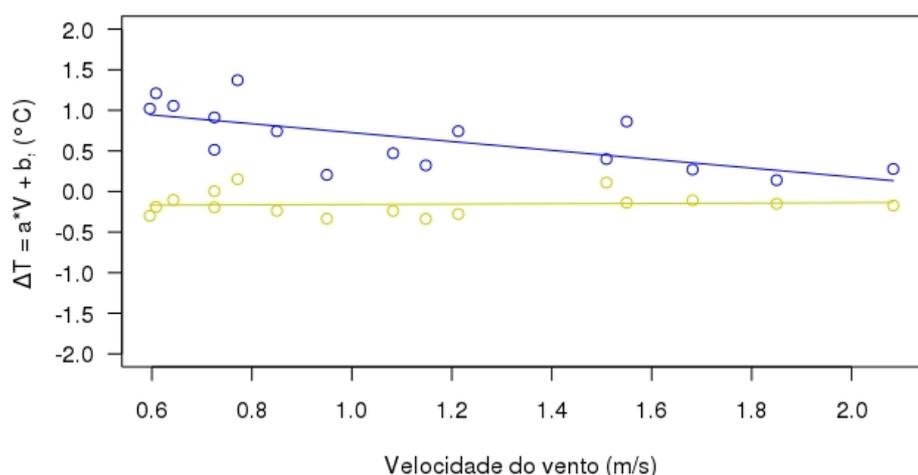


Figura 7.1: ΔT abrigos Pagoda (A) e Pratos II (C) em relação ao A801 e a regressão linear correspondentes.