

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

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE SISTEMAS
DE MONITORAMENTO DE BAIXO CUSTO DE
TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Márlison de Sá Rêgo

**Santa Maria, RS, Brasil
2016**

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE SISTEMAS DE
MONITORAMENTO DE BAIXO CUSTO DE TEMPERATURA
E UMIDADE RELATIVA DO AR**

Márlison de Sá Rêgo

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

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Daniela Guzzon Sanagiotto
Coorientador: Prof. Dr. Daniel Gustavo Allasia Picilli

Santa Maria, RS, Brasil
2016

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

Rêgo, Márlison de Sá
Desenvolvimento e validação de sistemas de monitoramento de baixo custo de temperatura e umidade relativa do ar / Márlison de Sá Rêgo.-2016.
99 f.; 30cm

Orientadora: Daniela Guzzon Sanagiotto
Coorientador: Daniel Gustavo Allasia Piccilli
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, RS, 2016

1. Estação meteorológica de baixo custo 2. Validação de sensores 3. Temperatura e umidade relativa do ar I. Sanagiotto, Daniela Guzzon II. Piccilli, Daniel Gustavo Allasia III. Título.

© 2016

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

E-mail: pfa2009@hotmail.com

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE SISTEMAS DE
MONITORAMENTO DE BAIXO CUSTO DE TEMPERATURA E
UMIDADE RELATIVA DO AR

Elaborada por
Márlison de Sá Rêgo

Como requisito para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Ambiental

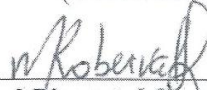
COMISSÃO EXAMINADORA:



Daniela Guzzon Sanagiotto, Dr^a. (PPGEAmb)
(Presidente/Orientadora)



Daniel Gustavo Allasia Picilli, Dr. (PPGEAmb)
(Coorientador)



Manoel Roberval Pimentel Santos, Dr. (IEG - UFOPA)



Claudio Alberto Teichrieb, Dr. (INPE - UFSM)

Santa Maria, 11 de janeiro de 2016.

*Aos meus pais, Miguel e Noélia,
aos meus irmãos, Marroni e Mateus,
e a minha amada esposa Aldeize, dedico.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus pelo Seu infinito amor e insigne sabedoria em nos criar com a capacidade de pensar, tornando-nos capazes de evoluir e através da ciência conhecê-lo melhor e admirá-lo ainda mais.

Agradeço à todos os membros da minha família que me apoiaram, em especial: minha amada esposa Aldeize pela cumplicidade e apoio incondicional, bem como minha mãe Noélia, meu pai Miguel e meus irmãos Marroni e Mateus.

Também aos professores que participaram desta jornada, em especial: a prof. Daniela Guzzon Sanagiotto, por ter aceitado este desafio e ter prontamente apoiado em todos os momentos, não só em aspectos relacionados a pesquisa, mas também pela humanidade nos momentos de doença que passei. Ao prof. Daniel Gustavo Allasia Picilli pelas excelentes contribuições e ao professor Claudio Alberto Teichrieb pelo apoio em todos os passos e procedimentos desta pesquisa e ao prof. Ivanor Müller pelas contribuições na parte estatística.

Aos membros da banca, em especial ao prof. Dr. Manoel Roberval Pimentel dos Santos pelas contribuições, pela disposição na avaliação da dissertação e pelo apoio desde a graduação.

À secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da UFSM, Rosa Maria Brito, por toda a ajuda.

Aos meus amigos do laboratório Ana, Francisco, Gislayne, Roberta e Stefany.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado.

À todos que contribuíram de maneira direta ou indiretamente para o êxito deste trabalho.

“Se vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”
(*Sir. Isaac Newton 1642-1727*)

RESUMO

Plano de Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
Universidade Federal de Santa Maria

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE BAIXO CUSTO DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR

AUTOR: MÁRLISON DE SÁ RÊGO
ORIENTADORA: DANIELA GUZZON SANAGIOTTO
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 11 de janeiro de 2016.

Na perspectiva de otimizar o planejamento, manejo e gestão dos recursos hídricos no contexto nacional os sistemas de monitoramento hidrometeorológico tem passado pelo processo de inovação tecnológica. O aumento do potencial de monitoramento pela diminuição dos custos e a melhora na qualidade dos dados monitorados motivam esse campo de pesquisa. Partindo-se da relevância das variáveis de temperatura e umidade relativa do ar dentre as variáveis monitoradas, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de três sistemas de hardware e software baseados em uma plataforma livre, que meçam essas grandezas com precisão a partir de três sensores de baixo custo, RHT01, RHT02 e RHT03, disponíveis no mercado a partir do ano de 2005. Estes sensores fazem parte do avanço das linhas de sensores, recém-criadas, de polímeros e óxidos semicondutores. A base tecnológica de cada sistema foi o microcontrolador “arduino rev. 3”, o qual gerenciou um circuito eletrônico capaz de coletar e armazenar dados das variáveis hidrometeorológicas, em um dispositivo de memória *flash* (“*sd card*”). Em seguida, com o objetivo de verificar a confiabilidade quanto ao funcionamento, cada sistema foi submetido a três testes de coleta de dados, em três locais diferentes operando em simultâneo com sistemas convencionais utilizados pelo Laboratório de Micrometeorologia da UFSM (LMMET/UFSM). Os locais dos testes estão situados no município de Santa Maria, no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. As condições de microclima entre os testes eram diferentes em virtude do local. O primeiro teste foi realizado no terraço das instalações do INPE-UFSM, o segundo teste no laboratório de micrometeorologia da UFSM e o terceiro em uma área rural do campus central da UFSM, caracterizada pelo bioma pampa, onde fica localizada uma torre de monitoramento da rede micro-sulfux. As coletas ocorreram durante os meses de abril a junho, correspondendo a etapa final da estação de outono e início do inverno no ano de 2015. O primeiro teste durou onze dias, o segundo treze e o terceiro onze. A discretização temporal das coletas foi de um minuto. Com os dados coletados realizou-se análise comparativa dos sistemas de baixo custo e os sistemas convencionais mediante a análise de gráficos, medidas descritivas, e de estatísticas tais como a correlação linear de Pearson, análise de variância e teste Tukey. Com valores de coeficiente de determinação (R^2) superiores a 0,90 em todos os testes e não havendo diferença significativa entre os sensores de baixo custo analisados e o sistemas convencional, com apenas uma única exceção, os resultados indicaram a viabilidade do uso destes sensores para geração de dados médios de temperatura e umidade relativa do ar para intervalo de tempo mínimo de geração de 1 minuto, 15 minutos, 30 minutos e 1 hora. Os resultados também indicaram a possibilidade de pesquisas quantitativas posteriores sobre a influência do abrigo dos sensores nos dados mensurados.

Palavras-chave: Estação meteorológica de baixo custo. Validação de sensores. Temperatura e umidade relativa do ar.

ABSTRACT

Master Dissertation
Graduate Program in Environmental Engineering
Federal University of Santa Maria

DEVELOPMENT AND DOWN MONITORING SYSTEMS VALIDATION COST OF TEMPERATURE AND HUMIDITY ON AIR

AUTHOR: MÁRLISON DE SÁ RÊGO

ADVISER: DANIELA GUZZON SANAGIOTTO

Place and Date of Presentation: Santa Maria, January 11, 2016.

From the perspective of optimizing the planning, management and management of water resources in the national context the hydrometeorological monitoring systems have gone through the process of technological innovation. Increased monitoring of potential for reduced costs and improved quality of monitored data motivate this field of research. Starting from the importance of the variables of temperature and relative humidity among the variables monitored, this paper proposes the development of three hardware systems and software based on an open platform, which measure these values accurately from three sensors low cost, RHT01, RHT02 and RHT03 available in the market from the year 2005. These sensors are part of the advancement of sensor lines, newly created, polymer and semiconductor oxides. The technological base of each system is the microcontroller "arduino rev. 3", which he managed an electronic circuit capable of collecting and storing data from hydro-meteorological variables, in a flash memory device (sd card). Then, in order to check the reliability on the operation, each system was subjected to three data collection tests, at three different sites operating simultaneously with conventional systems used by the Micrometeorology Laboratory of UFSM (LMMET/UFSM). Local tests are situated in the municipality of Santa Maria, in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. The microclimate conditions were different among trials due to location. The first test was performed on the terrace of the INPE-UFSM facilities, the second test in micrometeorology Laboratory of UFSM and the third in a rural area of central campus of UFSM, characterized by the pampa biome, which is located a network monitoring tower micro-sulfux. The collections occurred during the months from April to June, representing the final step of the fall season and the beginning of winter in 2015. The first trial lasted eleven days, the second and third Thirteen Eleven. The time discretization of the collections was a minute. With the data collected was carried out comparative analysis of inexpensive and conventional systems by graphic systems for analysis, descriptive statistics, and statistics such as Pearson correlation coefficients, ANOVA and Tukey test. With determination coefficient values (R^2) higher than 0.90 in all tests and no significant difference between low-cost sensors and analyzed conventional systems, with only one exception, the results indicated the feasibility of using these sensors to generate Data medium temperature and relative humidity for a minimum time interval from generation 1 minute, 15 minutes, 30 minutes and 1 hour. The results also indicated the possibility of further quantitative research on the influence of the sensors under the measured data.

Keywords: low cost weather station. Sensor validation. Temperature and relative humidity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Plataformas de prototipagem eletrônica. (a) arduino. (b) raspberry pi. (c) beaglebone.	21
Figura 2 - Ambiente de desenvolvimento arduino (IDE).....	23
Figura 3 - Arduino UNO rev. 3: (a) frente. (b) verso. (c) esquema.....	25
Figura 4 - Sensor RHT01: (a) RHT01 frente e verso. (b) RHT01 pinos.....	27
Figura 5 - Dimensões do sensor: (a) RHT01 frente. (b) RHT01 verso. (c) lateral.....	28
Figura 6 - Esquema genérico do circuito eletrônico para o funcionamento do sensor RHT01.....	28
Figura 7 - Circuito eletrônico do RHT01 com arduino.	29
Figura 8 - Sensor RHT02.	29
Figura 9 - Esquema genérico do circuito eletrônico para o funcionamento do sensor RHT02.....	30
Figura 10 - Circuito eletrônico do RHT02 com arduino.	31
Figura 11 - Sensor RHT03 e dimensões.....	31
Figura 12 - Esquema genérico do circuito eletrônico para o funcionamento do sensor RHT03.....	32
Figura 13 - Circuito eletrônico do RHT03 com arduino.	33
Figura 14 - Sistema convencional de monitoramento. (a) CS215 - Campbell Scientific. (b) Elemento do sensor CS215. (c) Datalogger convencional CR1000 - Campbell Scientific.	34
Figura 15 - Circuito de comunicação: (a) RHT01. (b) RHT02. (c) RHT03.....	36
Figura 16 - Sensores internos: (a) RHT01. (b) RHT02. (c) RHT03.....	37
Figura 17 - Curva característica de um sensor do tipo NTC.....	38
Figura 18 - Relação entre a impedância e a umidade relativa dos sensores RHT01, RHT02 e RHT03.	38
Figura 19 - Shield Sd Card.....	39
Figura 20 - Shield Real Time Clock DS1302.....	40
Figura 21 - Código calibração Shield Real Time Clock DS1302.	41
Figura 22 - Interface da ferramenta Fritzing.	42
Figura 23 - Protoboard: (a) Protoboard.de 800 furos. (b) Conexões internas.	42
Figura 24 - Esquema do circuito eletrônico desenvolvido com utilização da plataforma Fritzing.	44
Figura 25 – Circuito eletrônico montado na protoboard. (a) Frontal. (b) Superior.....	45
Figura 26 - Luminária utilizada para confecção do abrigo.....	46
Figura 27 - Processo de montagem do circuito eletrônico no abrigo.	47
Figura 28 - Localização dos testes.	49
Figura 29 - Teste 1 - Terraço do prédio do INPE/UFSM.....	50
Figura 30 - Teste 2 - Laboratório de Micrometeorologia da UFSM.	50
Figura 31 - Teste 3 – Pampa (Torre de micro-SULFUX).	51

Figura 32 - Série total para temperatura do ar – Teste 1: Terraço do INPE/UFSM.....	53
Figura 33 - Série total para umidade relativa do ar – Teste 1: Terraço do INPE/UFSM.	53
Figura 34 - Série total para temperatura do ar – Teste 2: Laboratório de Micrometeorologia da UFSM.	54
Figura 35 - Série total para umidade relativa do ar – Teste 2: Laboratório de Micrometeorologia da UFSM.....	54
Figura 36 - Série total para temperatura do ar – Teste 3: Pampa.	55
Figura 37 - Série total para umidade relativa do ar – Teste 3: Pampa.....	55
Figura 38 - Dispersão entre os dados coletados de temperatura do ar pelos sensores RHT01, RHT02 e RHT03 e o sistema convencional, para médias obtidas para intervalos de (a) 1 minuto, (b) 15 minutos, (c) 30 minutos e (d) 1 hora - Teste 1: Terraço do INPE/UFSM.....	56
Figura 39 - Dispersão entre os dados coletados de temperatura do ar pelos sensores RHT01, RHT02 e RHT03 e o sistema convencional, para intervalos de (a) 1 minuto, (b) 15 minutos, (c) 30 minutos e (d) 1 hora - Teste 2: Laboratório de Micrometeorologia da UFSM.....	58
Figura 40 - Dispersão entre os dados coletados de temperatura do ar pelos sensores RHT01, RHT02 e RHT03 e o sistema convencional, para intervalos de (a) 1 minuto, (b) 15 minutos, (c) 30 minutos e (d) 1 hora - Teste 3: Pampa.....	59
Figura 41 - Dispersão entre os dados coletados de umidade relativa do ar pelos sensores RHT01, RHT02 e RHT03 e o sistema convencional, para intervalos de (a) 1 minuto, (b) 15 minutos, (c) 30 minutos e (d) 1 hora - Teste 1: Terraço do INPE/UFSM.	61
Figura 42 - Dispersão entre os dados coletados de umidade relativa do ar pelos sensores RHT01, RHT02 e RHT03 e o sistema convencional, para intervalos de (a) 1 minuto, (b) 15 minutos, (c) 30 minutos e (d) 1 hora - Teste 2: Laboratório de Micrometeorologia da UFSM.....	62
Figura 43 - Dispersão entre os dados coletados de umidade relativa do ar pelos sensores RHT01, RHT02 e RHT03 e o sistema convencional, para intervalos de (a) 1 minuto, (b) 15 minutos, (c) 30 minutos e (d) 1 hora - Teste 3: Pampa.....	63

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

EEPROM - *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory* (Memória somente de Leitura Programável Eletronicamente)

GPIO - *General Purpose Input/Output* (Portas Programáveis de Entrada e Saída)

HDMI - *High-Definition Multimedia Interface* (Interface Multimídia de Alta-Definição)

I/O - *Input/Output* (Entrada/Saída)

ICSP - *In-circuit serial programming* (Circuito de Programação na Serial)

IDE - *Integrated Development Environment* (Ambiente Integrado de Desenvolvimento)

KB - Kilobyte

mA - Mili-Amperes

MB - Megabyte

MHz - Mega-hertz

NTC - *Negative Temperature Coefficient* (Coeficiente Negativo de Temperatura)

PWM - *Pulse-Width Modulation* (Modulação por Largura de Pulso)

RAM - *Random Access Memory* (Memória de Acesso Aleatório)

RFI - *Radio Frequency Interference* (Interferência por Rádio Frequência)

RHT - *Temperature and Humidity Transmitter* (Transmissor de Temperatura e Umidade)

RTC - *Real Time Clock* (Relógio de Tempo Real)

SD - *Secure Digital* (Segurança Digital)

SPI - *Serial Peripheral Interface* (Interface de Periférico Serial)

TC - Temperatura do Ar no Sistema Convencional

UART *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (Recebimento/Envio Assíncrono Universal)

UC - Umidade Relativa do Ar no Sistema Convencional

UR - Umidade Relativa

USB - *Universal Serial Bus* (Barramento Serial Universal)

VDC - Volt corrente continua

°C - Graus Celsius

Ω - Ohm unidade de resistência elétrica

μ s - Microsegundo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. REVISÃO DE LITERATURA	16
3.1 COMPARAÇÃO DE SENSORES DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR	16
3.1.1 Aplicações de sistemas de monitoramento de baixo custo desenvolvidos na literatura	20
3.2 PLATAFORMAS DE PROTOTIPAGEM ELETRÔNICA	21
3.2.1 A plataforma arduino	23
3.3 SENSORES DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR DE BAIXO CUSTO.....	26
3.3.1 RHT01	27
3.3.2 RHT02	29
3.3.3 RHT03	31
3.3.4 Sistemas convencionais para medição de temperatura e umidade relativa do ar	33
3.3.5 Comparação entre os sensores	35
3.4 PROCESSO DE COMUNICAÇÃO DOS SENSORES DE BAIXO CUSTO	35
3.5 PRINCÍPIO FÍSICO DO FUNCIONAMENTO DOS SENSORES DE BAIXO CUSTO	37
3.6 ARMAZENAMENTO DE DADOS: SHIELD SD CARD E O REAL TIME CLOCK DS1302 ...	39
3.7 CONSTRUÇÃO DE CIRCUITOS ELETRÔNICOS - FRITZING E PROTOBOARD	41
4. MATERIAL E MÉTODOS	44
4.1 CONSTRUÇÃO DO CIRCUITO ELETRÔNICO	44
4.2 ELABORAÇÃO DO ABRIGO PARA OS SENSORES	46
4.3 IMPLEMENTAÇÃO DOS ALGORITMOS	48
4.4 COLETA DOS DADOS	48
4.5 ANÁLISE DE DADOS	52
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
6. CONCLUSÃO	68
7. RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
APÊNDICE A - DETALHAMENTO DO CUSTO PROTÓTIPO	71
APÊNDICE B - CÓDIGO FONTE IMPLEMENTADO	72
APÊNDICE C - ANÁLISE GRÁFICA DOS DAS MEDIÇÕES DIÁRIAS	74
REFERÊNCIAS	93

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da temperatura e a umidade relativa do ar e suas interações com outros elementos meteorológicos ajudam no planejamento, manejo e gestão dos recursos hídricos. A sua medição ou estimativa é fundamental em diversas áreas do conhecimento, como em estudos bioclimatológicos, agrometeorológicos (NETO et al., 2001; BELTRÃO et al., 2003; TURCO et al., 2006), hidrológicos, etc.

No âmbito nacional, porém, o monitoramento dessas grandezas enfrenta problemas. Um destes problemas está ligado à questão da aquisição de dados utilizáveis. Os bancos de dados de estações convencionais e automáticas disponibilizados de maneira organizada das principais grandezas micrometeorológicas (pressão atmosférica, temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção do vento e velocidade do vento) possuem discretização temporal que inviabilizam uma série de pesquisas. O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) integram os dados de minuto a minuto, porém disponibilizam em dados horários e de 30 minutos respectivamente. Para análise de processos em microescala de tempo, estes dados são insuficientes. Neste sentido tem crescido o interesse por sistemas de monitoramento de baixo custo que apresentem facilidade na programação dos intervalos de medições.

Também destaca-se o fato de que atualmente, para a realização da coleta de dados dessas grandezas, utilizam-se equipamentos importados de marcas e modelos exclusivos, o que resulta, na maioria das vezes, no pagamento de direitos autorais e na utilização apenas de sensores e peças exclusivas daquela marca, restringindo assim, a utilização de sensores de outros fabricantes.

Além dessa problemática, o elevado custo dos sensores, sistemas de armazenamento de dados e softwares resulta em um número relativamente pequeno de estações de monitoramento. Segundo Lengfeld e Ament (2011) esse fato é responsável pela perda de precisão em modelos regionais, já que culmina na utilização de dados fora da área de abrangência da torre de monitoramento ou pela utilização de equações descritas e aplicáveis em outros locais, com condições climáticas diversas.

Segundo Romiotto (2014) um sistema convencional para monitoramento de temperatura e umidade relativa do ar, também conhecido como termohigrômetro, pode custar de 3 a 15 mil reais (R\$). Por causa deste fato, por diversas vezes os equipamentos não são adquiridos, pois o

custo supera a cota de compra da instituição ou quando são adquiridos a instituição não possui recursos para mantê-los, e dentro de pouco tempo ficam inutilizados. Estes fatos estão bastante recorrentes, especialmente em instituições públicas brasileiras considerando o atual cenário político-econômico.

Porém, na última década, a “revolução”, em escala mundial, dos semicondutores e dos polímeros contribuiu para o desenvolvimento de diversas linhas de sensores de baixo custo, que podem vir a ser alternativas viáveis no campo de monitoramento, desde que sejam feitos estudos de validação dos mesmos.

Nessa perspectiva, o presente trabalho sugere o desenvolvimento e validação do funcionamento de sistemas hidrometeorológicos de baixo custo, baseado em tecnologia arduino, para monitoramento das variáveis de temperatura e umidade do ar mediante os sensores RHT01, RHT02 e RHT03.

A presente pesquisa está dividida em capítulos, sendo: capítulo 1 a introdução, capítulo 2 os objetivos, capítulo 3 a revisão de literatura, capítulo 4 material e métodos, capítulo 5 os resultados e discussão, capítulo 6 a conclusão e capítulo 7 as recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver e validar o funcionamento de sistemas de monitoramento de baixo custo de temperatura e umidade relativa do ar.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o desenvolvimento do objetivo geral, alguns objetivos específicos são delimitados, sendo eles:

1. Realizar um estudo sobre os materiais e técnicas a serem utilizadas;
2. Desenvolver três sistemas de monitoramento de temperatura e umidade relativa do ar;
3. Desenvolver uma central de armazenamento de dados, para receber os valores mensurados dos três sistemas de monitoramento, simultaneamente;
4. Avaliar o desempenho dos sistemas através da comparação com sistemas convencionais.

3. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, buscou-se compilar informações referentes a estudos anteriores realizados no campo comparação de sensores de temperatura e umidade relativa do ar, visando calibração (no caso de sensores convencionais), desenvolvimento e validação de sensores de baixo custo (item 3.1). Também se traz um referencial teórico sobre as diversas aplicações de sistemas de monitoramento desenvolvidos (item 3.1.1), bem como, materiais e técnicas utilizadas para o desenvolvimento e validação de um sistema de monitoramento de baixo custo (itens 3.2 à 3.7).

3.1 COMPARAÇÃO DE SENSORES DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR

Nos últimos, anos algumas pesquisas têm sido feitas para validar e comparar diferentes sensores e controle para medições hidroclimáticas, especialmente em radiossondas (Ex.: Sapucci (2004), Lin e Hubbard (2004), Vömel et al. (2006), Neto e Zolnier (2006), Silva et al. (2007), Palmieri (2009), Neves (2011), Mraović et al. (2014), Faria et al. (2014) e Amorim et al. (2015)).

Sapucci (2004) efetuou a comparação dos sensores de umidade relativa do ar, em ambiente tropical, dos fabricantes de radiossondagem [por exemplo, Graw radiossondas GmbH & Co. KG (Alemanha); MODEM (França); Sistemas INTERMET (Estados Unidos); Sippican, Inc. (Estados Unidos); e Vaisala (Finlândia)]. Para baixa troposfera as diferenças máximas foram de 1,8%, porém para camadas superiores chegou a 14,9%.

Lin e Hubbard (2004) analisaram quatro sensores renomados do mercado de monitoramento de temperatura do ar, com o objetivo de verificar se havia diferença significativa entre estes. Caso houvesse, deveriam verificar qual das três componentes (elementos sensores de temperatura, circuitos de condicionamento de sinal, e correspondente analógico para digital e dispositivos de conversão ou dispositivos de armazenamento de dados de cada sensor era responsável pela diferença. Porém não se verificou diferença significativa para dois sensores. Para o sensor HMP35C com o datalogger CR10X o erro foi acima de 0,2°C para valores inferiores a -20°C, e aumentava essa diferença para valores superiores a 30°C. O termohigrômetro HO-1088, que fornece dados de temperatura para a Rede de Clima de

Referências dos EUA (USCRN), apresentou o maior erro para temperaturas inferiores a 20°C, sendo de 0,2°C a 0,33°C para a faixa de -25°C e 50°C. Estes resultados culminaram na proposição de ajuste dos sensores desta rede de monitoramento.

Vömel et al. (2006) efetuou a comparação simultânea dos sensores de umidade relativa do ar de sensores Vaisala RSA presentes na radiossonda Vaisala RS92 com o higrômetro Criogênico *Frostpoint* (CFH), lançado em Alajuela, Costa Rica. Nesta comparação o autor verificou que existia um erro de 9% na superfície e que podia chegar a 50% em alturas elevadas. Mediante a comparação pôde-se reduzir o erro para valores inferiores a 7% para altitude de até 700m, abaixo da altitude máxima de 15,2 km correspondente a tropopausa tropical.

Neto e Zolnier (2006) realizaram a avaliação de um circuito eletrônico para medição de temperatura em instalações agrícolas por meio da porta paralela de um computador. Este trabalho se identifica com a presente pesquisa, pois efetuou a comparação de três tipos de sensores (DS1820, Humitter 50 Y e termistor) afim de não favorecer marca. Porém, a série de análise foi curta (série de 510 dados que foram coletados com discretização de 1 minuto) e os sensores eram analógicos. A comparação entre os três sensores resultou numa correlação do tipo *muito forte* com R^2 igual a 0,99. Os resultados demonstraram que o circuito proposto era capaz de medir com exatidão e precisão a temperatura na faixa de 10 e 40 °C.

Silva et al. (2007) desenvolveu um sistema de baixo custo para monitorar umidade relativa do ar. O sistema baseou-se no microcontrolador “Basic Stamp I” e no sensor da Philips Components (código 2322 691 90001). Os autores realizaram testes de mudança de ambiente onde se verificou correlação linear do tipo *muito forte*, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,9921 entre os dados mensurados pelo protótipo e um higrômetro convencional.

Palmieri (2009) desenvolveu um sistema automatizado de baixo custo para o monitoramento das variáveis de temperatura e umidade relativa do ar. A pesquisa desse autor se baseou no microcontrolador “Basic Step 1”, o qual gerenciou um circuito eletrônico capaz de coletar e armazenar dados das respectivas variáveis climáticas, em um dispositivo de memória flash com conexão USB (“*pen drive*”). Os sensores utilizados foram o LM35 e o HIH 4000, que monitoravam a temperatura e a umidade relativa do ar, respectivamente. Ao comparar os dados monitorados pelo protótipo, com dois sistemas convencionais dispostos cada um em um local distinto, obtiveram-se, respectivamente, valores de correlação linear do tipo *forte* com R^2 igual a 0,8246 e 0,8986 para temperatura do ar. Para umidade relativa do ar, no Local 1 houve correlação linear do tipo *muito forte*, com R^2 igual a 0,9198 entre o sensor de baixo custo

e o convencional. Porém, no Local 2 a correlação entre o sensor de baixo custo e o convencional foi do tipo *fraca*. Como o sensor possuía um erro de 2% e os resultados mostraram erro igual a 16,08% o autor inferiu que o sensor convencional daquele posto estava descalibrado. Apesar de não apresentar mais detalhes sobre este fato, é possível deduzir que tal conclusão foi obtida mediante a comparação com um terceiro sensor convencional devidamente calibrado. Assim, validou-se o uso do sistema desenvolvido, no que tange a funcionalidade, pois a série coletada apresentou alta similaridade com as séries coletadas pelas estações meteorológicas convencionais.

Neves (2011) desenvolveu uma estação micrometeorológica que monitorava temperatura, umidade relativa do ar e radiação solar. O protótipo foi baseado no microcontrolador modelo PIC 16F876A. Para monitoramento das variáveis temperatura e umidade relativa do ar utilizou-se um sensor de baixo custo chamado SHT75, que foi desenvolvido na Suíça. Para armazenamento dos dados o autor utilizou um *datalogger* convencional do tipo CR10X. Mediante a análise de correlação entre os valores obtidos pelo sistema de baixo custo e o sistema convencional, os autores obtiveram para temperatura do ar o valor de R^2 igual a 0,9997 e para a umidade relativa do ar o valor de R^2 igual a 0,9993. Verificou-se, então, correlação linear do tipo *muito forte* entre o sistema desenvolvido e o sistema convencional, validando o sistema desenvolvido, quanto ao funcionamento.

Mraović et al. (2014) efetuou a comparação de dois sensores de umidade relativa do ar. Um dos sensores era desenvolvido a partir de papel reciclado e outro de papelão como material dielétrico. O teste realizado ocorreu na faixa de 35-80% de umidade relativa do ar, considerando a reversibilidade, os resultados mostraram que sensores de papel possuem comportamento logarítmico de funcionamento interno, a única exceção são os sensores desenvolvidos com base em papelão.

Faria et al. (2014) desenvolveu um sistema de código aberto para coleta e armazenamento de dados de temperatura e umidade relativa do ar. O protótipo foi baseado na plataforma microcontrolada arduino Uno rev. 3. O sensor utilizado foi o RHT03 e para o sistema de armazenamento utilizou-se um shield sdcard. A validação foi feita verificando a correlação entre os valores de máximos e mínimos do sistema de baixo custo e um sistema convencional. Os testes foram realizados em ambiente protegido e em campo, totalizando 1103 dados coletados. Na comparação dos dados obtidos pelo sistema de baixo custo e pelo sistema convencional os coeficientes de R^2 para temperatura máxima e mínima indicaram correlação

do tipo *muito forte*. Para a temperatura máxima obteve-se R^2 igual a 0,99 para as condições de ambiente protegido e de 0,94 para as condições de campo. Para a temperatura mínima R^2 igual a 0,98 para as condições de ambiente protegido e 0,96 para as condições de campo. Para a umidade relativa do ar em ambiente protegido não houve correlação do tipo *forte*, o que sugeriu uma falha na calibração do sistema convencional devido ao longo tempo de uso e/ou pela presença de poeira no componente. Porém, para o campo, a umidade relativa do ar apresentou correlação linear do tipo *forte*, com R^2 igual a 0,80. Deste modo, com exceção da umidade relativa em ambiente protegido, os resultados de correlação foram do tipo *forte* e *muito forte* validando, portanto, o uso do sistema desenvolvido, quanto ao seu funcionamento.

Amorim et al. (2015) efetuou a comparação de dados obtidos a partir de sensores de temperatura e umidade relativa do ar. Para monitoramento da temperatura do ar utilizou o sensor LM35DZ e para umidade relativa do ar o HIH 4030-4031, comparando-os com os sistemas convencionais de dois locais, um no campus da UNIVASF, em Juazeiro-BA e outro nas instalações da Embrapa no semiárido de Petrolina-PE. A partir de medições horárias os autores verificaram valores de correlação linear do tipo *muito forte* e *forte* para temperatura R^2 de 0,998 e 0,892, respectivamente e correlação linear do tipo *muito forte* para umidade relativa do ar com R^2 igual a 0,995 e 0,961, respectivamente. Esses resultados validaram o uso dos sensores avaliados.

Nos trabalhos citados anteriormente, observa-se um crescente avanço nas pesquisas de validação de sensores de baixo custo, não somente os analógicos como também os digitais. Diversos tipos de sistema de controle têm sido utilizados. Porém, compara-se, geralmente, um sensor por teste. Fato este que impossibilita a comparação simultânea de diferentes tecnologias e impede a verificação com precisão das vantagens e desvantagens. Ressalta-se que a técnica de comparação simultânea de mais sensores de baixo custo aceleraria o processo de validação dessas tecnologias e consequente disseminação no mercado.

Destaca-se que os critérios de teste e comparação, como por exemplo o intervalo de discretização da coleta, são definidos pela aplicação que será dada ao sensor. Pelo mesmo motivo, a série coletada para ser significativa deve conter variações reais que os sensores irão experimentar nas mais diversas aplicações. Por isso, recomenda-se que para locais com maior variabilidade as séries sejam maiores.

Observa-se ainda, que a comparação para fins de validação pode ser realizada em um ou mais locais de teste, sujeitando o sistema a condições de alta e baixa variação, preferencialmente em condições aleatórias, como as que o próprio ambiente produz.

3.1.1 Aplicações de sistemas de monitoramento de baixo custo desenvolvidos na literatura

Na literatura encontram-se diversas pesquisas sobre o desenvolvimento de tecnologias no campo de monitoramento de baixo custo de temperatura e umidade relativa do ar. Apesar de não apresentarem análise de validação quanto a funcionalidade, como foi o foco das pesquisas citadas anteriormente, apresentando apenas como parâmetro de avaliação a execução ou não da tarefa, tais pesquisas apontam a aplicabilidade e evolução das tecnologias de monitoramento, especialmente em redes de controle sem-fio. Dentre os trabalhos realizados cita-se Silva e Fruett (2010), Maran et al. (2013) Okabe et al. (2015), Oliveira et al. (2015) e Arima et al. (2015).

Silva e Fruett (2010) desenvolveram uma micro-torre de monitoramento sem fio das variáveis temperatura do ar, umidade relativa do ar e pressão atmosférica. O sistema fornecia dados em tempo real destas grandezas no interior da Floresta Amazônica em Manaus/Brasil. Os dados podiam ser acessados através de um endereço IP. Para monitoramento da temperatura do ar e da umidade relativa do ar, utilizou-se o sensor SHT1X e para transmissão de dados o shield xbee. A rede utilizada permitia que até 4 torres se comunicassem com apenas um coordenador (base receptora de dados), dotado de um endereço IP. O protótipo funcionou satisfatoriamente.

Maran et al. (2013) desenvolveu uma rede de sensores sem fio para monitoramento de lavoura com controle pontual de terreno. Para monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar utilizou-se o sensor RHT01 que foi gerenciado remotamente por um arduino e tecnologia Zigbee. O sistema operou dentro dos padrões exigidos para controle pontual.

Okabe et al. (2015) desenvolveu um sistema de monitoramento baseado em arduino e o sensor de temperatura e umidade relativa do ar RHT03 para o controle de secagem da madeira. A comunicação do protótipo foi realizada através da porta USB de um computador pessoal. O sistema operou com eficiência, gerenciando as condições ambientes e mantendo-as em condições ideais de estocagem.

Oliveira et al (2015) desenvolveu um sistema de controle autônomo de irrigação, mediante dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar e umidade do solo. O sistema era

gerenciado pela internet em tempo real, mediante a tecnologia arduino e o shield xbee. O sistema operou satisfatoriamente.

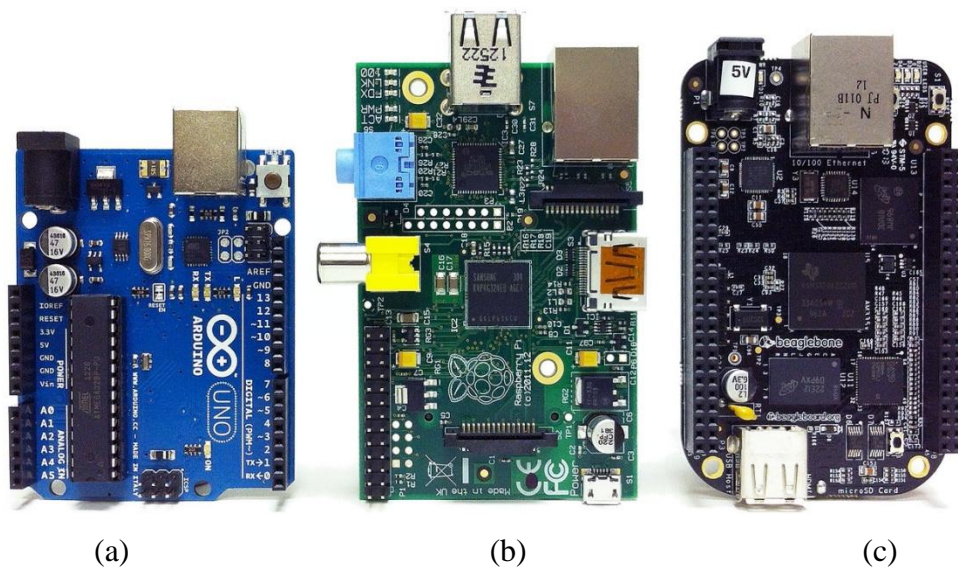
Arima (2015) também desenvolveu um sistema de automação de baixo custo para irrigação, porém para uma horta caseira natural. O sistema foi baseado na tecnologia arduino e os componentes RTC 1307, shield ethernet e o sensor RHT03. Foram realizados dois experimentos, um com rúcula e hortelã e outros com rúcula e rabanete. O sistema funcionou corretamente nos dois cenários.

3.2 PLATAFORMAS DE PROTOTIPAGEM ELETRÔNICA

Para o desenvolvimento de projetos eletrônicos de baixo custo existem diversas plataformas de prototipagem eletrônica disponíveis no mercado. Porém nos últimos anos as plataformas que tem se destacado são aquelas que possuem hardware e software aberto. Dentre as principais estão: Arduino, RaspBerry Pi, BeagleBone, C.H.I.P., Propeller, High-End MCU Device e Intel Galileo.

Em virtude do custo, disponibilidade, tamanho semelhante e aplicabilidade similar apresentamos a seguir uma breve comparação entre as três principais plataformas existentes, arduino, rasperry pi e beaglebone (figura 1).

Figura 1 - Plataformas de prototipagem eletrônica. (a) arduino. (b) rasperry pi. (c) beaglebone.



Fonte: MCM, (2013).

O quadro 1 apresenta uma comparação de um conjunto de características técnicas de hardware e software das três plataformas, não com o objetivo de avaliar a melhor ou a pior, mas para demonstrar que dependendo da aplicação utiliza-se uma ou outra.

Quadro 1 – Comparação entre as plataformas arduino, raspberry pi e beagle bone.

Nome	Arduino	Raspberry Pi	BeagleBone Black
Modelo	Uno R3	Modelo B	Black
Preço	R\$ 65,00	R\$ 250,00	R\$ 230,00
Tamanho	2,95” x 2,10”	3,37” x 2,125”	3,4” x 2,1”
Processador	Atmega328	ARM11	ARM Cortex-A8
Velocidade de Clock	16 MHz	700 MHz	700 MHz
RAM	2 KB	256 MB	256 MB
Flash	32 KB (pode ser estendido com shield)	Cartão SD	4 GB (microSD)
EEPROM	1 KB	-	-
Tensão de Alimentação	7V a 12V	5V	5V
Corrente Mínima	42mA	700mA	170mA
Pinos GPIO	14	8	65
Entradas Analógicas	6	-	7
PWM	6	-	8
TWI/12C	2	1	2
SPI	1	1	1
UART	1	1	5
Interface de Desenvolvimento	Arduino	IDLE, Scratch, Squeak/Linux, Python	Scratch, Squeak, Linux, Python
Ethernet	Apenas com uso de shield	10/100	10/100
USB	-	2 USB 2.0	1 USB 2.0
Saída Vídeo	Apenas com uso de shield	HDMI, RCA	HDMI
Saída de Áudio	Apenas com uso de shield	jack	HDMI

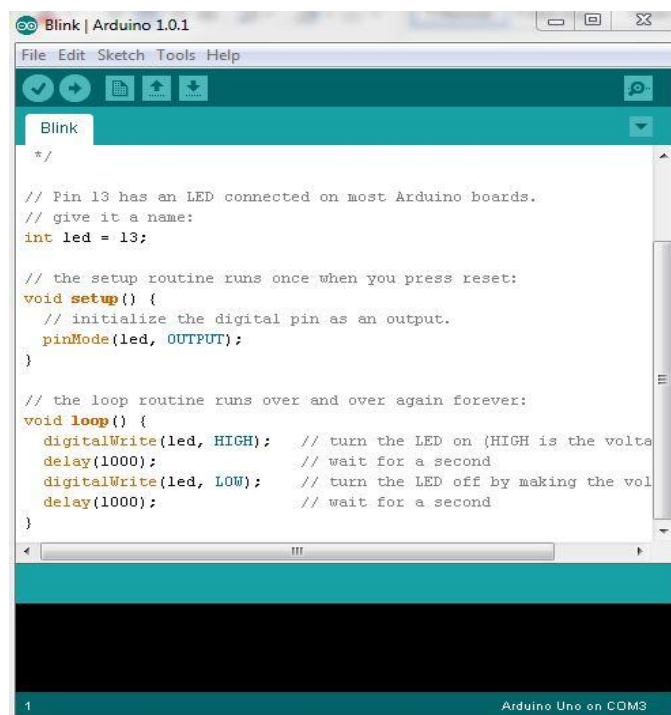
Fonte: Adaptado de DINER (2012).

3.2.1 A plataforma arduino

O arduino é uma plataforma física open-source (de software e hardware) (ARDUINO, 2014a), isto é, o software é aberto para alteração e uso do hardware. Baseia-se na placa microcontrolada ATmega168 da *Atmel*¹ (MASSIMO et al., 2014) e um Ambiente Integrado de Desenvolvimento (IDE - *Integrated Development Environment*) utilizado para escrever o código na placa. Utiliza linguagem de programação própria baseada em C/C++, oferece bibliotecas de programação de alto nível e realiza transferência de firmware via USB.

O ambiente de programação do arduino consiste de uma IDE (*Integrated Development Environment*) desenvolvida em Java, que é baseada no *Processing* e na linguagem arduino, derivada do *Wiring*, que é baseada em C/C++ (KATO, 2010). A figura 2 apresenta o ambiente de desenvolvimento arduino, com um código exemplo (*sketch*), na linguagem de programação específica para o arduino.

Figura 2 - Ambiente de desenvolvimento arduino (IDE).



```

Blink | Arduino 1.0.1
File Edit Sketch Tools Help
Blink
*/

// Pin 13 has an LED connected on most Arduino boards.
// give it a name:
int led = 13;

// the setup routine runs once when you press reset:
void setup() {
  // initialize the digital pin as an output.
  pinMode(led, OUTPUT);
}

// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
  digitalWrite(led, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the volta
  delay(1000); // wait for a second
  digitalWrite(led, LOW); // turn the LED off by making the vol
  delay(1000); // wait for a second
}
  
```

Fonte: Rêgo, M. de S., 2014.

¹ *Atmel* - Empresa americana de semicondutores fundada em 1984.









O arduino pode ser usado para desenvolver os mais diversos tipos de projetos, recebendo os dados de uma variedade de sensores ou chaves e controlando uma variedade de luzes, motores e outros elementos físicos de saída. Os projetos com arduino podem ser autônomos (*standalone*) ou então se comunicar com softwares funcionando no computador.

As placas podem ser montadas a mão ou então compradas pré-montadas. O ambiente de desenvolvimento pode ser obtido gratuitamente no sítio do projeto arduino (ARDUINO, 2014a). Neste sítio também encontra-se uma variedade de manuais, bibliotecas, exemplos de códigos e conta com uma comunidade com diversas iniciativas em prática.

Segundo Hodges et al. (2012) a plataforma arduino busca atingir um grande número de pessoas, pesquisadores, entusiastas de eletrônica ou *hobbyistas* para desenvolver projetos com qualidade, porém de uma forma prática e de valor acessível. A plataforma exige um conhecimento básico em programação e eletrônica. Existem outras plataformas de microcontroladores criadas com o mesmo objetivo, mas não mantendo o foco em características como facilidade de uso e preço acessível como o arduino (WERNECK, 2009).

Existem diversas placas arduino em circulação no mercado. O quadro 2 compara alguns modelos.

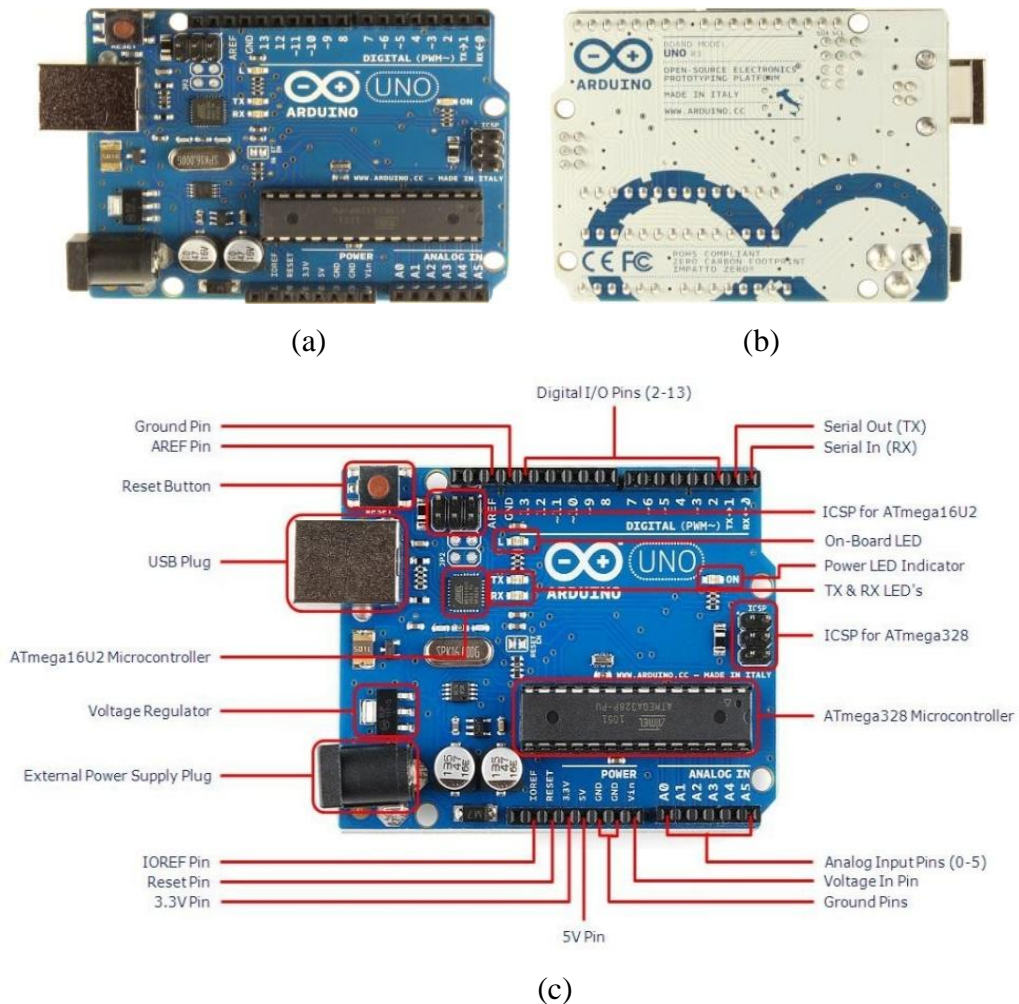
Quadro 2 – Comparação entre modelos de placas arduino.

	Arduino Uno	Arduino Mega2560	Arduino Leonardo	Arduino Due	Arduino ADK	Arduino Nano	Arduino Pro Mini	Arduino Esplora
								
Microcontrolador	ATmega328	ATmega2560	ATmega32u4	AT91SAM3X8E	ATmega2560	ATmega168 (versão 2.x) ou ATmega328 (versão 3.x)	ATmega168	ATmega32u4
Portas digitais	14	54	20	54	54	14	14	-
Portas PWM	6	15	7	12	15	6	6	-
Portas analógicas	6	16	12	12	16	8	8	-
Memória	32 K (0,5 K usado pelo bootloader)	256 K (8 K usados pelo bootloader)	32 K (4 K usados pelo bootloader)	512 K disponível para aplicações	256 K (8 K usados pelo bootloader)	16 K (ATmega168) ou 32K (ATmega328), 2 K usados pelo bootloader	16 K (2k usados pelo bootloader)	32 K (4 K usados pelo bootloader)
Clock	16 Mhz	16 Mhz	16 Mhz	84 Mhz	16 Mhz	16 Mhz	8 Mhz (modelo 3.3v) ou 16 Mhz (modelo 5v)	16 Mhz
Conexão	USB	USB	Micro USB	Micro USB	USB	USB Mini-B	Serial / Módulo USB externo	Micro USB
Conector para alimentação externa	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
Tensão de operação	5v	5v	5v	3.3v	5v	5v	3.3v ou 5v, dependendo do modelo	5v
Corrente máxima portas E/S	40 mA	40 mA	40 mA	130 mA	40 mA	40 mA	40 mA	-
Alimentação	7 - 12 Vdc	7 - 12 Vdc	7 - 12 Vdc	7 - 12 Vdc	7 - 12 Vdc	7 - 12 Vdc	3.35 - 12 V (modelo 3.3v), ou 5 - 12 V (modelo 5v)	5v

Fonte: Adaptado de Arduino, 2014a.

A placa arduino Uno rev. 3 (figura 3) é uma placa microcontrolada, baseada no microcontrolador ATMEGA328.

Figura 3 - Arduino UNO rev. 3: (a) frente. (b) verso. (c) esquema.



Fonte: Arduino, 2014b.

Segundo Arduino (2014b), a placa possui 14 pinos de input/output, dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM (Pulse Width Modulation), 6 entradas analógicas, um oscilador a cristal de 16MHz, uma porta USB (Universal Serial Bus), um conector *jack* para alimentação, um leitor ICSP (In-circuit serial programming) e um botão de reset. A placa contém o necessário para utilizar o microcontrolador, bastando apenas conectá-la ao computador através do cabo USB ou através da alimentação em seu conector *jack* fazendo-se uso de uma fonte ou bateria.

A partir de 2005, com a invenção da tecnologia arduino diversas aplicações foram desenvolvidas como mostra a série de trabalhos a seguir: Lian et al. (2013) aplicou no monitoramento das condições ambientes adversas de uma fábrica; Ravignani et al. (2013) no estudo acústico e comportamental de primatas não-humano; Leeuw et al. (2013) no monitoramento de fluorescência em fitoplâncton; Anzalone et al. (2013) no controle de um calorímetro; Cela et al. (2013) no controle de um sistema teleoperado de um robô humanóide; Gennaro (2014) no controle do processo de vinificação; Rajaraman et al. (2014) no sistema de reanimação de recém-nascidos; Bitella et al. (2014) no monitoramento da relação água-solo e variáveis climáticas; González et al. (2014) no monitoramento de pacientes; Villarrubia et al. (2014) no estudo sobre inteligência artificial; Agudo (2014) no sistema de captura, processamento e gerenciamento de cores; Kelley et al. (2014) no controle e monitoramento de um turbidímetro de baixo custo; Palma et al. (2014) na comunicação em tempo real de aulas e postagem automática em redes sociais; Salamone et al. (2015) no controle *open-souce* de uma usina solar; Nilsiam et al. (2015) no controle de tensão-corrente em uma impressora 3D; Maranhão et al. (2015) no controle de sistemas fotovoltaicos de bombeamento com velocidade variável; Ayoola et al. (2015) no controle de um dispositivo para nível de líquido com aplicações na medicação de pacientes; Chao et al. (2015) no controle de berço infantil; Hertzog e Swart (2015) na educação em tecnologias sustentáveis, com enfoque em fotovoltaica; Dasios et al. (2015) na automação residencial, visando o bem-estar e a saúde de idosos; Kim e Myung (2015) no monitoramento remoto de bactérias causadoras de doenças e Benavides et al. (2015) no monitoramento de microalgas em um foto-biorreator.

3.3 SENSORES DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR DE BAIXO CUSTO

Sensores são dispositivos que variam suas propriedades sob a ação de uma grandeza física, fornecendo um sinal que indica essa grandeza (BASTOS, 2002).

Para Moreira (2007) sensores são instrumentos que detectam e registram a radiação eletromagnética, em determinada faixa do espectro eletromagnético, gerando informações que possam ser transformadas em um produto passível de interpretação, seja na forma de imagem, gráficos, tabelas ou qualquer outro produto.

Pode-se considerar também que um sensor é um tradutor de valores, geralmente não-elétrico, para um valor elétrico; este pode ser canalizado, amplificado e modificado através de dispositivos eletrônicos.

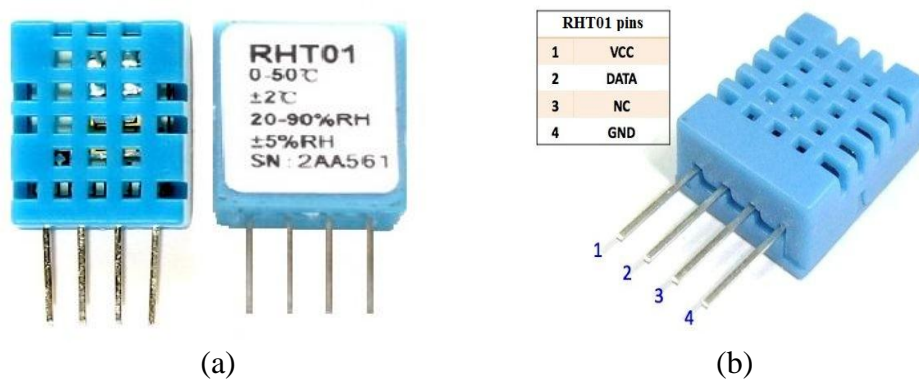
O sinal de saída pode apresentar-se na forma de diferença de potencial e corrente elétrica (GÜTHS e de PAULO, 1998). Tal conjunto de características é designado pelo formato do sinal de saída. Assim, um sensor apresenta propriedades de entrada, que podem ser de qualquer tipo, e propriedades elétricas de saída (BOLTON, 1988).

Os sensores e os sistemas de aquisição de dados possuem características desejáveis, como: sensibilidade, precisão, faixa de atuação, estabilidade, tempo de resposta, histerese, linearidade e outros. A seguir serão apresentados três sensores de baixo custo para monitoramento de temperatura e umidade relativa do ar.

3.3.1 RHT01

O sensor de temperatura e umidade relativa do ar RHT01 (figura 4), também conhecido como DHT11 é um sensor de fabricação chinesa e norte americana. No Brasil o mesmo pode ser encontrado com valores inferiores a 20 reais (R\$).

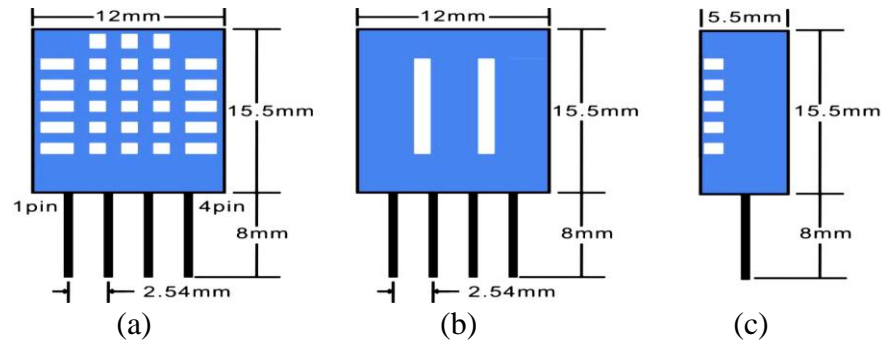
Figura 4 - Sensor RHT01: (a) RHT01 frente e verso. (b) RHT01 pinos.



Fonte: Dx, 2014.

O sensor opera com tensão de 3 a 5,5 VDC (Volts em Corrente Contínua), sendo 5,5 VDC recomendado pelo fabricante. Possui saída de sinal digital. Opera na faixa de 0-50°C para temperatura do ar e 20-90% para umidade relativa do ar (UR). Sua incerteza é de 2°C para temperatura do ar e 5% para umidade relativa do ar. A figura 5 ilustra as dimensões do RHT01:

Figura 5 - Dimensões do sensor: (a) RHT01 frente. (b) RHT01 verso. (c) lateral.



Fonte: Micros, 2014.

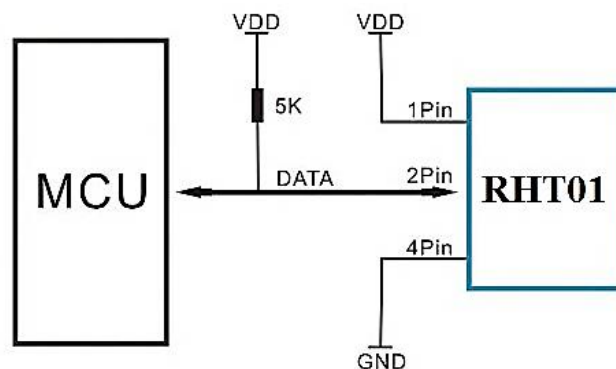
O sensor RHT01 foi desenvolvido para operar juntamente com a placa microcontroladora arduino. O sistema arduino e RHT01 é considerado um produto inteligente. O RHT01 já vem calibrado de fábrica.

O RHT01 é composto por quatro terminais. Porém na prototipagem, apenas 3 deles são utilizados: alimentação (V_{cc}), envio de dados e o terra (*ground* - GND). Os fabricantes sugerem que para efeito de manutenção da calibração, ao conectar o sensor ao microcontrolador deve-se conectar um resistor de pelo menos 5kohms ($k\Omega$) no pino do sinal.

O resistor é um componente elétrico capaz de limitar a corrente de um circuito que seja maior do que um componente espera receber, evitando a queima deste componente ou fazendo a calibração do mesmo.

A figura 6 ilustra o esquema genérico do circuito eletrônico do RHT01 e um microcontrolador:

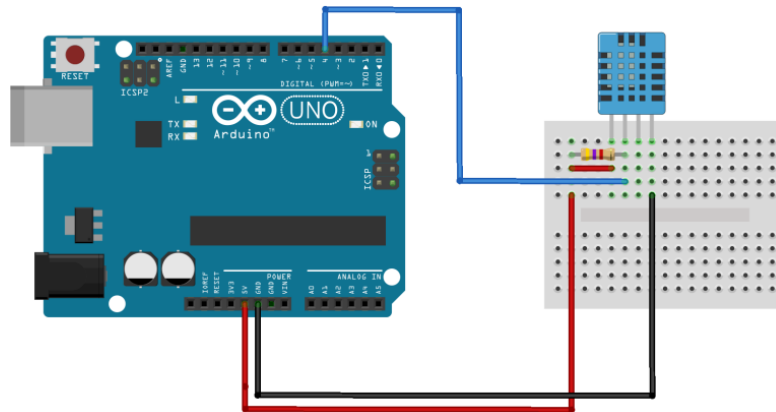
Figura 6 - Esquema genérico do circuito eletrônico para o funcionamento do sensor RHT01.



Fonte: Sparkfun, 2014.

Para utilizar o sensor com o arduino, é necessário primeiramente conectar os pinos do sensor nas respectivas portas do arduino. A figura 7 mostra um esquema onde o pino do sinal (DATA) foi conectado à porta digital 4 do arduino:

Figura 7 - Circuito eletrônico do RHT01 com arduino.



Fonte: Micros, 2014.

3.3.2 RHT02

O sensor de temperatura e umidade relativa do ar RHT02, também denominado DHT21, AM2301 ou ainda HM2301 (figura 8), é um sensor de fabricação chinesa e tailandesa. No Brasil o mesmo pode ser encontrado com valores inferiores a 30 reais (R\$).

Figura 8 - Sensor RHT02.



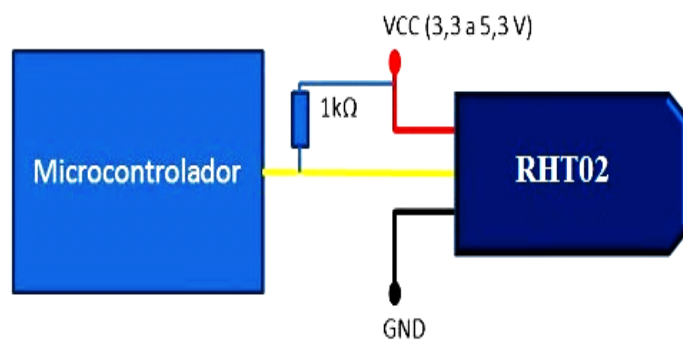
Fonte: ML, 2014a.

O sensor opera com tensão de 3 a 5,5 VDC (Volts em Corrente Contínua), sendo 5,5 VDC recomendado pelo fabricante. O sensor possui saída de sinal digital, opera na faixa de -40 a 80°C para temperatura do ar e 0-100% para umidade relativa do ar (UR), com incerteza de 0,5°C para temperatura do ar e 3% para umidade relativa do ar. Possui dimensões de 58,9 mm (Altura) x 26,4 mm (largura) x 13,3mm (espessura).

O sensor RHT02 é considerado um produto inteligente e foi desenvolvido para operar tecnologia arduino. O RHT02 já vem calibrado de fábrica.

O RHT02 é composto por três terminais: alimentação (VDC), envio de dados e o terra (*ground* - GND). Na montagem do circuito eletrônico os fabricantes sugerem que para efeito de manutenção da calibração, se conecte um resistor de 1kohms ($k\Omega$) no pino do sinal. A figura 9 ilustra o esquema genérico do circuito eletrônico do RHT02 e um microcontrolador:

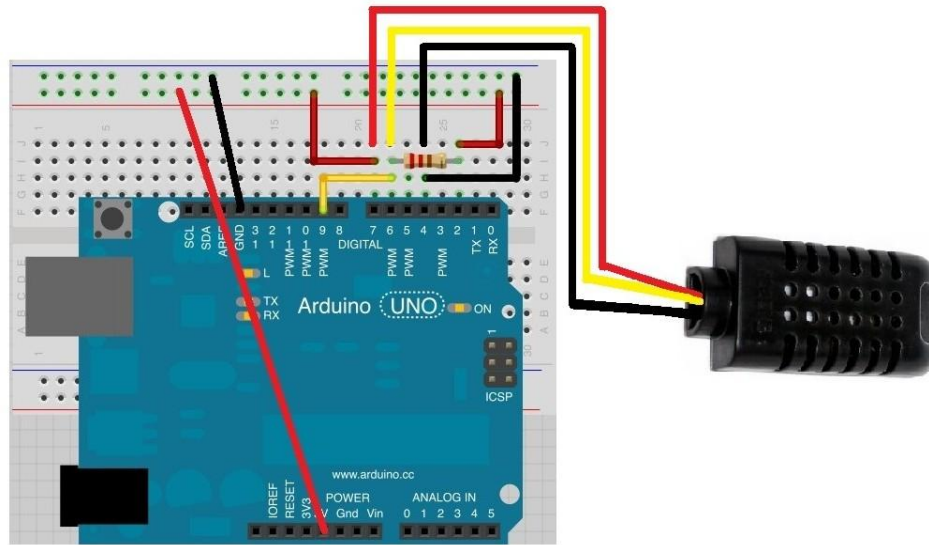
Figura 9 - Esquema genérico do circuito eletrônico para o funcionamento do sensor RHT02.



Fonte: Sparkfun, 2014.

Para utilizar o sensor com o arduino, é necessário primeiramente conectar os pinos do sensor nas respectivas portas do arduino. A figura 10 mostra um esquema onde o pino do sinal (DATA) foi conectado à porta digital 9 do arduino:

Figura 10 - Circuito eletrônico do RHT02 com arduino.

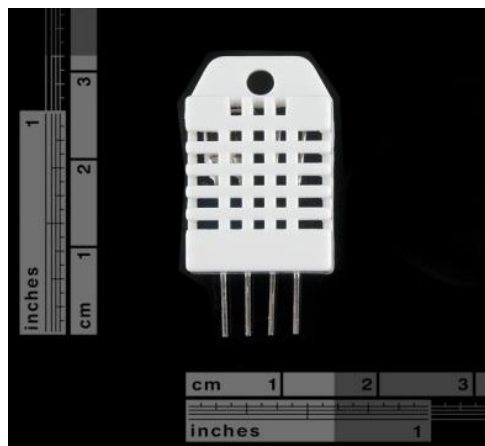


Fonte: Adaptado de Micros, 2014.

3.3.3 RHT03

O sensor de temperatura e umidade relativa do ar RHT03, também denominado DHT22, AM2302 é um sensor de fabricação chinesa, portuguesa e tailandesa. No Brasil o mesmo pode ser encontrado com valores inferiores a 50 reais (R\$). A figura 11 mostra o sensor RHT03 com as suas respectivas dimensões bidimensionais:

Figura 11 - Sensor RHT03 e dimensões.



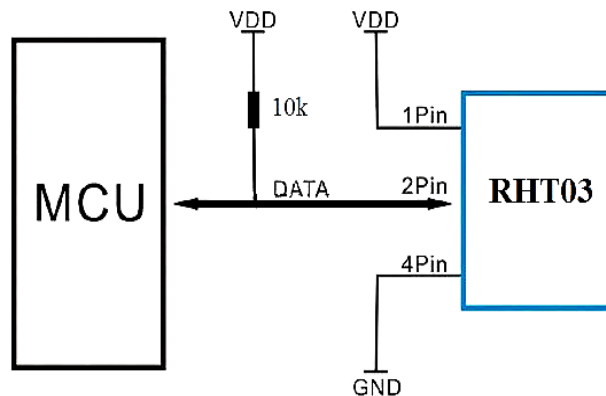
Fonte: Sparkfun, 2014.

O sensor opera com tensão de 3 a 6 VDC (Volts em Corrente Contínua) e exige apenas um resistor de 1kohm ($k\Omega$) de Pull-UP no pino de leitura. Possui saída de sinal digital. Opera na faixa de -40 a 80°C para temperatura e 0-100% para umidade relativa (UR). Para temperatura do ar, possui incerteza de $0,2^{\circ}\text{C}$ para a faixa de -20 a 60°C , e para outras faixas de $0,5^{\circ}\text{C}$. Para umidade relativa do ar, possui incerteza de 2% (SPARKFUN, 2014).

O sensor RHT03 é considerado um produto inteligente e foi desenvolvido para operar tecnologia arduino. O RHT03 já vem calibrado de fábrica.

O RHT03 é composto por quatro terminais, porém na prototipagem, apenas 3 deles são utilizados: alimentação (Vcc), envio de dados e o terra (*ground* - GND). Os fabricantes sugerem que para efeito de manutenção da calibração, ao conectar o sensor ao microcontrolador deve-se conectar um resistor de pelo menos 10kohms ($k\Omega$) no pino do sinal. A figura 12 ilustra o esquema genérico do circuito eletrônico do RHT03 e um microcontrolador:

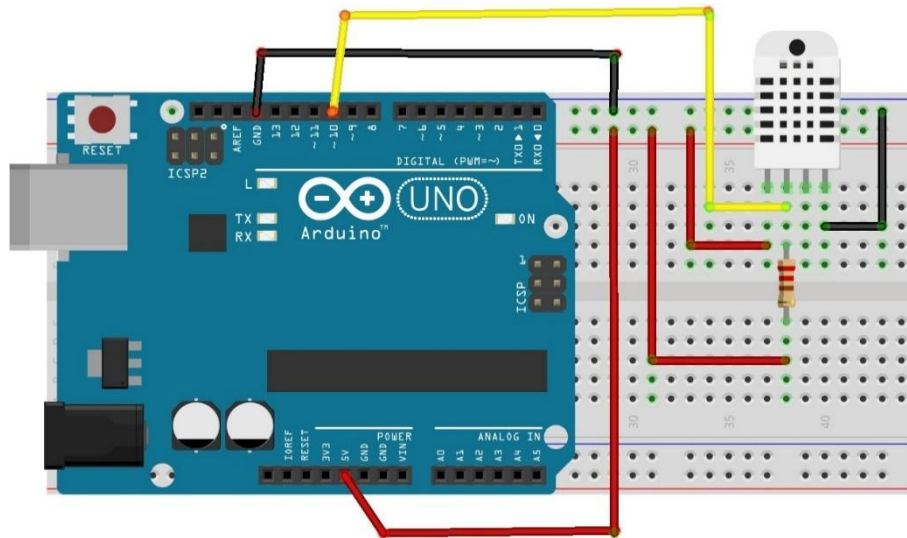
Figura 12 - Esquema genérico do circuito eletrônico para o funcionamento do sensor RHT03.



Fonte: Adaptado de Sparkfun, 2014.

Para utilizar o sensor com o arduino, é necessário primeiramente conectar os pinos do sensor nas respectivas portas do arduino. A figura 13 mostra um esquema onde o pino do sinal (DATA) foi conectado à porta digital 10 do arduino:

Figura 13 - Circuito eletrônico do RHT03 com arduino.



Fonte: Rêgo, M. de S., 2014.

Os circuitos das figuras 7, 10 e 13 ilustram a situação em que, respectivamente, os sensores RHT01, RHT02 e RHT03 enviarão dados para serem exibidos em um computador. Para o desenvolvimento de um sistema com armazenamento independente acrescentar-se-ia aos circuitos um shield sd card e um shield real time clock para efetuar o armazenamento de data e hora, respectivamente.

3.3.4 Sistemas convencionais para medição de temperatura e umidade relativa do ar

Existem no mercado diversos modelos de sistemas convencionais de medição de temperatura e umidade relativa do ar. Contudo, poucas características os diferem dos sistemas já apresentados, que referem-se a alternativas de baixo custo. A variação mais comum refere-se a marca e ao número de grandezas monitoradas.

Para medição de temperatura do ar os sistemas convencionais antigos operavam com base no clássico termômetro de mercúrio, enquanto que a umidade relativa do ar media-se através de uma equação de ajuste que relacionava valores de temperatura do bulbo seco e do bulbo úmido. A linha mais recente de sensores dessa categoria, também denominada de sistemas automáticos, operam com base no funcionamento de dois sensores internos. Porém os custos dos sistemas ainda são muito elevados.

Para temperatura do ar, estes sensores operam normalmente na faixa de -50 a 70°C , com incerteza de até $0,9^{\circ}\text{C}$. Os termistores, na vasta maioria, são do tipo NTC.

O monitoramento da umidade relativa do ar ocorre em toda a faixa de 0-100%, com incerteza de até 4%, e funcionam, normalmente, pelo princípio capacitivo.

Segundo Romiotto (2014), um sistema composto de um sensor de temperatura do ar e um sensor de umidade relativa do ar, abrigo, cabos, alimentação, software e dataloggers alcança no mercado brasileiro custos na faixa de 3 a 15 mil reais (R\$).

A figura 14 ilustra um sistema convencional padrão de monitoramento de temperatura e umidade relativa do ar utilizado pelo Laboratório de Micrometeorologia da UFSM (LMMET/UFSM), o termohigrômetro CS215, fabricado e comercializado pela Campbell Scientific.

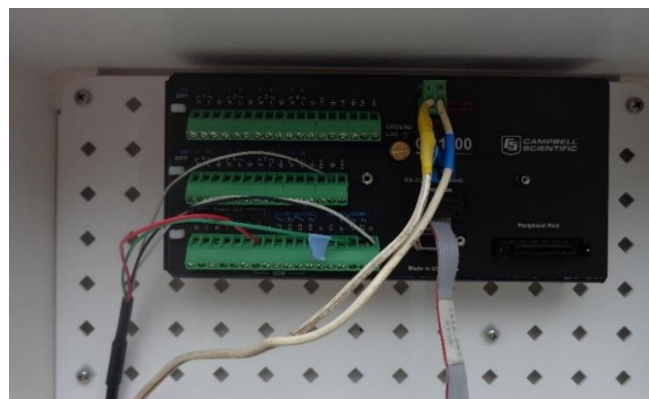
Figura 14 - Sistema convencional de monitoramento. (a) CS215 - Campbell Scientific. (b) Elemento do sensor CS215. (c) Datalogger convencional CR1000 - Campbell Scientific.



(a)



(b)



(c)

3.3.5 Comparação entre os sensores

As principais características dos sensores RHT01, RHT02, RHT03 e um termohigrômetro convencional (CS215) estão dispostas no quadro 3:

Quadro 3 - Principais características dos sensores RHT01, RHT02, RHT03 e CS215.

Características	RHT01	RHT02	RHT03	CS215
Custo aproximado no Brasil com base em dez/2015 (R\$)	20,00	30,00	50,00	8950,00
Faixa de medição de temperatura do ar (°C)	0 a 50	-40 a 80	-40 a 80	-40 a 70
Faixa de medição de umidade relativa do ar (%)	20-90	0-100	0-100	0-100
Incerteza na medição da temperatura do ar (°C)	2	0,5	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 0,2 para a faixa de -20 a 60°C. ➤ 0,5 para outras faixas. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 0,3 a 25°C. ➤ 0,4 para a faixa de 5 a 40°C. ➤ 0,9 para a faixa de -40 a 70°C.
Incerteza na medição da umidade relativa do ar (%)	5	3	2	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 2 para a faixa de 10 a 90%. ➤ 4 para outras faixas entre 0-100%.
Tensão de Operação (VDC)	3-5,5	3-5,5	3-6	12-24

Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

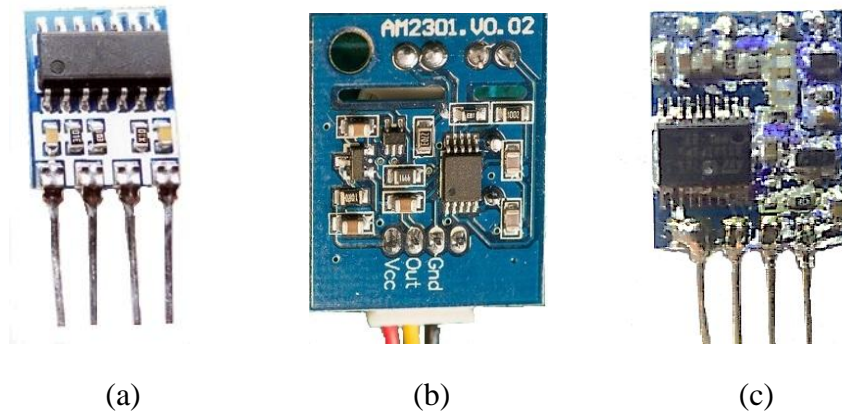
3.4 PROCESSO DE COMUNICAÇÃO DOS SENSORES DE BAIXO CUSTO

Para colocar os sensores RHT01, RHT02 e RHT03 em operação é necessário realizar o download das suas respectivas bibliotecas no site oficial do projeto arduino e salvar no diretório *bibliotecas* da IDE arduino (ARDUINO, 2014a). Em seguida, na IDE do arduino, implementa-se o código fonte, o qual gerenciará o circuito eletrônico, “ensinando” ao sistema quais variáveis

serão monitoradas, como serão interpretadas, quais os intervalos das coletas e qual a forma de exibição dos resultados.

Essencialmente a biblioteca é a responsável por ensinar o microcontrolador a interpretar a correspondência entre a grandeza física e os dados analógicos. Porém, no caso dos sensores RHT01, RHT02 e RHT03 isso não é necessário pois os mesmos já possuem a lógica de conversão de dados analógicos em digitais no microcontrolador interno, inserido no circuito de comunicação de cada sensor (figura 15). Assim a função da biblioteca neste caso é chamar os dados mensurados pelos sensores, já em formato digital.

Figura 15 - Circuito de comunicação: (a) RHT01. (b) RHT02. (c) RHT03.



Fonte: Rêgo, M. de S., 2014.

Para o sistema de comunicação interno dos sensores coletar a informação de temperatura e umidade relativa do ar, o microcontrolador necessita enviar um sinal de início. Com isso os sensores RHT01, RHT02 e RHT03, respectivamente, saem do modo de baixo consumo para o modo de execução e enviam os dados para o microcontrolador. Ao finalizar o envio das informações, os sensores retornam para o modo de baixo consumo até receber novamente o sinal de início. Segundo D-Robotcs (2010), sem esse sinal do microcontrolador, os sensores RHT01, RHT02 e RHT03 não forneceriam qualquer resposta.

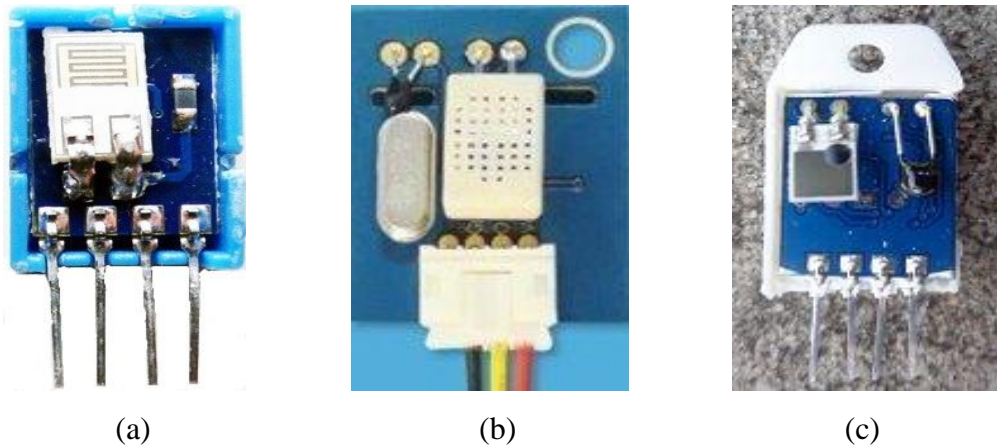
Ao receber o sinal de início, os sensores, no final do sinal de início, enviam um sinal de baixa tensão para o microcontrolador, de $80\mu\text{s}$ de duração, e depois um novo sinal de alta tensão de $80\mu\text{s}$. Cada bit de dados que os sensores RHT01, RHT02 e RHT03 enviam, iniciam-se com um sinal de nível baixo de $50\mu\text{s}$ e depois um sinal de alta tensão, representando o bit a ser

enviado. Se a duração for de 26 a 28 μ s, o bit representado é zero, se a duração for de 70 μ s o bit representado é um. Em seguida as sequências analógicas são convertidas em dados digitais.

3.5 PRINCÍPIO FÍSICO DO FUNCIONAMENTO DOS SENSORES DE BAIXO CUSTO

Os sensores de temperatura e umidade relativa do ar RHT01, RHT02 e RHT03 são constituídos por dois sensores internos, como mostra, respectivamente, a figura 16:

Figura 16 - Sensores internos: (a) RHT01. (b) RHT02. (c) RHT03.

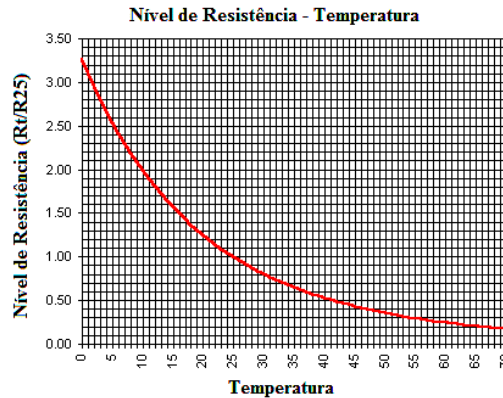


Fonte: (a,b) Micros, 2014. (c) Rêgo, M. de S., 2014.

O sensor da esquerda em 16-a e 16-c e da direita em 16-b são termistores utilizados para medir a temperatura do ar. O sensor da direita em 16-a e 16-c e da esquerda em 16-b são higrômetros utilizados para mensurar a umidade relativa do ar.

Os termistores dos sensores RHT01, RHT02 e RHT03 são desenvolvidos utilizando-se um óxido semiconductor do tipo NTC (coeficiente negativo de temperatura) cujo aumento de temperatura causa uma diminuição na sua resistência interna. A curva característica de um sensor do tipo NTC pode ser visto na figura 17.

Figura 17 - Curva característica de um sensor do tipo NTC.



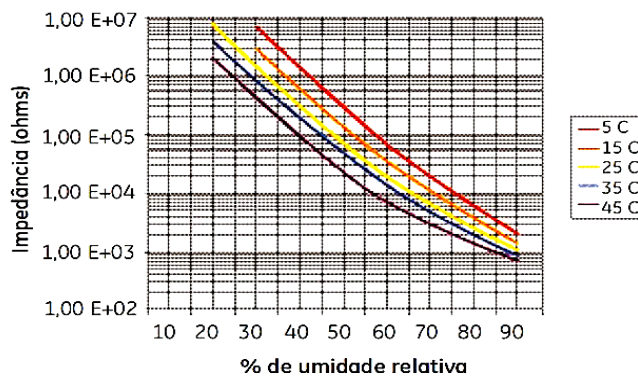
Fonte: Adaptado de Sparkfun, 2014.

Para medição da umidade relativa do ar, os higrômetros dos sensores RHT01, RHT02 e RHT03 operam com base na troca de impedância de um filme polimérico, devido à absorção do vapor de água. Segundo Percy et al. (1989) esse filme polimérico deve ser o suficientemente fino que permita a difusão do vapor d'água por meio dessa camada.

O polímero é depositado à vácuo em terminais de liga bismuto ou outros metais, que são moldados em um substrato cerâmico. O sensor é estimulado por uma corrente alternada de baixa tensão e pela impedância medida como função da umidade relativa (SILVA et al., 2007).

O polímero com filme consiste em grupos funcionais químicos que se dissociam em espécies iônicas à medida que o vapor de água é absorvido. Isso resulta em maior condução elétrica através do sensor ou na diminuição da impedância. A impedância é uma função exponencial inversa da umidade ao redor (figura 18).

Figura 18 - Relação entre a impedância e a umidade relativa dos sensores RHT01, RHT02 e RHT03.



Fonte: Sparkfun, 2014.

Atualmente, existem no mercado outros sensores de umidade relativa com princípio capacitivo, construídos de platina e silício. Assim as variações de temperatura e umidade relativa do ar causam nos termistores e higrômetros dos sensores RHT01, RHT02 e RHT03, variações elétricas que são interpretadas em valores, respectivamente, de temperatura e umidade relativa do ar, pelo microcontrolador, que são posteriormente armazenadas ou exibidas em tempo real em um computador dependendo do circuito eletrônico que foi desenvolvido e do código fonte que foi implementado.

3.6 ARMAZENAMENTO DE DADOS: SHIELD SD CARD E O REAL TIME CLOCK DS1302

O Shield sd card (figura 19) é uma extensão para arduino que possibilita leitura e armazenamento em cartão SD. O mesmo foi desenvolvido para operar juntamente com a placa microcontrolada arduino.

Figura 19 - Shield Sd Card.



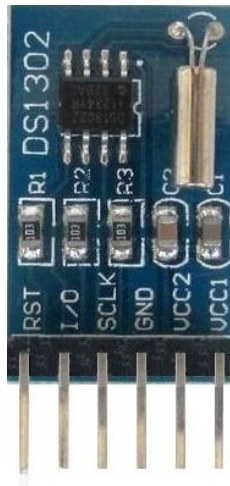
Fonte: Arduino, 2014c.

Com o objetivo de facilitar a implementação da programação específica para funcionamento do mesmo, o shield sd card possui biblioteca oficial disponível no site oficial do projeto arduino.

Segundo Arduino (2014c) esse dispositivo é compatível com cartões formatados em FAT32 com capacidade de até 4GB. Sugere-se que o mesmo seja alimentado em tensão de 3,3V.

O Shield Real Time Clock DS1302 (figura 20) é, também, uma extensão para arduino. O dispositivo possibilita o desenvolvimento de projetos que precisam de forma direta ou indireta do uso de dados de data e hora.

Figura 20 - Shield Real Time Clock DS1302.



Fonte: ML, 2014b.

Esse dispositivo opera com uma bateria de 3V para manter o horário atualizado e para a programação poder ser alimentado em 5V.

O shield pode ser operado individualmente, como também junto com outras extensões. Atuando juntamente com o Shield Sd Card é possível desenvolver dataloggers para armazenamento de dados, dos mais diversos sensores, arquivando a respectiva data e hora da coleta (ARDUINO, 2014d).

O passo essencial para o uso do shield, antes de cada projeto, é a calibração de data e hora. A calibração é realizada na IDE do arduino, mediante *upload* do código descrito na figura 21. Para tal, é necessário a instalação da biblioteca DS1302 encontrada no sítio do projeto arduino.

Figura 21 - Código calibração Shield Real Time Clock DS1302.

```

#include <DS1302.h>
DS1302 rtc (2, 3, 4);

void setup(){
  rtc.halt (false);
  rtc.writeProtect (false);

  // Mude a parte abaixo do programa para a data e hora desejada

  rtc.setDOW(3);
  // Dia da Semana, sendo Segunda 1 e Domingo 7 - Coloque apenas os números, por
  exemplo NÃO coloque 04 apenas 4

  rtc.setTime(13, 2, 7);
  // Hora no formato de 24hrs sendo primeiro a hora, depois minuto e finalmente os
  segundos - Coloque apenas os números, por exemplo NÃO coloque 02 apenas 2

  rtc.setDate(10, 8, 2014);
  // Data sendo Dia, depois Mês e finalmente ano com 4 dígitos - Coloque apenas os
  números, por exemplo NÃO coloque 08 apenas 8
}

void loop(){
  delay (1000);
}

```

Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

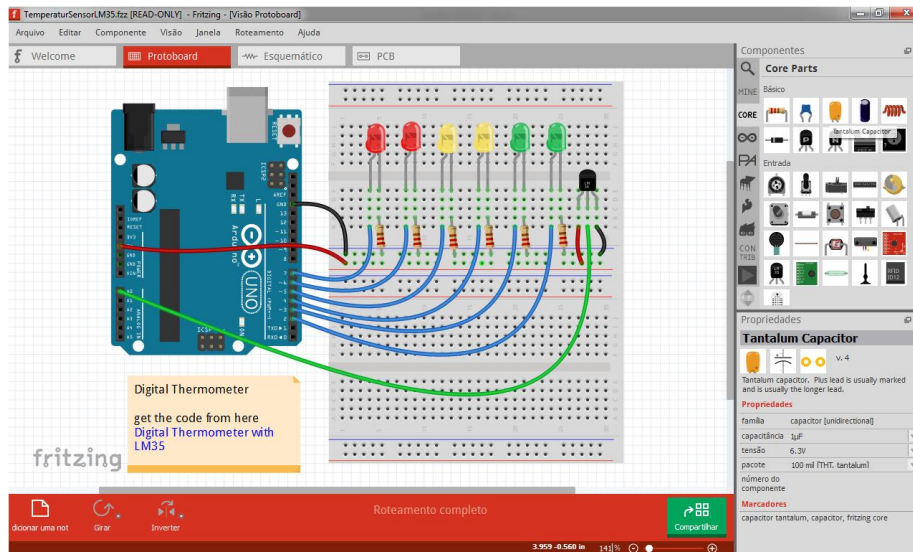
3.7 CONSTRUÇÃO DE CIRCUITOS ELETRÔNICOS - FRITZING E PROTOBOARD

A ferramenta Fritzing é um software livre para modelagem de protótipos eletrônicos. Segundo Fritzing (2014), criada na Universidade de Ciências Aplicadas de Potsdam (Alemanha), a ferramenta Fritzing auxilia a criação de circuitos que integram a plataforma arduino. A figura 22 apresenta a interface dessa ferramenta ao implementar-se um exemplo.

A principal vantagem de utilizar a plataforma deve-se a facilidade de testar diversos circuitos eletrônicos, mesmo antes de comprar os componentes, podendo corrigir falhas e aprimorar circuitos antes que estes sejam postos em prática.

Dentre as diversas potencialidades do software, o usuário pode desenvolver seus próprios componentes eletrônicos. Além disso, os circuitos desenvolvidos podem ser exportados em forma de imagens do tipo *jpeg* e *png* facilitando a ilustração de circuitos complexos.

Figura 22 - Interface da ferramenta Fritzing.

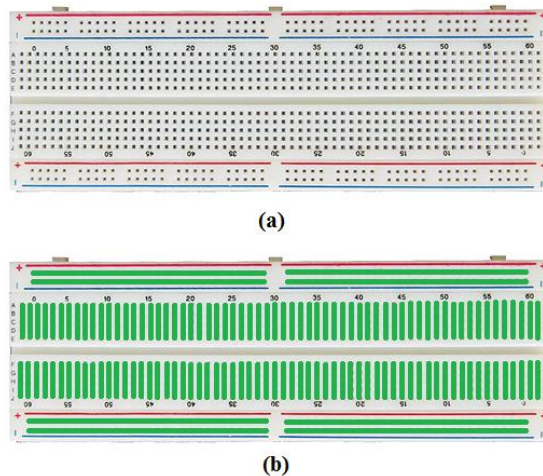


Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

Os projetos são exibidos de três maneiras principais: na forma convencional EDA (*Electronic Design Automation*), no modo esquemático (*schematic*) e PCB (*Printed Circuit Board*).

Após o usuário desenvolver o circuito digital, devidamente esquematizado, o mesmo poderá implementar o circuito na prática. Para tal, costuma-se utilizar a *protoboard* (figura 23) na etapa experimental e na etapa final o *circuito impresso*, estágio em que o circuito eletrônico encontra-se consolidado.

Figura 23 - Protoboard: (a) Protoboard.de 800 furos. (b) Conexões internas.



Fonte: Rêgo, M. de S., 2014.

Segundo Faria et al. (2014) a protoboard é uma placa com furos e conexões condutoras para montagem de circuitos elétricos experimentais.

A grande vantagem é a facilidade de inserção de componentes, uma vez que não necessita soldagem. As placas variam de 800 até 6000 pontos, tendo conexões verticais e horizontais, conforme a figura 23-b. Para realizar as conexões entre os furos alguns componentes eletrônicos já possuem extremidades adaptadas para tal. A ligação entre os componentes é feita mediante fios denominados *jumpers* que possuem extremidades adaptadas para encaixar nos furos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

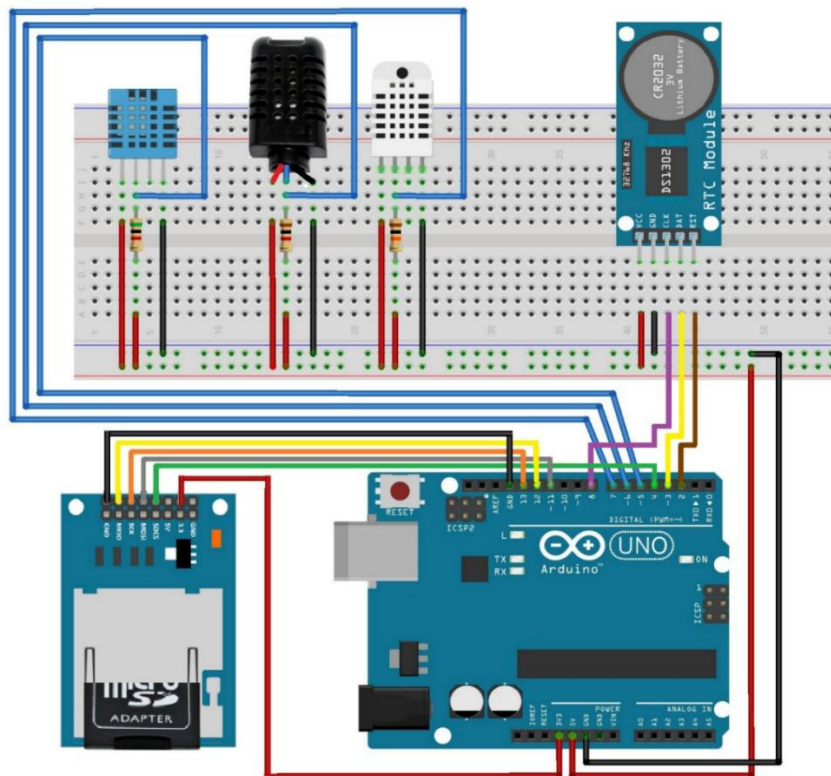
O desenvolvimento experimental deste trabalho consistiu em cinco etapas principais: 1 - *construção do circuito eletrônico*; 2 - *elaboração do abrigo para os sensores*; 3 - *implementação dos algoritmos*; 4 - *coleta dos dados* e 5 - *análise de dados*. Na sequência cada uma dessas etapas é descrita.

4.1 CONSTRUÇÃO DO CIRCUITO ELETRÔNICO

A primeira etapa consistiu na montagem do circuito eletrônico na plataforma Fritzing e posteriormente numa protoboard de 800 furos, com a utilização de um arduino uno rev. 3, dos sensores de temperatura e umidade relativa do ar RHT01, RHT02 e RHT03, do shield sd card e do real time clock DS1302. As conexões foram realizadas com a utilização de jumpers.

A figura 24 ilustra o esquema do circuito eletrônico desenvolvido.

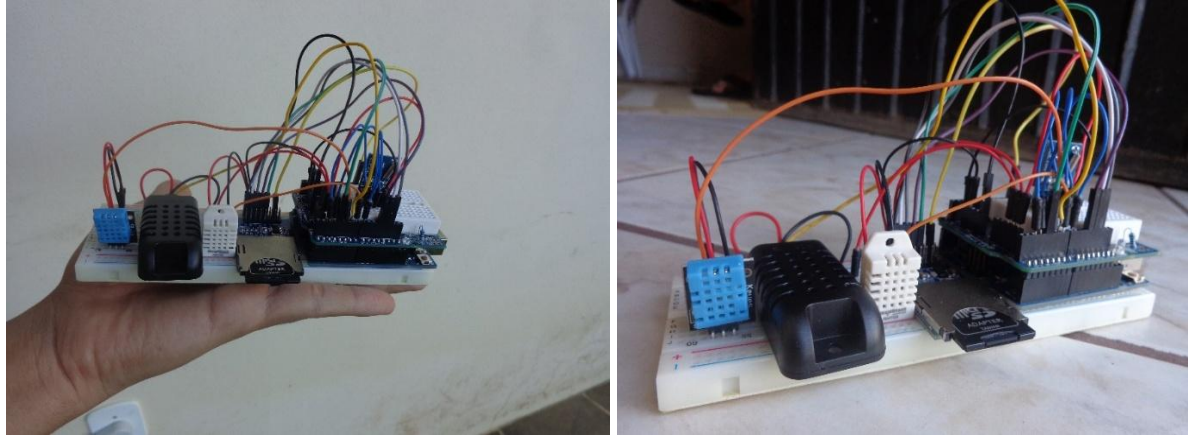
Figura 24 - Esquema do circuito eletrônico desenvolvido com utilização da plataforma Fritzing.



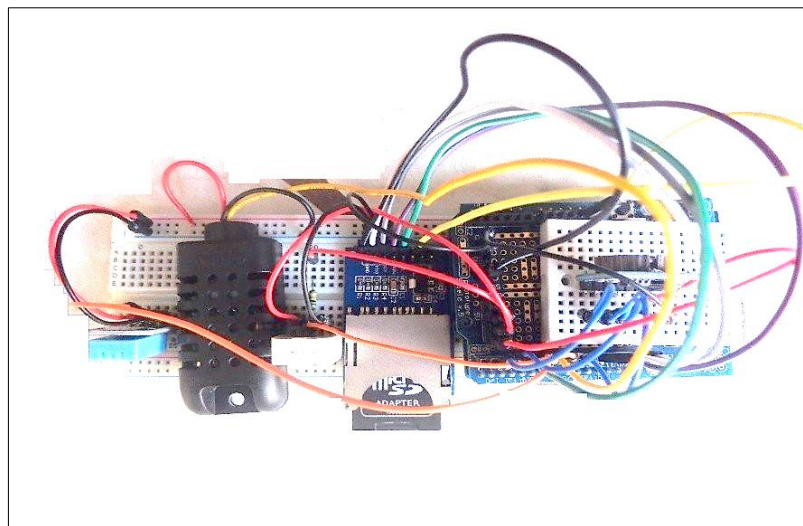
Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

A figura 25 mostra o circuito eletrônico real montado na protoboard.

Figura 25 – Circuito eletrônico montado na protoboard. (a) Frontal. (b) Superior.



(a)



(b)

Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

O custo do circuito eletrônico foi de R\$ 320,02 (trezentos e vinte reais e dois centavos em Set. 2014). A descrição detalhada do custo encontra-se no APÊNDICE A.

4.2 ELABORAÇÃO DO ABRIGO PARA OS SENSORES

Em conformidade com as normas da Organização Mundial de Meteorologia (OMM), os sensores meteorológicos devem ser protegidos contra a radiação solar direta e devem ter um sistema que permita a ventilação e a dissipação do calor, para que os valores obtidos representem o ambiente local.

Segundo Palmieri (2009) também existe a necessidade de proteger os sensores da exposição à chuva. Porém tal proteção deve ser colocada de modo a não influenciar as medidas, mediante a ocorrência de um microclima, devendo apenas favorecer a circulação de ar.

A partir dos abrigos de baixo custo propostos por Neves (2011), Palmieri (2009) e Souza (2012) optou-se por utilizar a estrutura de uma luminária de mesa danificada e adaptá-la a comportar o conjunto descrito na figura 25. A figura 26 ilustra o modelo de luminária utilizada.

Figura 26 - Luminária utilizada para confecção do abrigo.



Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

Retirou-se da estrutura os componentes elétricos da luminária; em seguida retirou-se os componentes eletrônicos da protoboard, alongando o cabeamento dos sensores para que estes ficassem em um extremo do abrigo e os outros componentes eletrônicos ficassem no outro extremo, onde ficava a caixa que dispunha de mais espaço para armazená-los. No extremo onde se instalaram os sensores adaptou-se uma grade de proteção para os sensores.

A figura 27 mostra o processo de montagem até alcançar a forma do protótipo que foi utilizado nos testes.

Figura 27 - Processo de montagem do circuito eletrônico no abrigo.



Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

Utilizaram-se três formas de alimentação para o sistema. O protótipo poderia ser alimentado por uma fonte 9V com saída PW4, uma bateria 9V com adaptador *jack-barry* e módulos fotovoltaicos com tensão de saída da ordem de 12V. A escolha das opções foi realizada mediante a análise da disponibilidade de energia elétrica nas condições de teste.

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DOS ALGORITMOS

Com o circuito eletrônico já desenvolvido, considerando as respectivas portas em que os sensores e Shields foram conectados, realizou-se a calibração do relógio conforme descrito figura 21, em seguida foi implementado o código fonte para que o arduino colocasse os sensores em operação, lesse os valores mensurados seguindo a discretização temporal definida e armazenasse os dados no cartão sd com respectiva data e hora da coleta.

O código foi programado em linguagem “C/C++” em um computador pessoal com 4 gigabyte (GB) de memória RAM e processador CORE (i3). O APÊNDICE B descreve o código fonte implementado.

4.4 COLETA DOS DADOS

Com o objetivo de verificar a confiabilidade quanto ao funcionamento, cada sistema foi submetido a três testes de coleta de dados, em três locais diferentes respectivamente, onde foi instalado um dos termohigrômetros convencionais utilizados pelo Laboratório de Micrometeorologia da UFSM (LMMET/UFSM), cujo modelo foi descrito no subitem 3.3.4.

O estudo foi realizado no Município de Santa Maria, região de depressão central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil em locais que variavam de 93 a 120 metros de altitude.

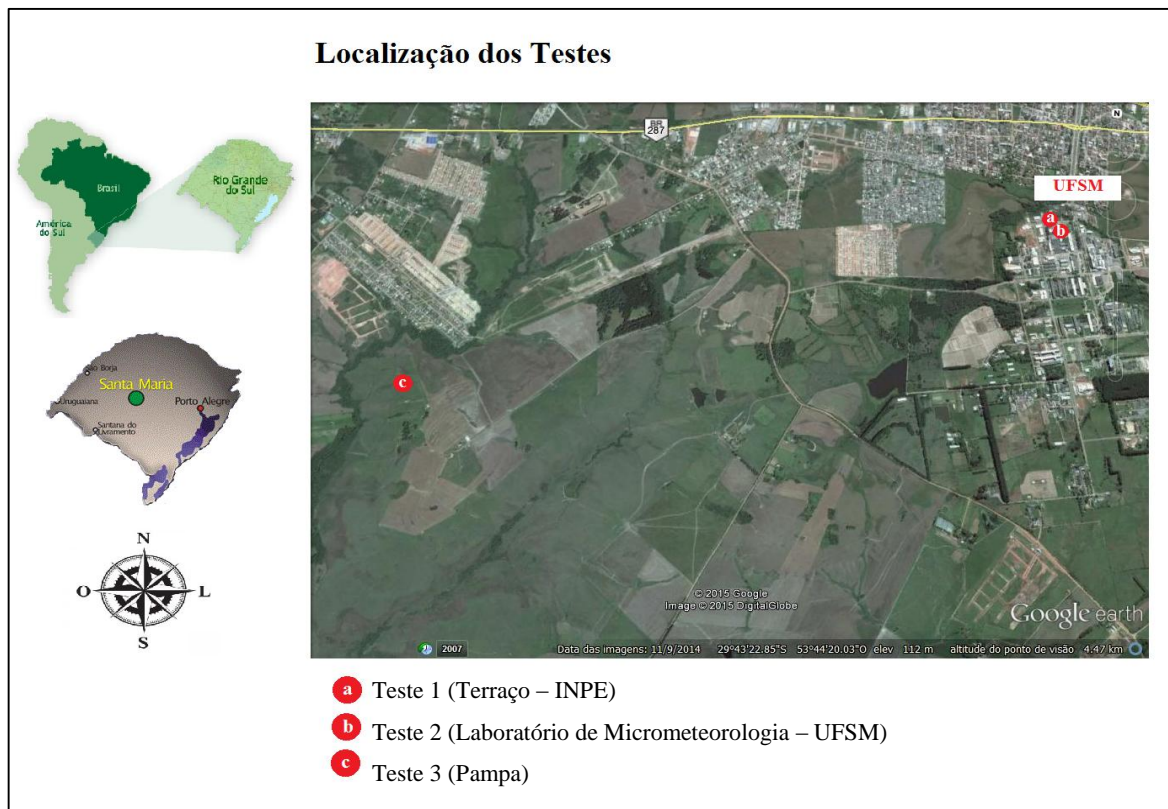
O clima na região, conforme sistema de classificação Köppen é do tipo subtropical Cfa caracterizado pela ocorrência de precipitação durante todos os meses do ano, sem grande diferença quantitativa entre o mês mais chuvoso e o mês mais seco, de acordo com as normas climatológicas, obtidas com dados do período de 1961-1990, provenientes da Estação Meteorológica do INMET Santa Maria-A803 (Código OMM 86977).

A precipitação média anual é igual a 1616,9 mm, com chuvas bem distribuídas durante o ano, com uma frequência de 96 dias. A temperatura média anual situa-se em torno de 18,8°C,

com médias mensais variando de 24,2°C em janeiro a 13,9°C em junho. A umidade relativa do ar média anual é de 76,5% e a insolação total anual igual a 2181,8 horas.

Os locais dos testes ficam localizados no campus da Universidade Federal de Santa Maria, conforme mostra a figura 28.

Figura 28 - Localização dos testes.



Fonte: Adaptado de Google Earth, 2015.

As condições de microclima entre os testes eram diferentes em virtude do local. O primeiro teste foi realizado no terraço das instalações do INPE-UFSM (localização 29°42'44,68" S e 53°43'05,24" O), o segundo teste no laboratório de micrometeorologia da UFSM (localização 29°42'45,39" S e 53°43'05,10" O) e o terceiro em uma área rural do campus central da UFSM, denominado pampa neste trabalho (localização 29°43'27,34" S e 53°45'35,93" O), onde localizava-se uma torre convencional da rede de monitoramento SULFLUX.

No teste 1 os sensores ficaram a 1,70 m em relação ao piso do terraço do prédio do INPE, no teste 2 sobre uma bancada de 30 centímetros de altura no laboratório e no teste 3 a

1,70 m do solo. Nos 3 testes os sensores, de baixo custo e convencional, ficaram a poucos centímetros de distância entre si, para garantir que os mesmos estariam aproximadamente sob as mesmas condições. Nos testes 1 e 3 optou-se por acrescentar sobre o protótipo de baixo custo um *radiation shield* (proteção convencional contra radiação). No teste 2 optou-se por remover o abrigo do sensor convencional e o *radiation shield* do sensor de baixo custo.

As figuras 29, 30 e 31 mostram a disposição dos equipamentos nos teste 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 29 - Teste 1 - Terraço do prédio do INPE/UFMS.



Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

Figura 30 - Teste 2 - Laboratório de Micrometeorologia da UFSM.



Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

Figura 31 - Teste 3 – Pampa (Torre de micro-SULFUX).



Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

As coletas ocorreram durante os meses de abril a junho, correspondendo a etapa final da estação de outono e início do inverno no ano de 2015. O período escolhido foi pelo fato de possuir maior variabilidade das grandezas mensuradas ao longo do dia. A partir de dados fornecidos pelo INPE e INMET, confirmou-se que as coletas abrangeram dias ensolarados, com neblina e chuvosos.

O primeiro teste durou 11 dias, o segundo 13 e o terceiro 11, portanto, 35 dias de coleta no total. Uma das mais renomadas fabricantes de sensores do mundo e que é altamente recomendada para a análise de sensores, inclusive pela arduino, a Boxtec (2014) afirma que a duração das coletas, para efeito de comparação, para a série de sensores RHT01, RHT02 e RHT03 é de 24 horas. Portanto, o período de coleta, para cada posto, da presente pesquisa corresponde a várias campanhas de análise de sensores.

A discretização temporal das coletas das duas variáveis foi de um minuto. Contudo, destaca-se que o sensor de baixo custo, conforme código fonte implementado coletava dados de temperatura e umidade relativa do ar a cada minuto, enquanto o convencional, coletava 6 medidas de temperatura por minuto e tirava a média. Para umidade relativa do ar a coleta era feita de maneira similar ao de baixo custo, isto é, uma medida a cada 60 segundos. O relógio

dos sistemas de baixo custo e o do sistema convencional foram sincronizados tomando como referência o horário de Brasília/Brasil.

4.5 ANÁLISE DE DADOS

Com os dados coletados realizou-se análise comparativa dos sistemas de baixo custo e os sistemas convencionais, mediante a geração de gráficos, medidas descritivas, correlação linear de Pearson, análise de variância e teste tukey. Para tal, utilizou-se os softwares estatísticos Excell, R e BioEstat 5.0.

As análises enfocaram a aplicabilidade do sistema de baixo custo. Portanto, considerou a capacidade de fornecimento de dados. Foram escolhidos quatro intervalos de geração de dados: 1 hora, 30 minutos, 15 minutos e 1 minuto.

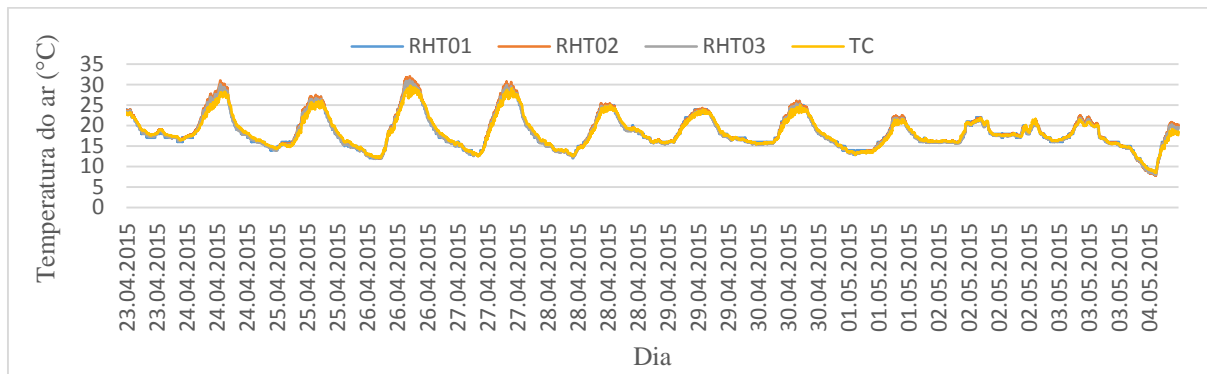
A análise diária também foi realizada, sendo utilizada numa etapa inicial do trabalho para verificação do comportamento da coleta e também a procura de pontos problemáticos, ou falhas. O eixo do tempo (abscissa) nos gráficos do estudo diário têm início as 06:00h e término as 23:59h, correspondendo a faixa temporal com maior variação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos procedimentos metodológicos descritos no tópico anterior, o teste 1 resultou em uma série de 122.064 dados coletados, o teste 2 em 145.008 e o teste 3 em 126.488, contabilizando 393.560 dados coletados.

A série total de temperatura do ar no Teste 1 (Terraço do INPE/UFSM) dos sensores RHT01, RHT02, RHT03 e Convencional (TC) pode ser observado na figura 32.

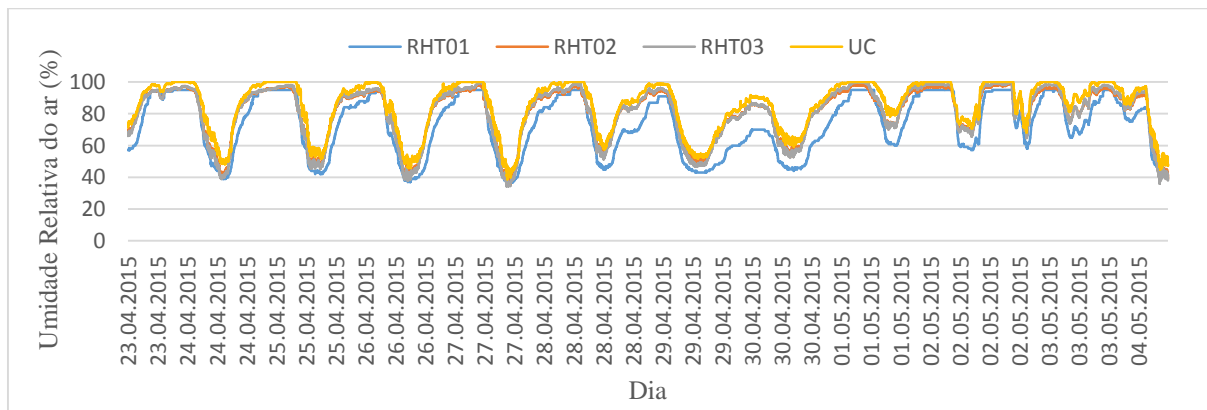
Figura 32 - Série total para temperatura do ar – Teste 1: Terraço do INPE/UFSM.



Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

A série total de umidade relativa do ar no Teste 1 dos sensores RHT01, RHT02, RHT03 e Convencional (UC) pode ser observado na figura 33.

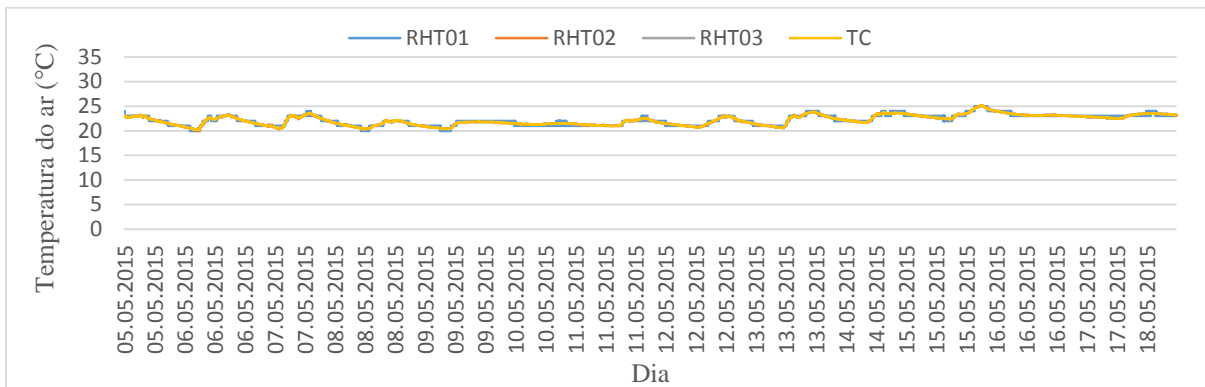
Figura 33 - Série total para umidade relativa do ar – Teste 1: Terraço do INPE/UFSM.



Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

A série total de temperatura do ar no Teste 2 (Laboratório de Micrometeorologia da UFSM - LMMET/UFSM) dos sensores RHT01, RHT02, RHT03 e Convencional (TC) pode ser observada na figura 34.

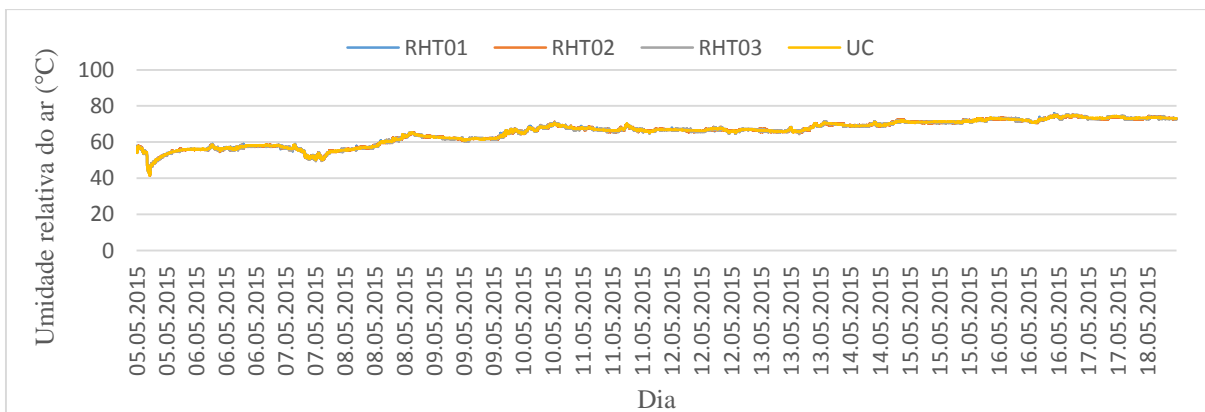
Figura 34 - Série total para temperatura do ar – Teste 2: Laboratório de Micrometeorologia da UFSM.



Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

A série total de umidade relativa do ar no Teste 2 (Laboratório de Micrometeorologia da UFSM) dos sensores RHT01, RHT02, RHT03 e Convencional (UC) pode ser observada na figura 35.

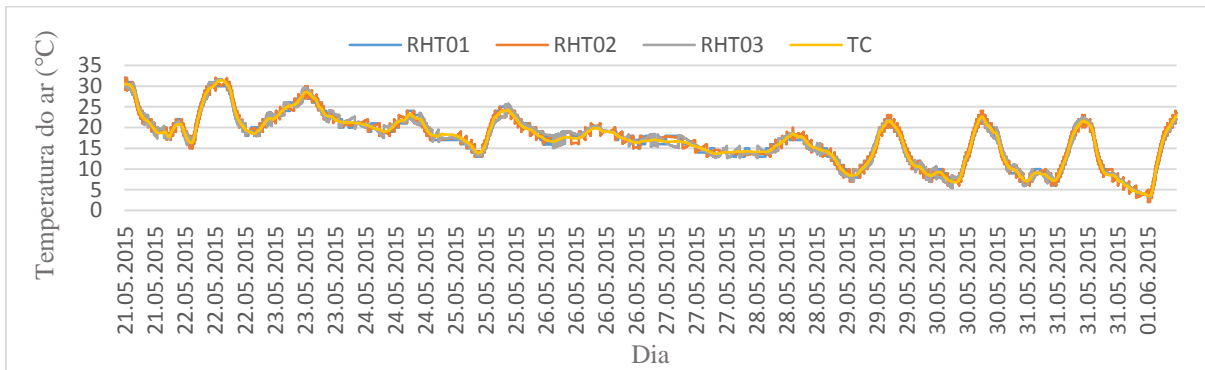
Figura 35 - Série total para umidade relativa do ar – Teste 2: Laboratório de Micrometeorologia da UFSM.



Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

A série total de temperatura do ar no Teste 3 (Pampa) dos sensores RHT01, RHT02, RHT03 e Convencional (TC) pode ser observada na figura 36.

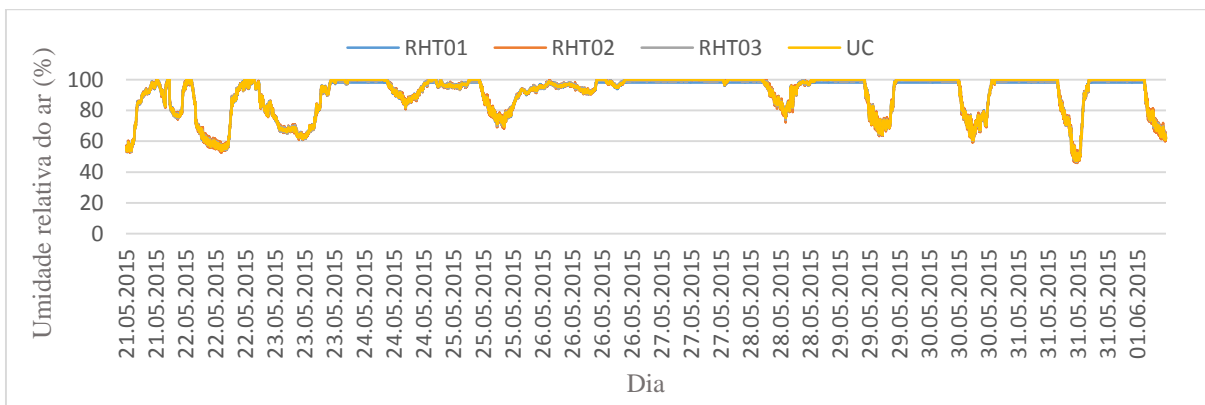
Figura 36 - Série total para temperatura do ar – Teste 3: Pampa.



Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

A série total de umidade relativa do ar no Teste 3 (Pampa) dos sensores RHT01, RHT02, RHT03 e Convencional (UC) pode ser observada na figura 37.

Figura 37 - Série total para umidade relativa do ar – Teste 3: Pampa.



Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

Para o Teste 1 o sistema convencional mediu a temperatura máxima de 29,67°C (dia 27/04/2015) e mínima de 8,51°C (dia 04/05/2015). Para umidade relativa do ar o sistema convencional obteve o valor máximo de 100% (várias vezes) e mínimo de 38,79% (dia 27/04/2015).

O Teste 2 apresentou menor faixa de variação das grandezas, por se tratar de um ambiente protegido. O sistema convencional monitorou temperatura máxima de 25,11°C (dia 15/05/2015) e mínima de 20,23°C (dia 06/05/2015). Para umidade relativa do ar o sistema

convencional obteve um valor máximo de 74,9% (dia 17/05/2015) e mínimo de 41,62% (dia 05/05/2015).

No Teste 3 o sistema convencional mediu a temperatura máxima de 31,44°C (dia 22/05/2015) e mínima de 3,44°C (dia 01/06/2015), sendo esta a temperatura mais baixa monitorada nos testes. Para umidade relativa do ar o sistema convencional obteve o valor máximo de 100% (várias vezes) e mínimo de 47,12% (dia 31/05/2015).

O número de gráficos que resultaram da análise diária (descrita no item 4.5) foi demasiado grande para inserir no item Resultados e Discussão, por este motivo, os mesmos encontram-se no APÊNDICE C - Análise gráfica das medições diárias.

Nas figuras 38, 39 e 40, correspondentes aos testes 1, 2 e 3 respectivamente, são apresentadas as curvas de dispersão com os valores de R^2 entre os dados coletados de temperatura do ar pelos sensores RHT01, RHT02 e RHT03 e o sistema convencional, considerando os valores das grandezas médias em intervalos de tempo de 1 minuto, 15 minutos, 30 minutos e 1 hora, onde a linha vermelha é o cenário ideal esperado, em que os dados monitorados de cada sistema de baixo custo teriam exatamente os mesmos valores dos dados do sistema convencional.

Figura 38 - Dispersão entre os dados coletados de temperatura do ar pelos sensores RHT01, RHT02 e RHT03 e o sistema convencional, para médias obtidas para intervalos de (a) 1 minuto, (b) 15 minutos, (c) 30 minutos e (d) 1 hora - Teste 1: Terraço do INPE/UFSM.

(Continua)

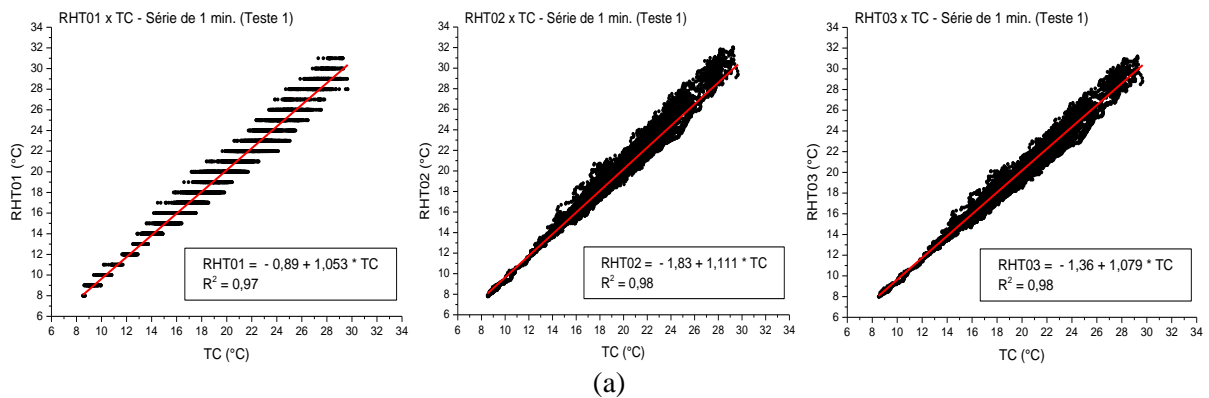
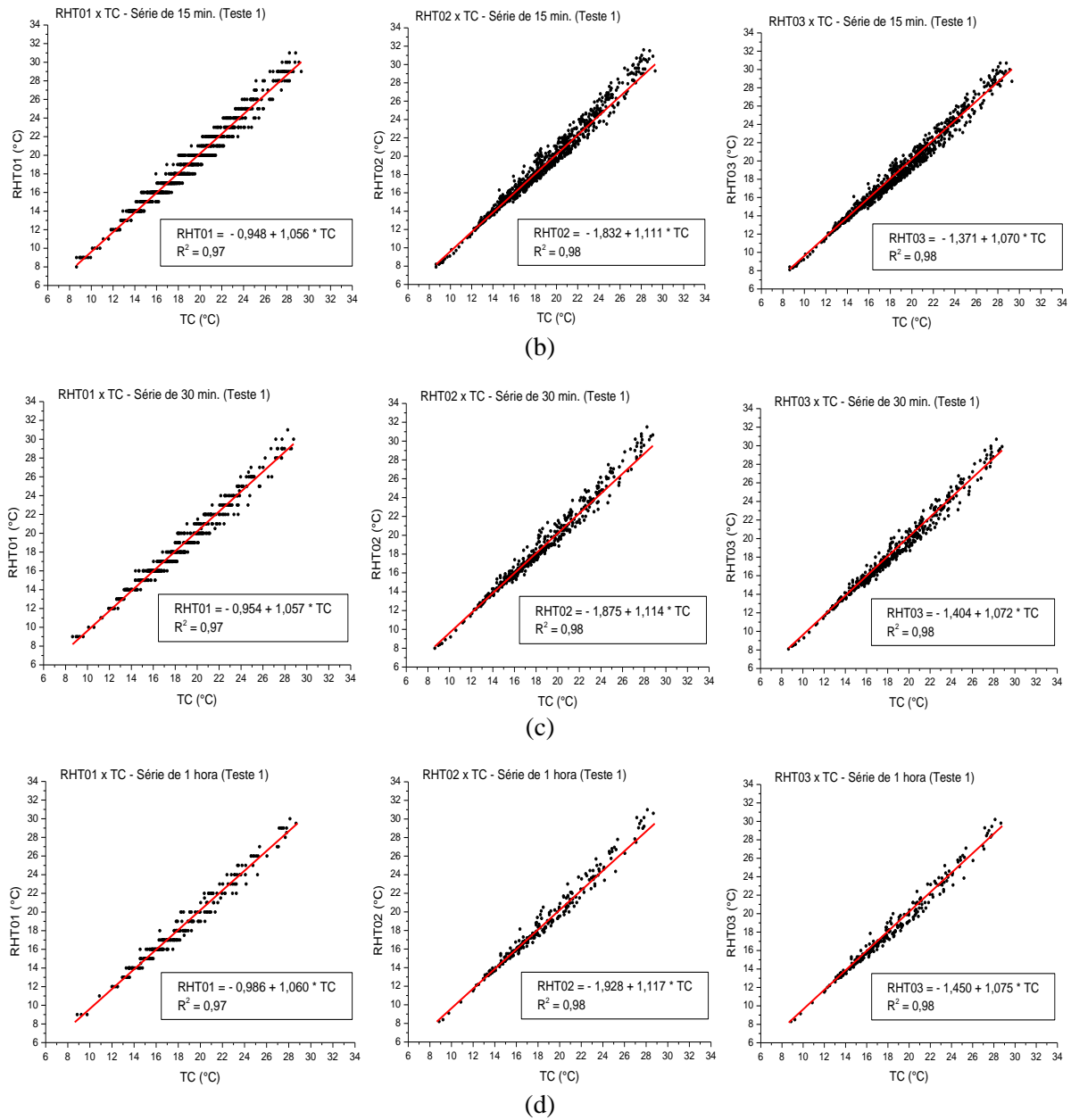


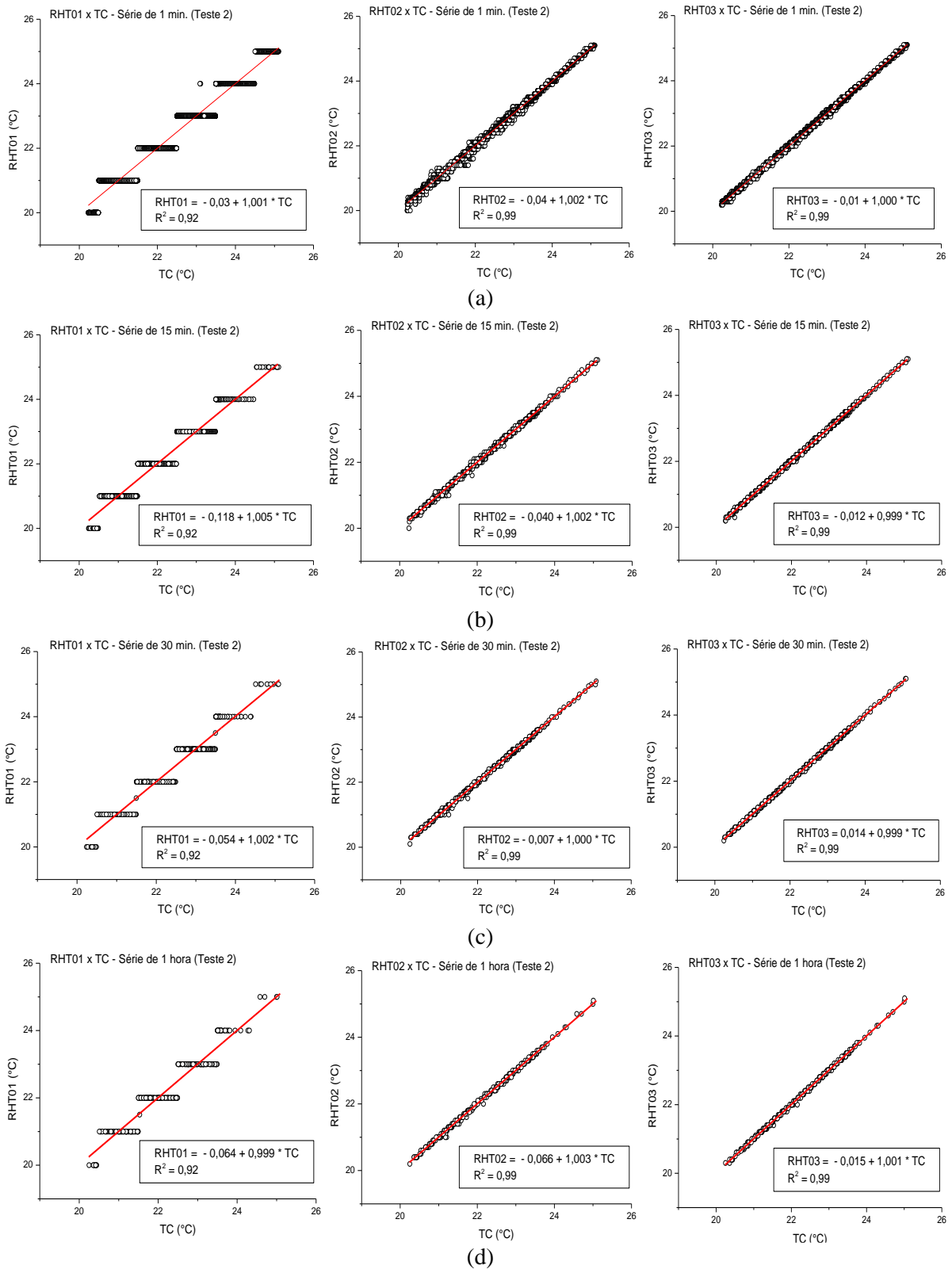
Figura 38 - Dispersão entre os dados coletados de temperatura do ar pelos sensores RHT01, RHT02 e RHT03 e o sistema convencional, para médias obtidas para intervalos de (a) 1 minuto, (b) 15 minutos, (c) 30 minutos e (d) 1 hora - Teste 1: Terraço do INPE/UFSM.

(Conclusão)



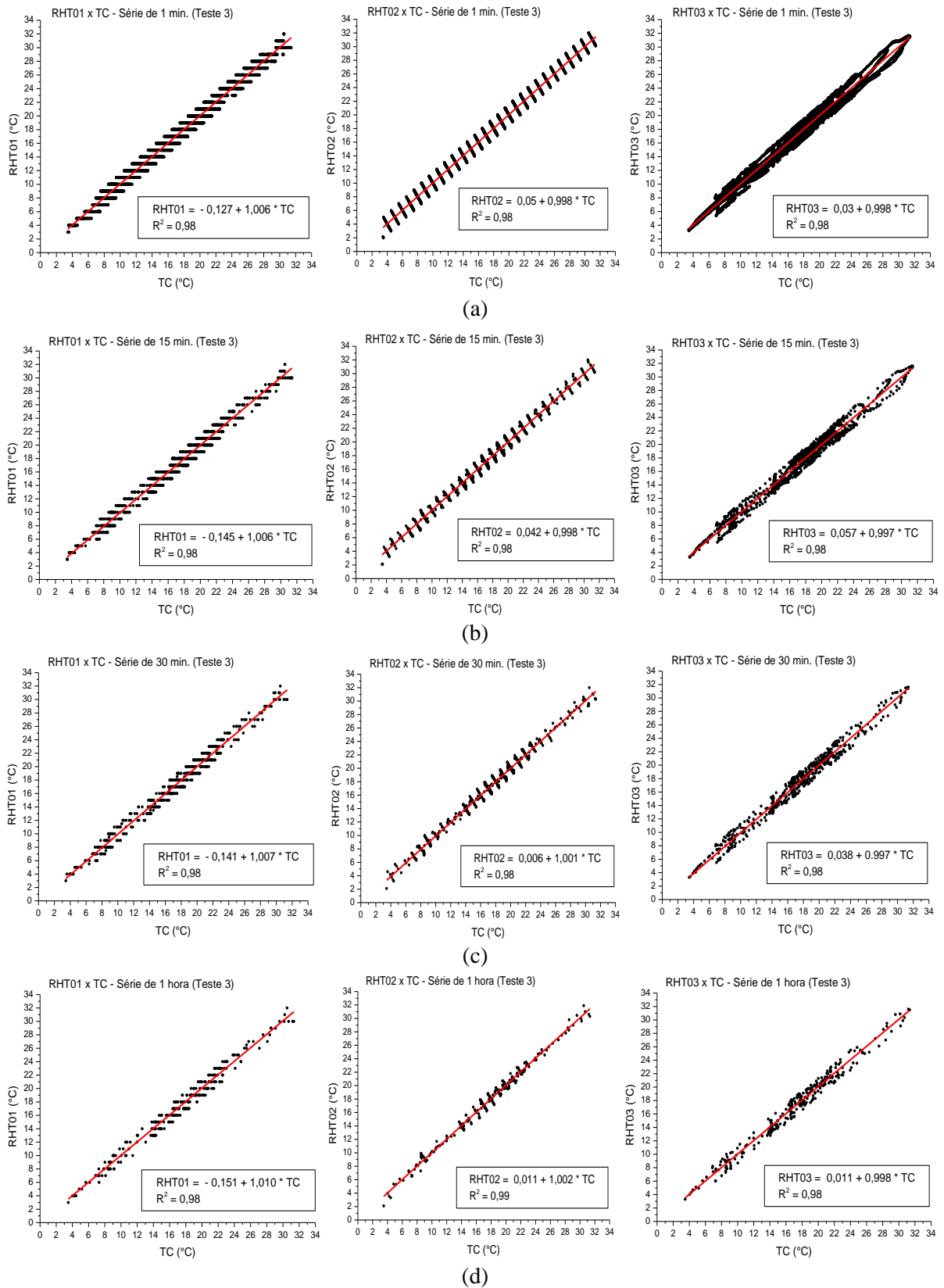
Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

Figura 39 - Dispersão entre os dados coletados de temperatura do ar pelos sensores RHT01, RHT02 e RHT03 e o sistema convencional, para intervalos de (a) 1 minuto, (b) 15 minutos, (c) 30 minutos e (d) 1 hora - Teste 2: Laboratório de Micrometeorologia da UFSM.



Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

Figura 40 - Dispersão entre os dados coletados de temperatura do ar pelos sensores RHT01, RHT02 e RHT03 e o sistema convencional, para intervalos de (a) 1 minuto, (b) 15 minutos, (c) 30 minutos e (d) 1 hora - Teste 3: Pampa.



Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

Analisando estes resultados observa-se que o sensor RHT01 apresentou o valor de R^2 mais baixo entre os sensores nos testes 1 e 2, sendo 0,97 e 0,92 respectivamente. Os sensores RHT02 e RHT03 obtiveram valores iguais ou superiores a 0,98 nos três testes, para todos os intervalos. Observa-se então, que as correlações entre dados coletados pelos sensores de baixo custo e o sistema convencional foram do tipo muito forte.

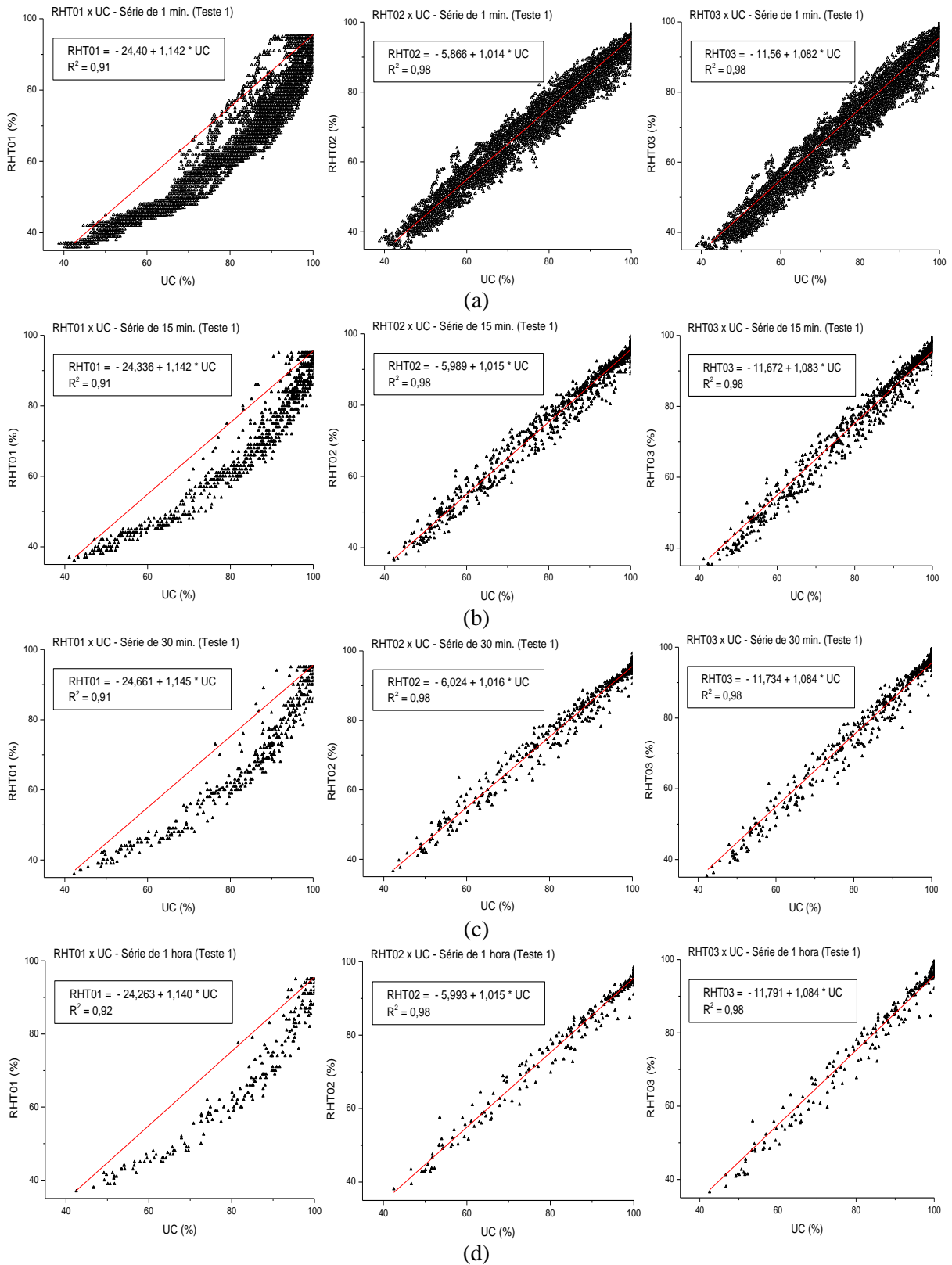
Destaca-se ainda que a geração de dados para 1 minuto, 15 minutos, 30 minutos e 1 hora não causou grande alteração nos valores de correlação, sendo que o único caso que observou-se aumento da correlação, nas casas decimais adotadas, foi o sensor RHT02 no teste 3, variando de R^2 igual a 0,98 para 0,99. A partir da análise de variância, verificou-se que não havia diferença significativa entre os sensores de temperatura de baixo custo e o sistema convencional em todos os testes e em todos os intervalos de geração de dados. Assim, para fornecimento de dados de temperatura em 1 minuto, 15 minutos, 30 minutos e 1 hora os sensores RHT01, RHT02 e RHT03 juntamente com o abrigo foram validados.

Observa-se que os sensores RHT02 e RHT03 fornecem dados com variações menos abruptas do que o sensor RHT01, por causa da precisão que possuem. Destaca-se ainda que no teste 3 o sensor RHT02 apresentou um comportamento anormal em relação aos testes anteriores. O sensor as vezes superestimou e outras subestimou, porém manteve os valores mensurados em torno do valor de referência do convencional. Para as faixas analisadas de geração de dados tal comportamento não causou diferença significativa. Atribui-se esse comportamento as características individuais do sensor, como por exemplo a sua capacidade de reversibilidade.

Destaca-se também que no teste 2 (laboratório de micrometeorologia da UFSM), a análise de variância mostrou que os dados monitorados pelos três sensores de baixo custo foram mais precisos comparados aos testes 1 e 3. No teste 2 o abrigo dos sensores não tinha influência, pois os sensores ficaram sobre uma bancada sem incidência direta de radiação solar ou qualquer outra fonte de perturbação direta do processo de coleta dos dados. Assim, a variância observada nos testes 1 e 3 podem ser minimizadas com uso de um abrigo profissional ou confecção de um abrigo mais eficiente para os sensores.

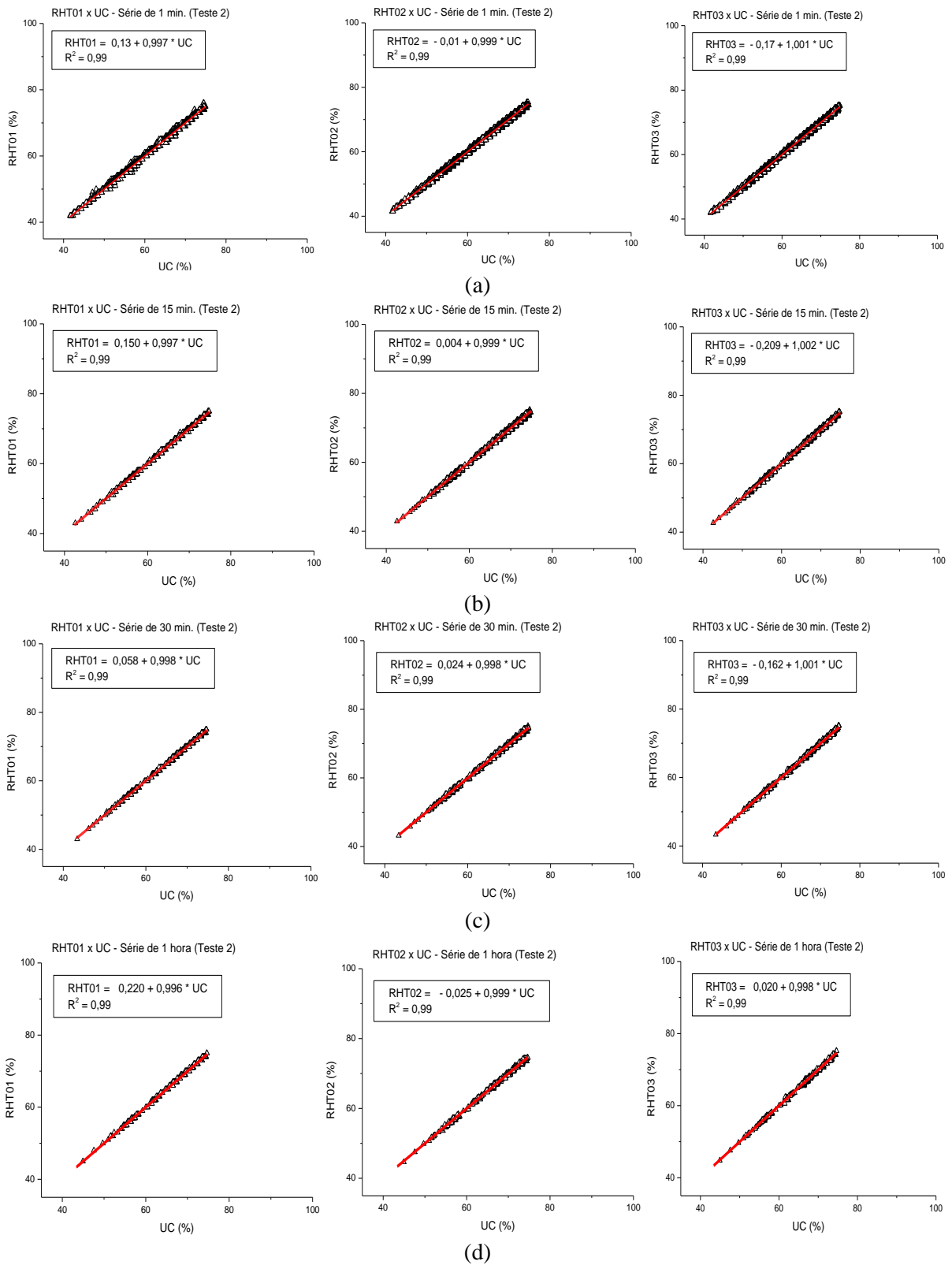
Nas figuras 41, 42 e 43 são apresentadas as curvas de dispersão com os valores de R^2 para umidade relativa do ar nos três testes, com respectivos intervalos analisados.

Figura 41 - Dispersão entre os dados coletados de umidade relativa do ar pelos sensores RHT01, RHT02 e RHT03 e o sistema convencional, para intervalos de (a) 1 minuto, (b) 15 minutos, (c) 30 minutos e (d) 1 hora - Teste 1: Terraço do INPE/UFSM.



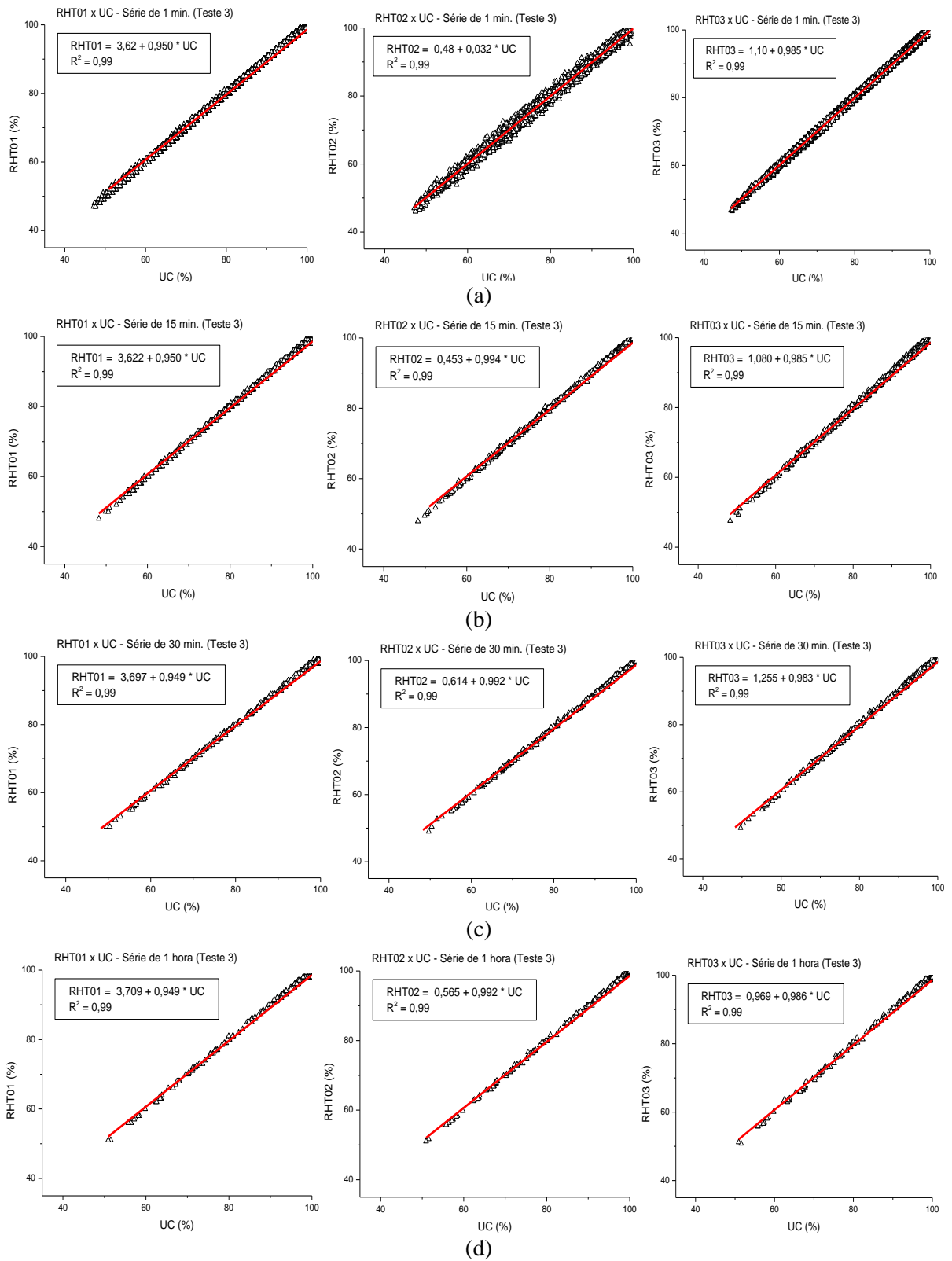
Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

Figura 42 - Dispersão entre os dados coletados de umidade relativa do ar pelos sensores RHT01, RHT02 e RHT03 e o sistema convencional, para intervalos de (a) 1 minuto, (b) 15 minutos, (c) 30 minutos e (d) 1 hora - Teste 2: Laboratório de Micrometeorologia da UFSM.



Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

Figura 43 - Dispersão entre os dados coletados de umidade relativa do ar pelos sensores RHT01, RHT02 e RHT03 e o sistema convencional, para intervalos de (a) 1 minuto, (b) 15 minutos, (c) 30 minutos e (d) 1 hora - Teste 3: Pampa.



Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

Analisando os resultados observou-se que a geração de dados para 1 minuto, 15 minutos, 30 minutos e 1 hora não causou grande alteração nos valores de correlação, sendo que o único caso que observou-se aumento da correlação, nas casas decimais adotadas, foi o sensor RHT01 no teste 2, variando de R^2 igual a 0,91 (faixa de 1 min., 15 min. e 30 min.) para 0,92 (faixa de 1h).

Analisando estes resultados observa-se que o sensor RHT01 apresentou o valor de R^2 mais baixo entre os sensores no teste 1, sendo 0,91 enquanto os sensores RHT02 e RHT03 apresentaram R^2 igual a 0,98. Nos testes 2 e 3 todos os sensores apresentaram valores de R^2 igual a 0,99. Assim, para os três testes os valores de correlação encontrados são do tipo muito forte. No entanto, ao comparar os dados obtidos com o esperado de um cenário em que o mesmo valor pudesse ser obtido nos dois sensores confrontados (linha vermelha das figuras), percebe-se que as informações obtidas no teste 1 apresentaram algum problema, pois embora o confronto entre os sensores de baixo custo e convencional gerem R^2 altos, se observa uma defasagem na leitura entre os sensores RHT01, RHT02 e RHT03 e o sistema convencional, sendo mais acentuada para o sensor RHT01, o qual apresentou desvios em relação as medidas do sistema convencional de até 16,56.

Realizando a análise de variância de um critério para o teste 1, verificou-se que havia *diferença significativa* entre os sensores de umidade relativa do ar. Realizando teste Tukey ao nível de 95% de confiança, verificou-se que a diferença estava entre o sensor RHT01 e os sensores RHT02, RHT03 e Sistema Convencional, sendo que a maior diferença foi em relação ao convencional, sendo a diferença de 12,5 para 1 minuto, 12, 2 para 15 e 30 minutos e 11,5 para uma hora.

Observando as características do sensor RHT01 no subitem 3.3.1 verifica-se que a faixa de monitoramento de umidade relativa do ar recomendada pelo fabricante é de 20-90%. Não quer dizer que o mesmo não meça faixas superiores e inferiores, porém não é recomendado pelo fabricante. Isso pode ser um fator que justifique o fato de que no teste 1 ele apresentou esse comportamento e no teste 3, também em condições de teste de campo, o mesmo apresentou comportamento distinto. O sensor RHT01 operou uma parte considerável do tempo (no teste 1) operando fora da faixa recomendada pelo fabricante, fato que pode ter comprometido a capacidade de reversibilidade do sensor, que está associada a taxa de recombinação iônica no filme polimérico. Ressalta-se que os testes demonstraram o comportamento da maior parte das

regiões brasileiras, que podem apresentar normalmente valores de umidade relativa do ar superiores a 90% (INMET, 2015).

Além deste fato pode-se destacar novamente a questão do abrigo. O abrigo do sistema de baixo custo foi o mesmo nos três testes, porém o cenário entorno do protótipo no teste 1 divergiu bastante do teste 3. No teste 3 o protótipo foi instalado a 1,70 m do solo, com vegetação próxima, enquanto que no teste 1 o mesmo foi instalado 1,70 m no terraço do prédio do INPE-UFSM, ficando mais exposto a perturbações, como por exemplo à correntes convectivas de ar. Variações ambientais ou outras interferência externas são pouco prováveis tendo em vista que as mesmas seriam detectadas pelos outros três sensores, incluindo o convencional. Porém é possível, tendo em vista que o RHT01 era mais suscetível a perturbações por estar operando acima da faixa recomendada pelo fabricante.

Considerando os trabalhos antecedentes, como Amorim et al. (2015), observa-se que a construção do abrigo é um passo fundamental; porém destaca-se a dificuldade experimental da presente pesquisa devido ao fato de que não se tratava de uma análise de um sensor, mas três. Mas, sabe-se que para efeito de aplicabilidade não se utilizarão três sensores, mas apenas um. Assim, o presente abrigo serviu apenas para a execução do teste simultâneo de três sensores, tendo atendido as necessidades de forma satisfatória. Para a aplicação dos sensores recomenda-se a utilização de protótipos de abrigo para comportar apenas um sensor, como os modelos propostos por Palmieri (2009), Neves (2011) e Souza (2012).

Também pode citar-se falha experimental, como alguma falha no circuito do RHT01, já que a falha não ocorreu acentuadamente nos outros dias da série, mas apenas nos dias 28/04, 29/04 e principalmente no dia 30/04 (figuras 5, 6 e 7 do APÊNDICE C - Análise gráfica das medições diárias), ocorrendo no meio da série. Ressalta-se que ao retirar os dias em que ocorreram essa interferência acentuada, a análise de variância de um critério aponta não haver diferença significativa entre os sensores, mesmo para valores fora da faixa de 20-50%. Ou seja, sem esses dias consecutivos na série a aplicação do sensor seria validada.

Ainda destaca-se a possibilidade de falha do sistema convencional no teste 1. Porém, considera-se pouco provável, por se tratar de um sensor utilizado rotineiramente em testes de calibração e ter passado por calibração antes dos testes da presente pesquisa.

Assim, para os testes 2 e 3 a análise de variância mostrou não haver diferença significativa entre os dados coletados pelo sensor RHT01 e os dados coletados pelo sistema convencional; também mostrou não haver diferença significativa entre os dados coletados pelos

sensores RHT02 e RHT03 e os dados coletados pelo sistema convencional, em todos os testes e para todos os intervalos de geração de dados.

Destaca-se que para a análise estatística de ambas as grandezas descrita anteriormente, também foi verificada a normalização de resíduos. Onde aplicaram-se os testes da soma do quadrado do resíduo, R_n e teste de amplitude (teste de resíduos normalizados). Porém, os resíduos não apresentaram anormalidades. A única exceção foi a umidade relativa do ar da série obtida pelo sensor RHT01 no teste 1, como já havia sido identificado e foi melhor detalhado pela análise de variância e teste Tukey.

Assim para aplicações em ambientes internos valida-se o uso do sensor RHT01 e para ambientes externos os fatores citados anteriormente devem ser considerados na aplicação a ser realizada. Para fornecimento de dados de 1 minuto, 15 minutos, 30 minutos e 1 hora os sensores RHT02 e RHT03 foram validados sem ressalvas, juntamente com o abrigo. Estes resultados também embasaram a escolha do sensor RHT03, como ocorreu nas pesquisas de Faria et al. (2014) e Arima (2015), já que o mesmo apresentou maior confiabilidade nos 3 testes realizados.

As tabelas 1 e 2 fornecem a síntese dos principais resultados numéricos obtidos para temperatura do ar e umidade relativa do ar, respectivamente.

Tabela 1 – Síntese dos principais resultados numéricos obtidos – Temperatura do ar.

TEMPERATURA DO AR										
Sensor	Intervalo de Geração de Dados	R²			ANOVA			Teste Tukey (Diferença)		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
RHT01	1 min.	0,97	0,92	0,98	-	-	-	-	-	-
	15 min.	0,97	0,92	0,98	-	-	-	-	-	-
	30 min.	0,97	0,92	0,98	-	-	-	-	-	-
	1h	0,97	0,92	0,98	-	-	-	-	-	-
RHT02	1 min.	0,98	0,99	0,98	-	-	-	-	-	-
	15 min.	0,98	0,99	0,98	-	-	-	-	-	-
	30 min.	0,98	0,99	0,98	-	-	-	-	-	-
	1h	0,98	0,99	0,99	-	-	-	-	-	-
RHT03	1 min.	0,98	0,99	0,98	-	-	-	-	-	-
	15 min.	0,98	0,99	0,98	-	-	-	-	-	-
	30 min.	0,98	0,99	0,98	-	-	-	-	-	-
	1h	0,98	0,99	0,98	-	-	-	-	-	-

* T = Teste
* - = Não houve diferença significativa

Tabela 2 – Síntese dos principais resultados numéricos obtidos – Umidade relativa do ar.

UMIDADE RELATIVA DO AR										
Sensor	Intervalo de Geração de Dados	R ²			ANOVA			Teste Tukey (Diferença)		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
RHT01	1 min.	0,91	0,99	0,99	p = 0,0001	-	-	12,5	-	-
	15 min.	0,91	0,99	0,99	p = 0,0001	-	-	12,2	-	-
	30 min.	0,91	0,99	0,99	p = 0,0001	-	-	12,2	-	-
	1h	0,92	0,99	0,99	p = 0,0001	-	-	11,5	-	-
RHT02	1 min.	0,98	0,99	0,99	-	-	-	-	-	-
	15 min.	0,98	0,99	0,99	-	-	-	-	-	-
	30 min.	0,98	0,99	0,99	-	-	-	-	-	-
	1h	0,98	0,99	0,99	-	-	-	-	-	-
RHT03	1 min.	0,98	0,99	0,99	-	-	-	-	-	-
	15 min.	0,98	0,99	0,99	-	-	-	-	-	-
	30 min.	0,98	0,99	0,99	-	-	-	-	-	-
	1h	0,98	0,99	0,99	-	-	-	-	-	-

* T = Teste

* - = Não houve diferença significativa

Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

6. CONCLUSÃO

A presente pesquisa propôs o desenvolvimento e validação de sistemas de monitoramento de baixo custo de temperatura e umidade relativa do ar.

O sistema proposto, constituído por três subsistemas de monitoramento das mesmas variáveis, desenvolvidos para operarem simultaneamente, foi desenvolvido com sucesso a partir da utilização de recursos de controle e armazenamento de dados com prototipagem de baixo custo, baseados em tecnologia arduino. O sistema central de armazenamento de dados operou satisfatoriamente – tendo memória suficiente para mais 5 anos de coleta.

O sistema foi avaliado pela comparação com um termohigrômetro convencional utilizado pelo Laboratório de Micrometeorologia da UFSM (LMMET/UFSM), em três testes distintos.

No primeiro teste o sistema foi submetido a um ambiente aberto localizado no terraço do INPE/UFSM, o segundo teste foi realizado em ambiente protegido, no Laboratório de micrometeorologia da UFSM e o terceiro novamente em ambiente aberto, porém em uma zona rural do campus central da UFSM, denominado de Pampa na presente pesquisa.

Para a temperatura do ar verificou-se que os dados mensurados pelos sensores RHT01, RHT02 e RHT03 apresentaram R^2 igual ou superior a 0,97 em relação aos dados fornecidos pelo sistema convencional, para todos os testes realizados. Não havendo diferença significativa entre os sensores de baixo e o sistema convencional validou-se a utilização dos mesmos para geração de dados em intervalos de 1 minuto, 15 minutos, 30 minutos e 1 hora, nas condições e faixas de teste avaliadas.

Para umidade relativa do ar verificou-se que os dados mensurados pelos sensores RHT01, RHT02 e RHT03, nos testes 2 e 3 apresentaram R^2 igual a 0,99 em relação aos dados fornecidos pelo sistema convencional. A análise de variância mostrou que não havia diferença significativa entre os dados fornecidos pelos 3 sensores e os dados fornecidos pelo sistema convencional. No teste 1 o mesmo resultado foi obtido para os sensores RHT02 e RHT03, divergindo apenas no valor de R^2 , sendo 0,98 para os dois sensores neste teste. Já o sensor RHT01 apresentou os menores valores de correlação encontrados na presente pesquisa, sendo que no teste 1 o R^2 foi igual a 0,91 para geração de dados de 1 minuto, 15 minutos e 30 minutos e 0,92 para uma hora. Ainda no teste 1 a análise de variância mostrou que havia diferença significativa entre os sensores. O teste Tukey a 95% de confiança mostrou que a diferença estava entre os dados simultâneos obtidos pelo sensor RHT01 e o fornecidos pelos sensores

RHT02, RHT03 e sistema convencional, sendo as diferenças maiores para o sistema convencional, atingindo valores de 12,5 para 1 minuto, 12, 2 para 15 e 30 minutos e 11,5 para uma hora. A análise dos dados mostrou que valores da série obtidos nos dias 28/04, 29/04 e principalmente 30/04/2015 foram os responsáveis pela diferença significativa. A pesquisa apontou algumas possíveis causas para o ocorrido, que variam desde falhas experimentais até as características individuais do sensor RHT01. Desta maneira validou-se o uso do sensor RHT01 para ambientes protegidos sem ressalvas, para as condições e faixas de teste avaliadas neste trabalho, para geração de dados em intervalos de 1 minuto, 15 minutos, 30 minutos e 1 hora. Para ambiente aberto o sensor RHT01 foi validado com ressalvas, tendo em vista que a maior parte das regiões brasileiras podem apresentar valores de umidade relativa do ar superiores a 90% ao longo do ano. Os sensores de baixo custo RHT02 e RHT03 foram validados sem ressalvas, para geração de dados em intervalos de 1 minuto, 15 minutos, 30 minutos e 1 hora, nas condições e faixas de teste avaliadas neste trabalho.

O protótipo que foi desenvolvido com menos de 4% (podendo diminuir para menos de 3%) do custo do sistema convencional utilizado nos testes, operou satisfatoriamente. Assim, a pesquisa mostrou que o desenvolvimento e validação de sensores de baixo custo é viável, e pode ser uma ferramenta importante na otimização do planejamento, manejo e gestão dos recursos ambientais, à medida que contribui no campo do monitoramento de variáveis hidrometeorológicas, nos aspectos de praticidade operacional, custo e confiabilidade dos dados.

7. RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e desafios da presente pesquisa, algumas recomendações e sugestões de pesquisas futuras são propostas:

→ Realizar o estudo quantitativo da influência do abrigo dos sensores nos dados mensurados, afim de propor recursos e técnicas confiáveis na construção dos abrigos a partir do estudo de parâmetros como: diferentes tipos de materiais, formas do abrigo, alojamento do sensores, espaçamentos, praticidade no uso, custo etc.

→ Realizar testes em ambiente aberto, afim de gerar uma série anual de dados, que possibilite a análise de confiabilidade dos sensores em relação a sazonalidade.

→ Efetuar a comparação destes sensores em ambientes no território nacional que apresentem menor variabilidade das duas grandezas ao longo ano.

→ Verificar o efeito de calor e frio extremos sobre a operação dos sensores.

→ Efetuar comparação com estações convencionais em operação como alternativa prática e de baixo custo para detectar desvios em sistemas convencionais em utilização, facilitando o gerenciamento, manutenção e calibração.

→ Realizar ensaios experimentais de pequeno e longo prazo entre sensores digitais (como os sensores RHT01, RHT02 e RHT03) e sensores analógicos.

→ Verificar o efeito de descargas elétricas sobre o protótipo.

→ Verificar a influência de interferências com fontes de IRF.

→ Desenvolver e realizar o estudo de validação de uma torre de baixo custo que mesure as principais variáveis micrometeorológicas com o acréscimo de um sistema de envio de dados via *web* com tecnologia arduino e *Raspberry Pi 2*.

APÊNDICE A - DETALHAMENTO DO CUSTO PROTÓTIPO

Base: Set./2014

Quadro 1 (anexo) – Detalhamento do custo do protótipo.

Materiais permanentes e de consumo	Custo (R\$ reais)	Unidade	Quantidade	Total (R\$ reais)
RHT01	13,99	Unid.	1	13,99
RHT02	28,00	Unid.	1	28,00
RHT03	49,95	Unid.	1	49,95
Arduino Uno Rev. 3	65,00	Unid.	1	65,00
Shield Real Time Clock	14,98	Unid.	1	14,98
Shield Sd card	52,36	Unid.	1	52,36
Sd card	30,00	Unid.	1	30,00
Jumpers	16,99	Pacote	1	16,99
Resistores (1kΩ, 5kΩ, 10kΩ)	0,25	Unid.	3	0,75
Alimentação (Fonte 9V, bateria 9V e fios)	-	Unid.	1	48,00
Luminária (abrigo dos sensores)	-	Unid.	1	-
TOTAL	-	-	-	320,02

- = Valor não estimado.

Fonte: Própria, (2015).

➤ Observação – Não se leva em consideração o valor do frete nesse orçamento.

APÊNDICE B - CÓDIGO FONTE IMPLEMENTADO

```

/*
Configuração das conexões do Módulo SD Card ao Arduino.
** MOSI - pino 11
** MISO - pino 12
** CLK/SCK - pino 13
** CS - pino 10
*/
#include <SD.h> // Incluindo as bibliotecas.
#include <DS1302.h>
#include "DHT.h"
// -----
// Configuração das conexões do Módulo DS1302 Real Time Clock ao Arduino.
// ** RST - pino 2
// ** DAT - pino 3
// ** CLK - pino 4
// ! +5v

DS1302 rtc(2, 3, 4);
// -----
#define DHTPIN01 5 // Define os pinos em que os sensores serão conectados.
#define DHTPIN02 6
#define DHTPIN03 7
#define DHTTYPE1 DHT11 // Define os tipos de sensores que serão conectados.
#define DHTTYPE2 DHT21
#define DHTTYPE3 DHT22
DHT dht01(DHTPIN01, DHTTYPE1);
DHT dht02(DHTPIN02, DHTTYPE2);
DHT dht03(DHTPIN03, DHTTYPE3);

// -----
File myFile; // SD card.
// -----

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("\n\tDissertacao DESENVOLVIMENTO E VALIDACAO DE
SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE BAIXO CUSTO DE TEMPERATURA E
UMIDADE RELATIVA DO AR\n");

    dht01.begin();
    dht02.begin();
    dht03.begin();

    Serial.print("Inicializando SD card... ");
    if (!SD.begin(10))

```

```

    {
        Serial.println("A inicializacao do SD card falhou, verifique se o cartao
esta conectado");
        return;
    }
    Serial.println("SD card inicializado!\t");
// -----
}
void loop()
{
    float t01 = dht01.readTemperature();
    float u01 = dht01.readHumidity();
    float t02 = dht02.readTemperature();
    float u02 = dht02.readHumidity();
    float t03 = dht03.readTemperature();
    float u03 = dht03.readHumidity();

    File myFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);

    if (isnan(t01) || isnan(u01) || isnan(t02) || isnan(u02) || isnan(t03) || isnan(u03) &&
myFile) {
myFile.println("Leitura nos sensores falhou. Verifique se o arduino está ligado e se o
cartão SD está conectado");
    }
    else {
        myFile.print(rtc.getDateStr());
        myFile.print("\t");
        myFile.print(rtc.getTimeStr());
        myFile.print("\t");

        myFile.print(t01);
        myFile.print(" \t");
        myFile.print(t02);
        myFile.print("\t");
        myFile.print(t03);
        myFile.print("\t");

        myFile.print(u01);
        myFile.print(" \t");
        myFile.print(u02);
        myFile.print("\t");
        myFile.print(u03);
        myFile.println(" ");

        delay (60000);
        myFile.close();
    }
}

```

APÊNDICE C - ANÁLISE GRÁFICA DAS DAS MEDIÇÕES DIÁRIAS

TESTE 1 – TERRAÇO DO PRÉDIO DO INPE/UFSM

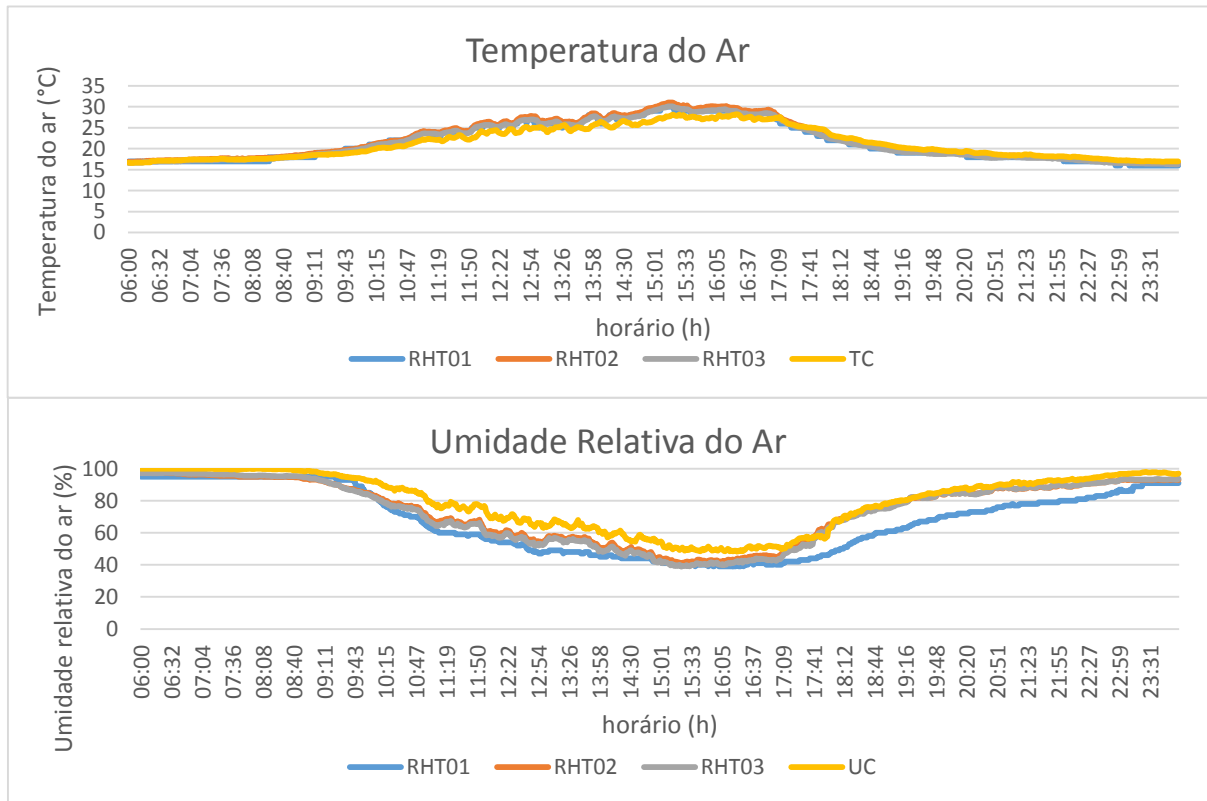


Figura 1 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 24/04/2015.
Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

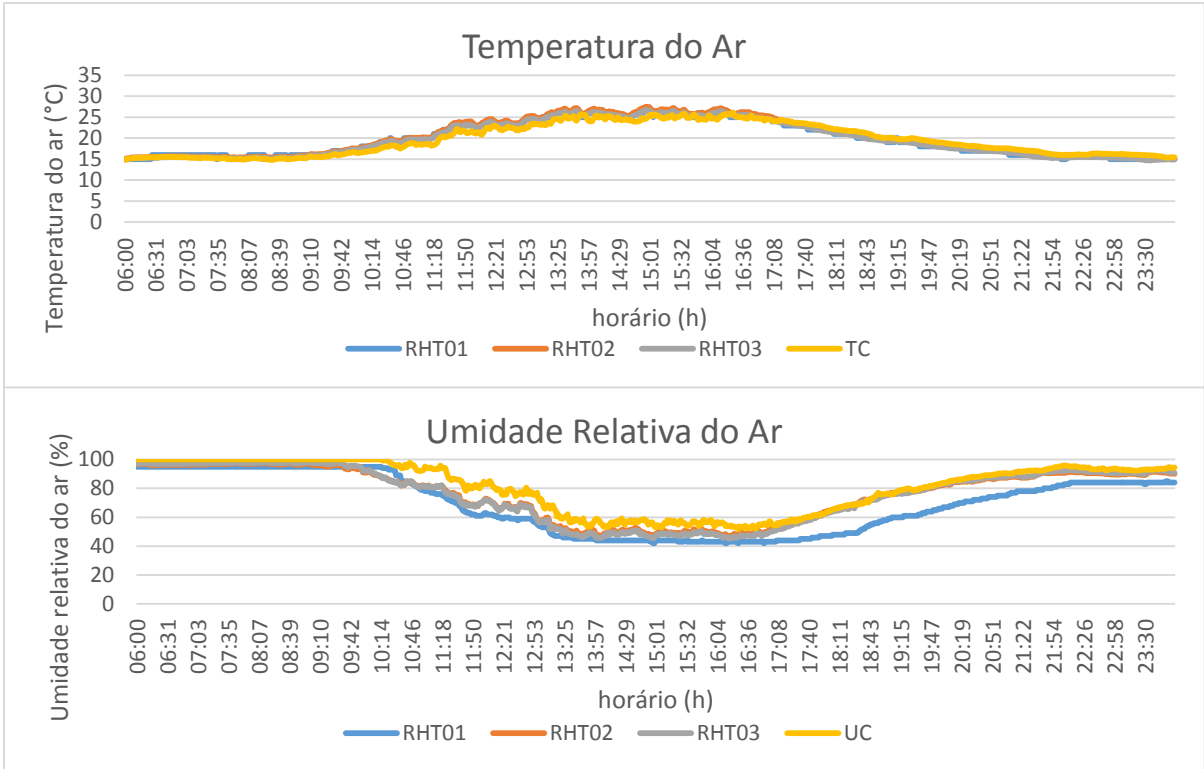


Figura 2 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 25/04/2015.
Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

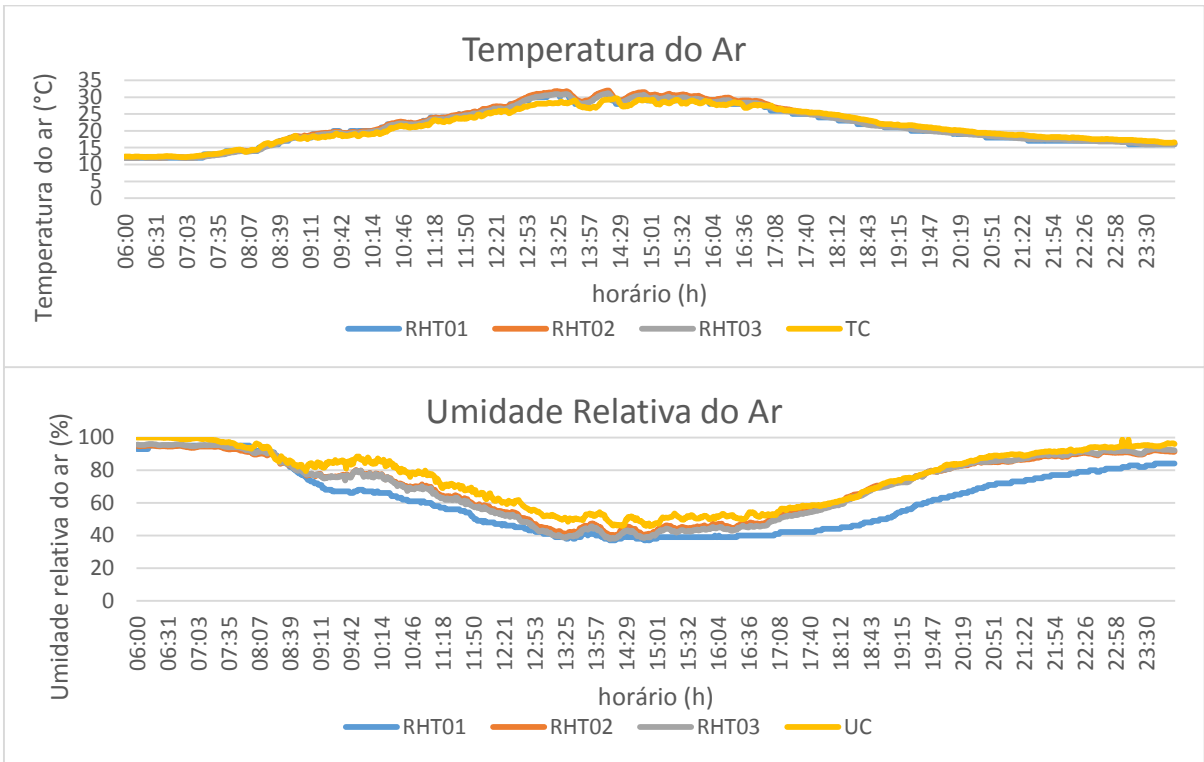


Figura 3 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 26/04/2015.
Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

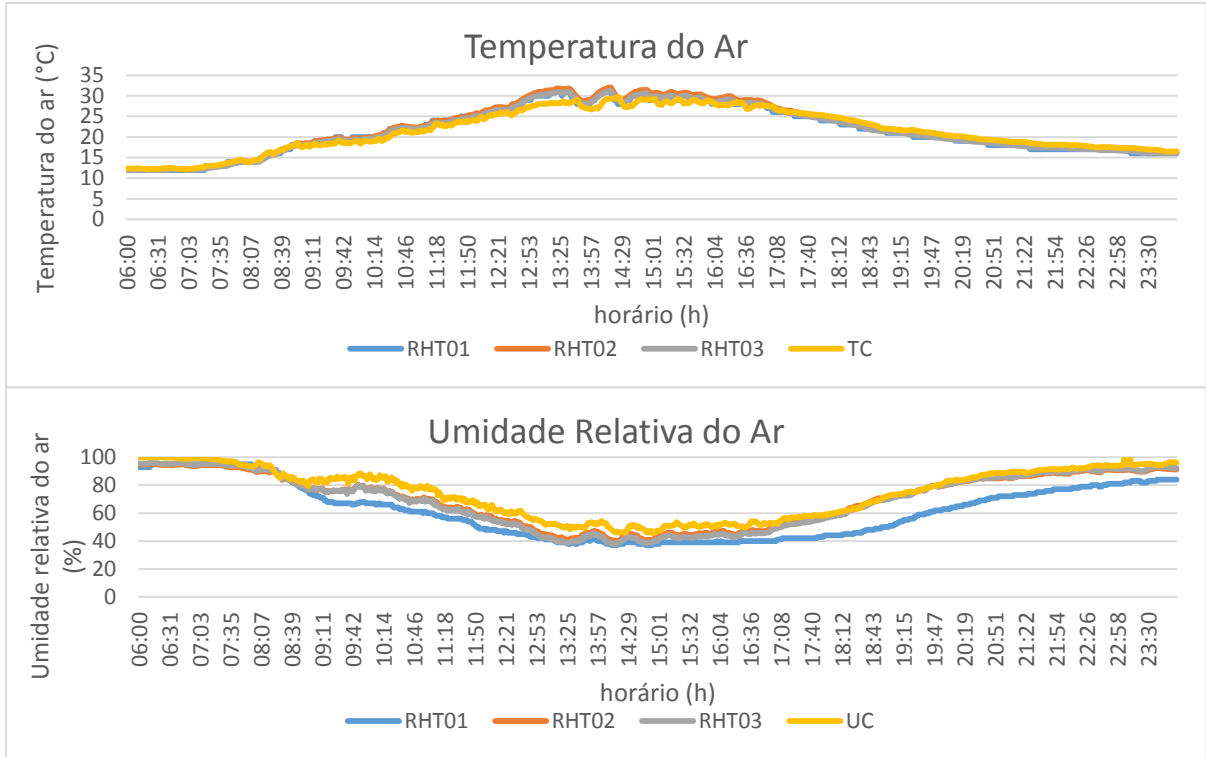


Figura 4 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 27/04/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

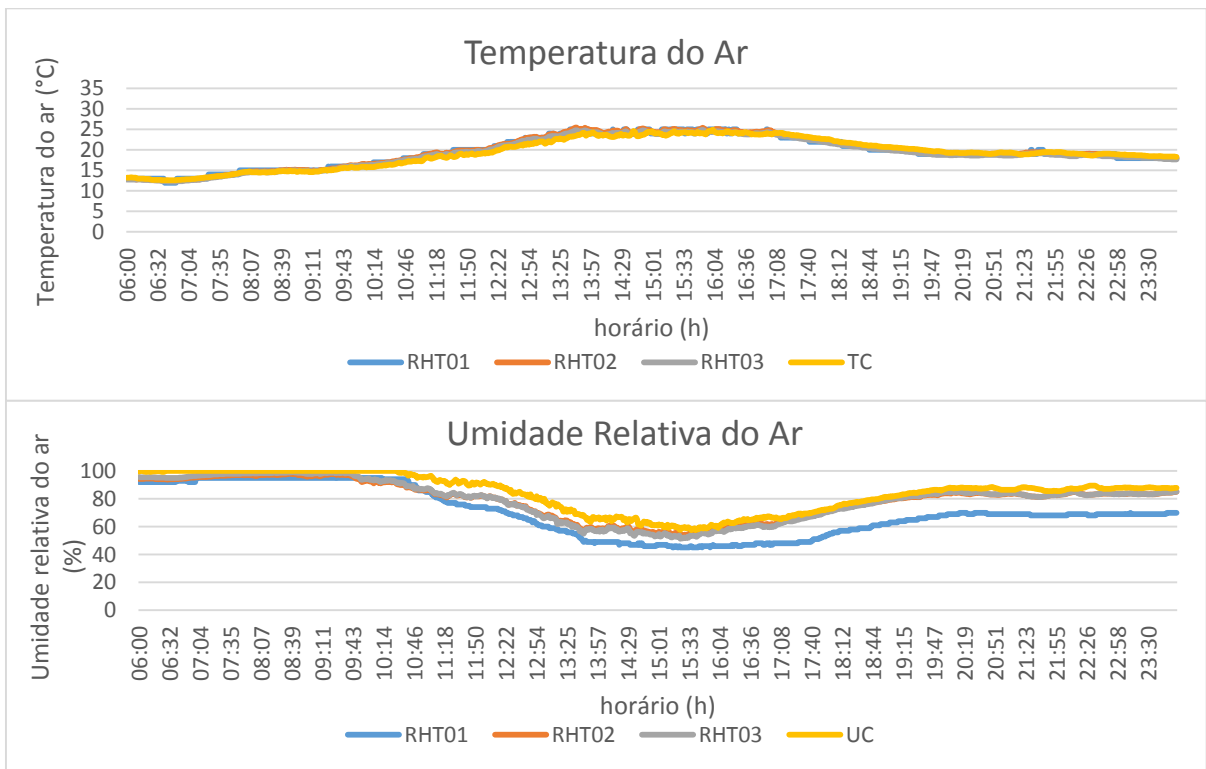


Figura 5 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 28/04/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

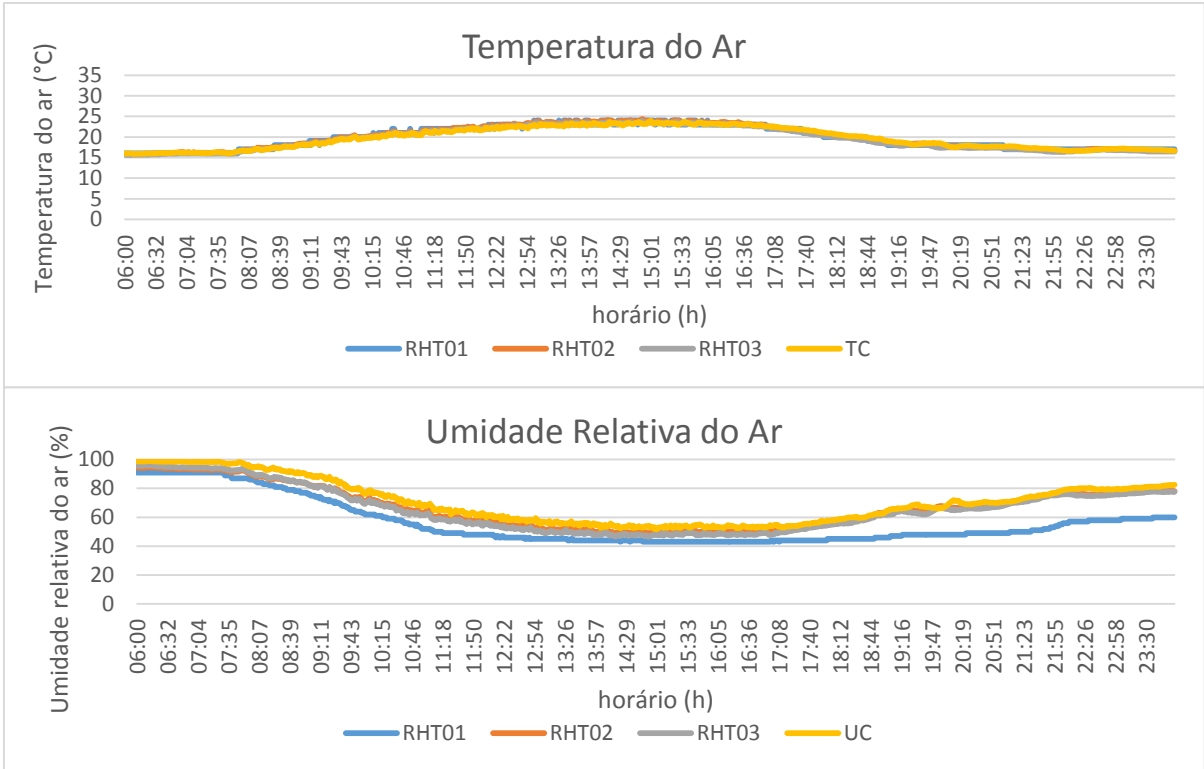


Figura 6 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 29/04/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

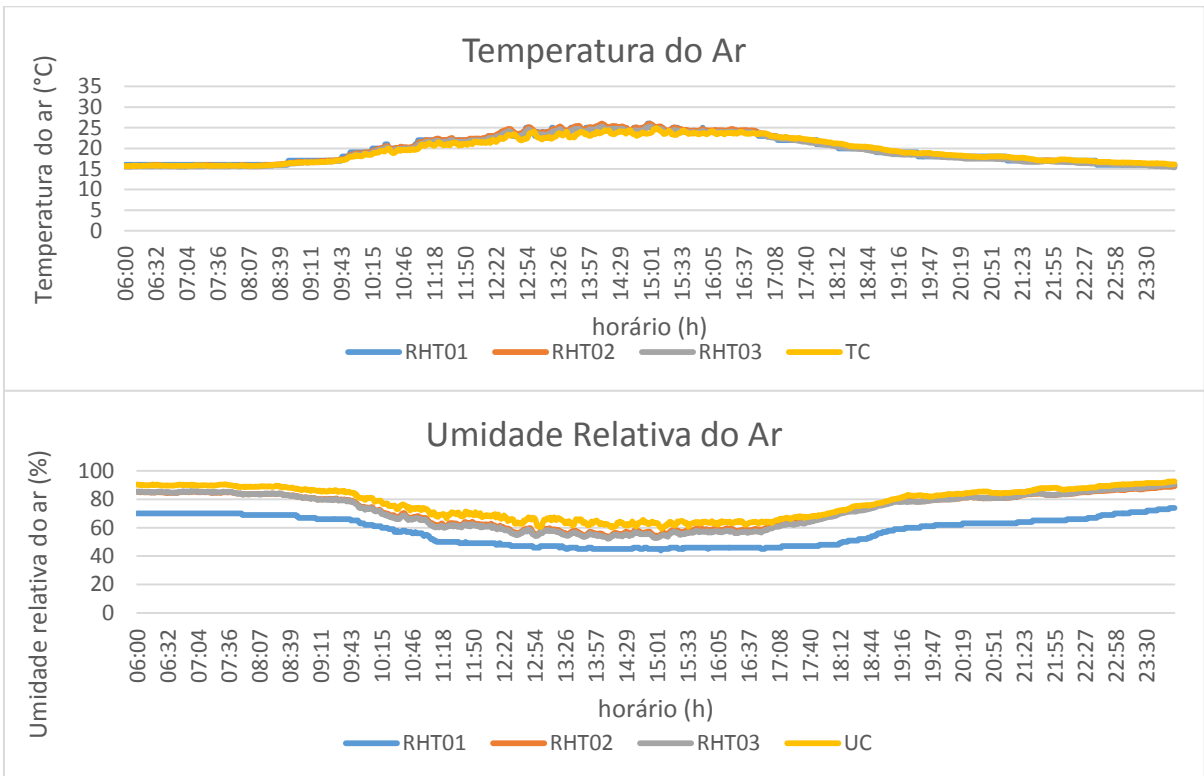


Figura 7 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 30/04/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

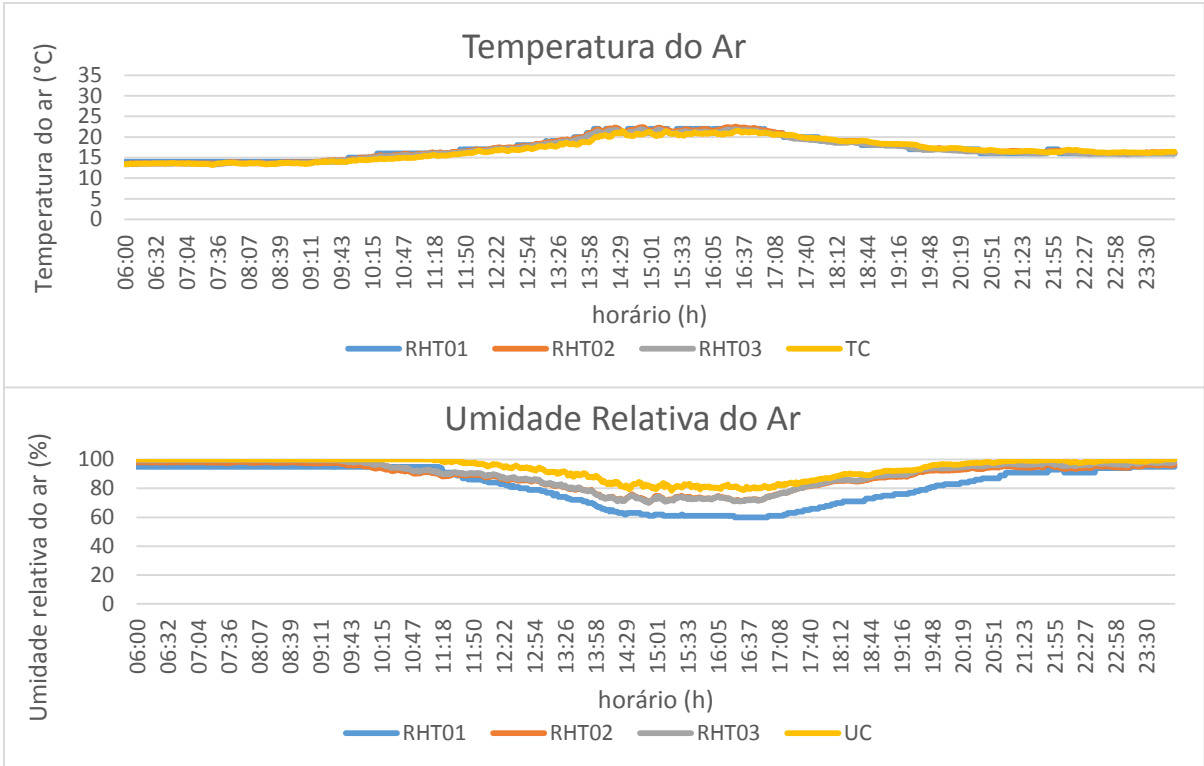


Figura 8 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 01/05/2015. Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

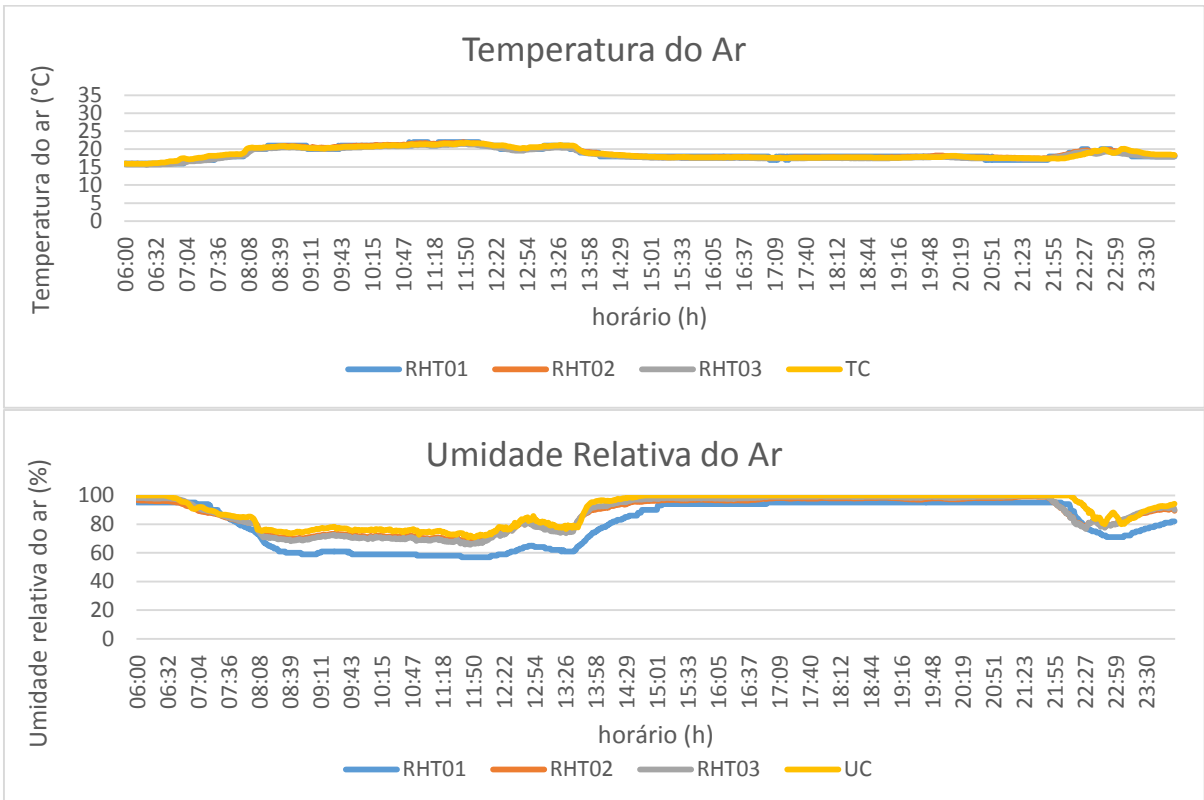


Figura 9 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 02/05/2015. Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

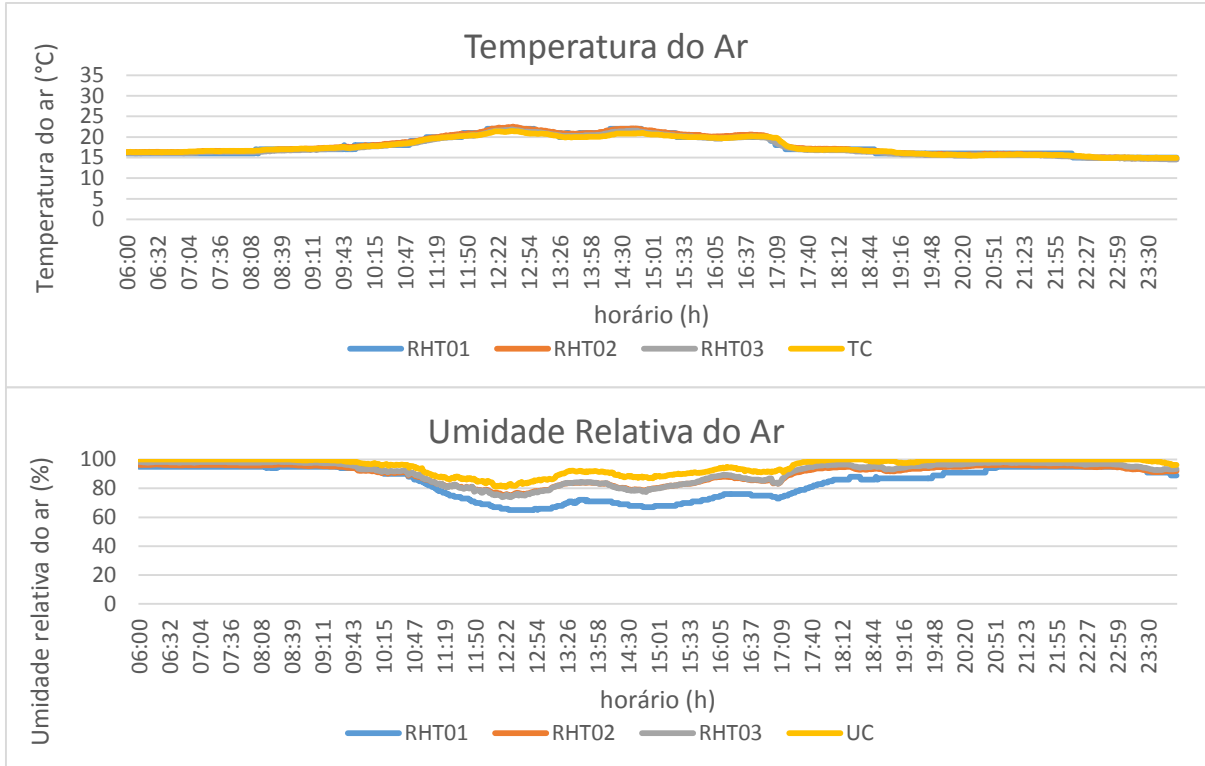


Figura 10 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 03/05/2015.
Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

TESTE 2 – LABORATÓRIO DE MICROMETEOROLOGIA DA UFSM

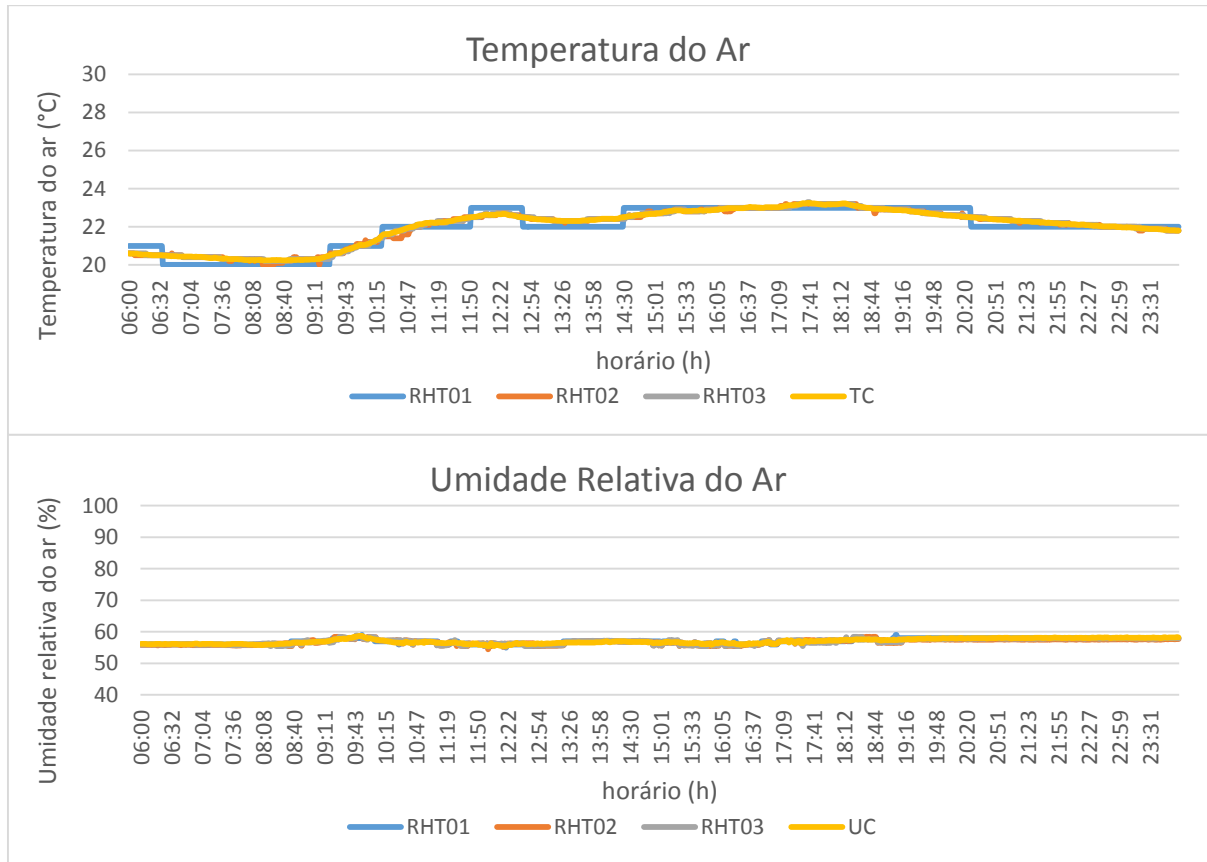


Figura 11 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 06/05/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

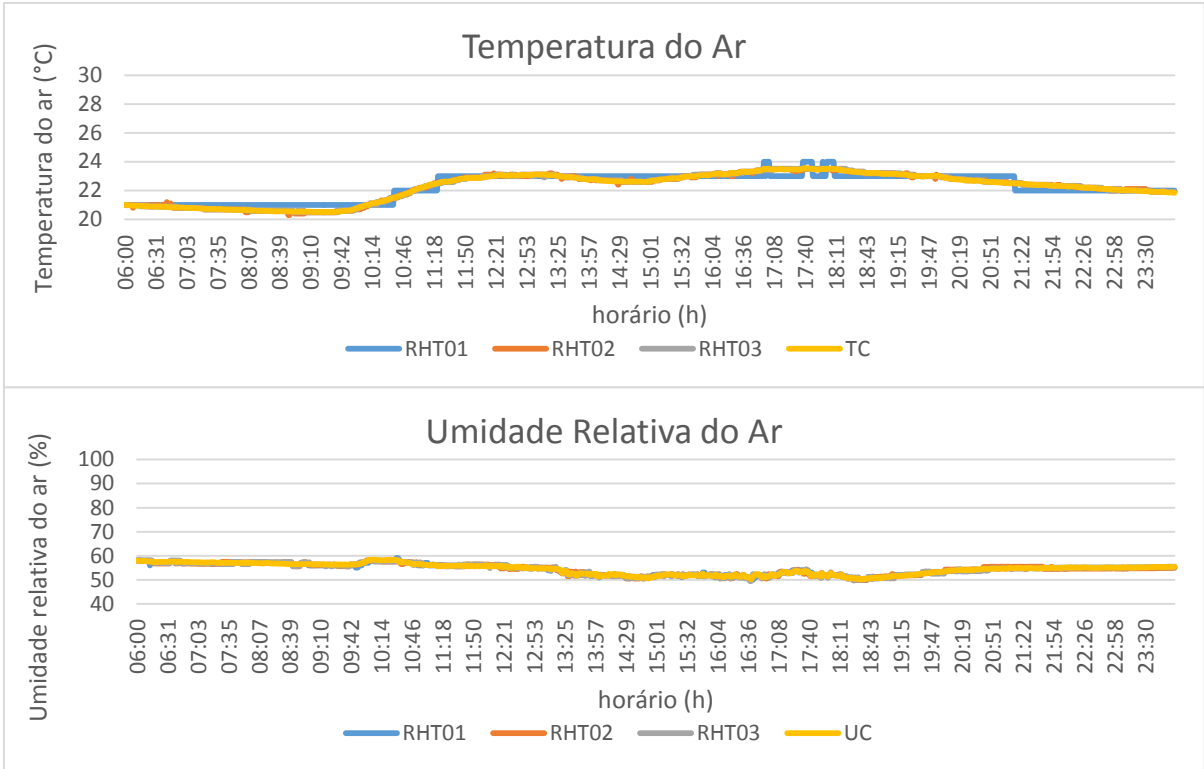


Figura 12 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 07/05/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

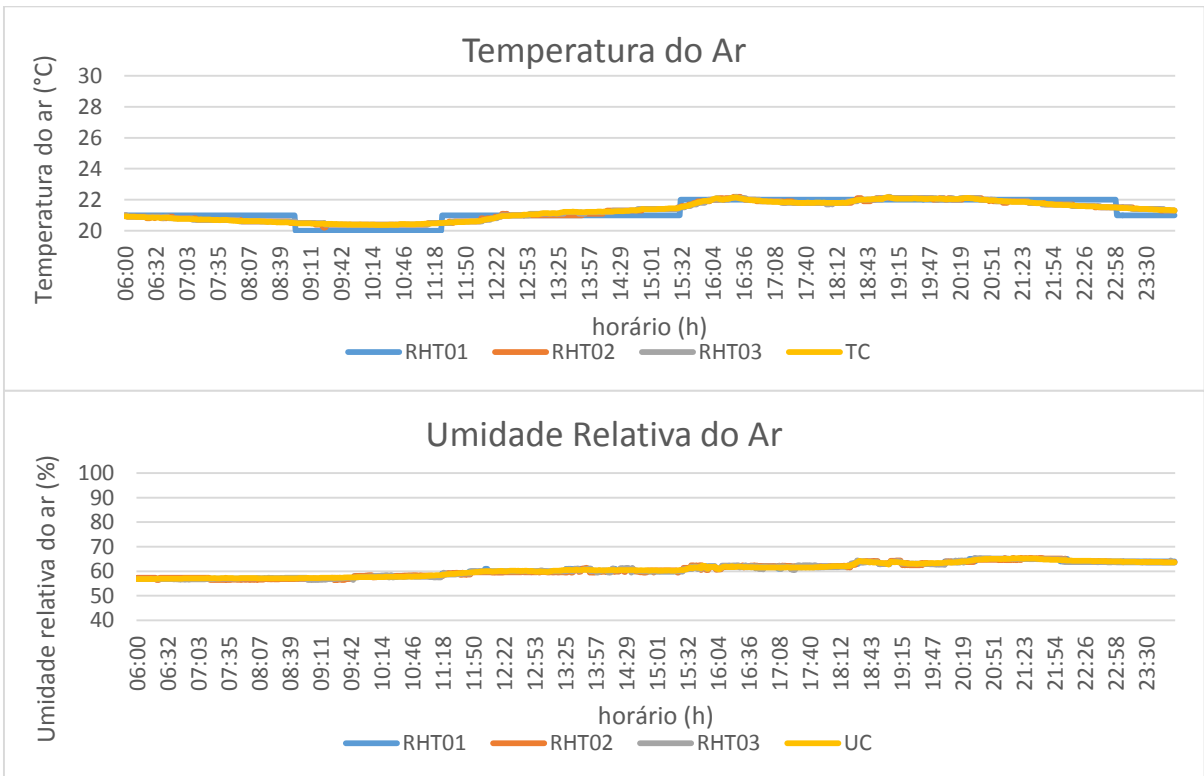


Figura 13 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 08/05/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

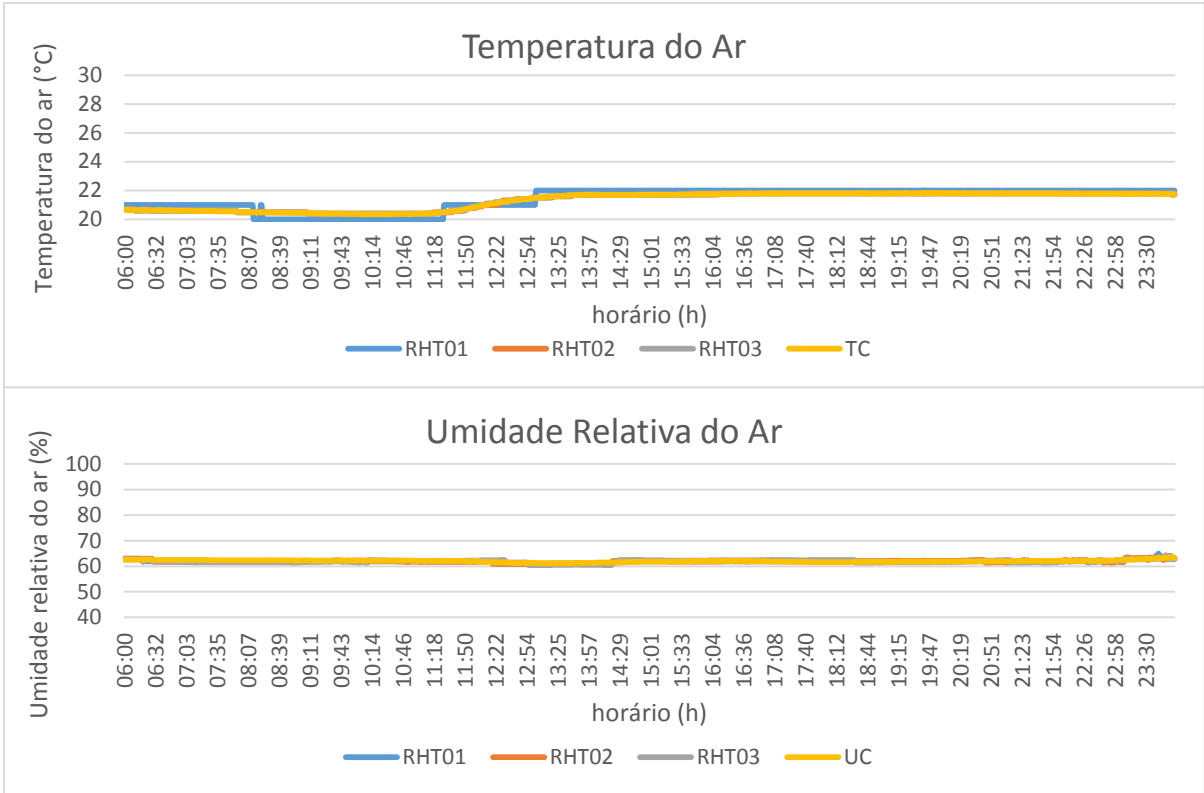


Figura 14 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 09/05/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

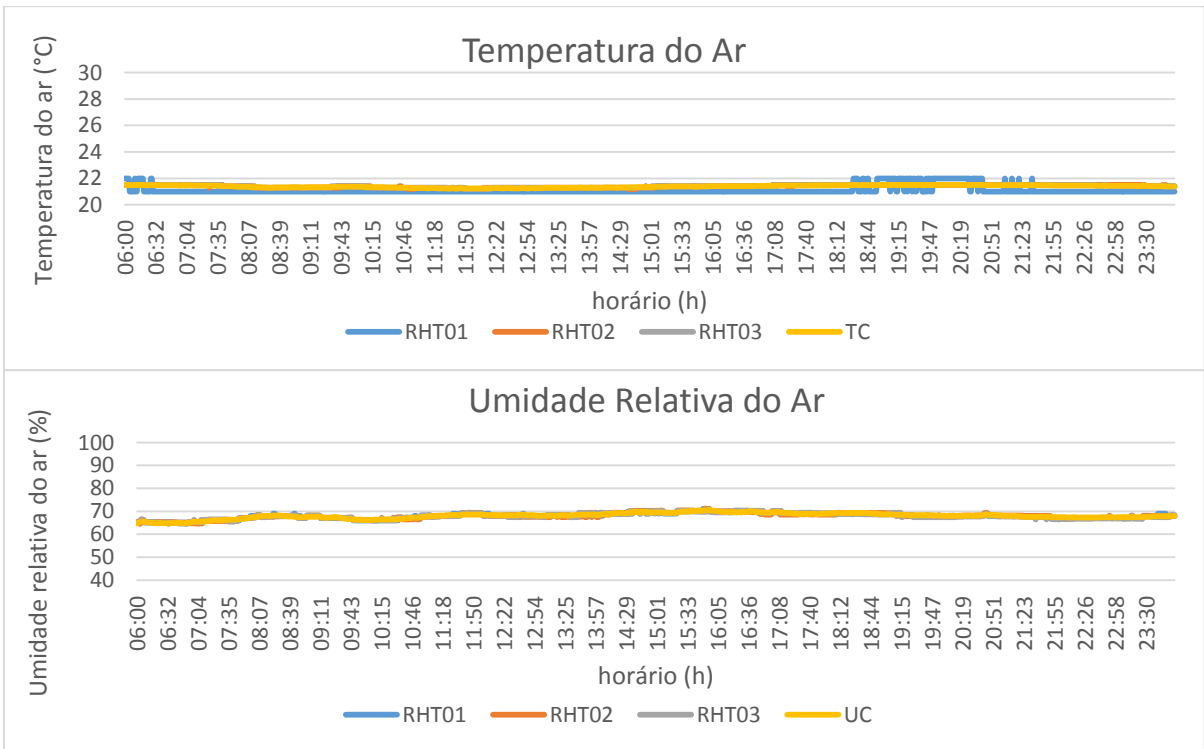


Figura 15 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 10/05/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

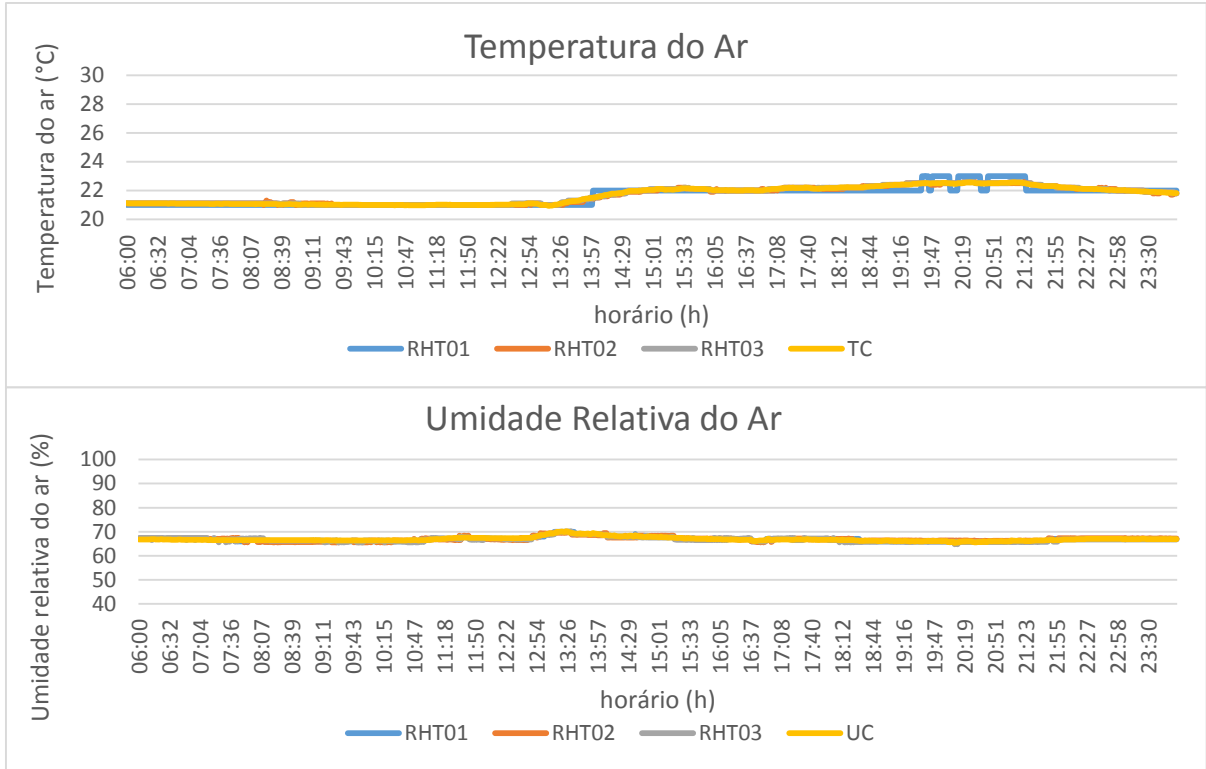


Figura 16 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 11/05/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

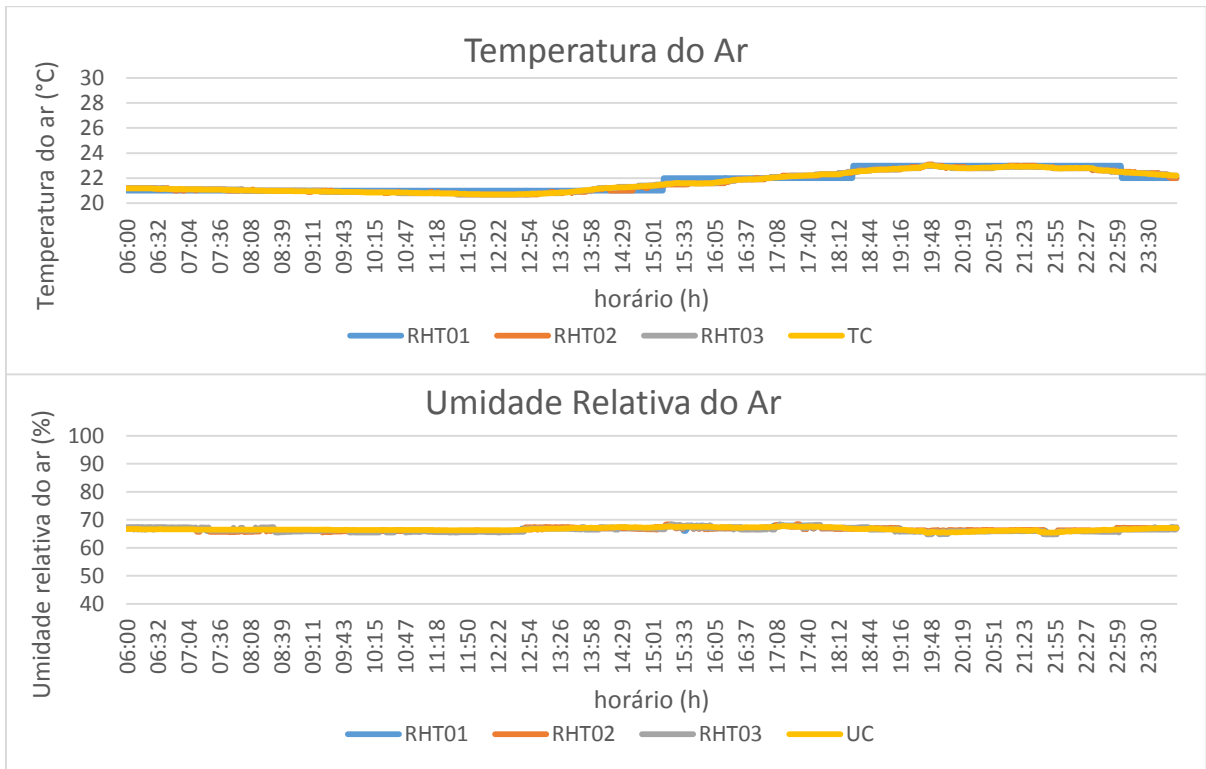


Figura 17 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 12/05/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

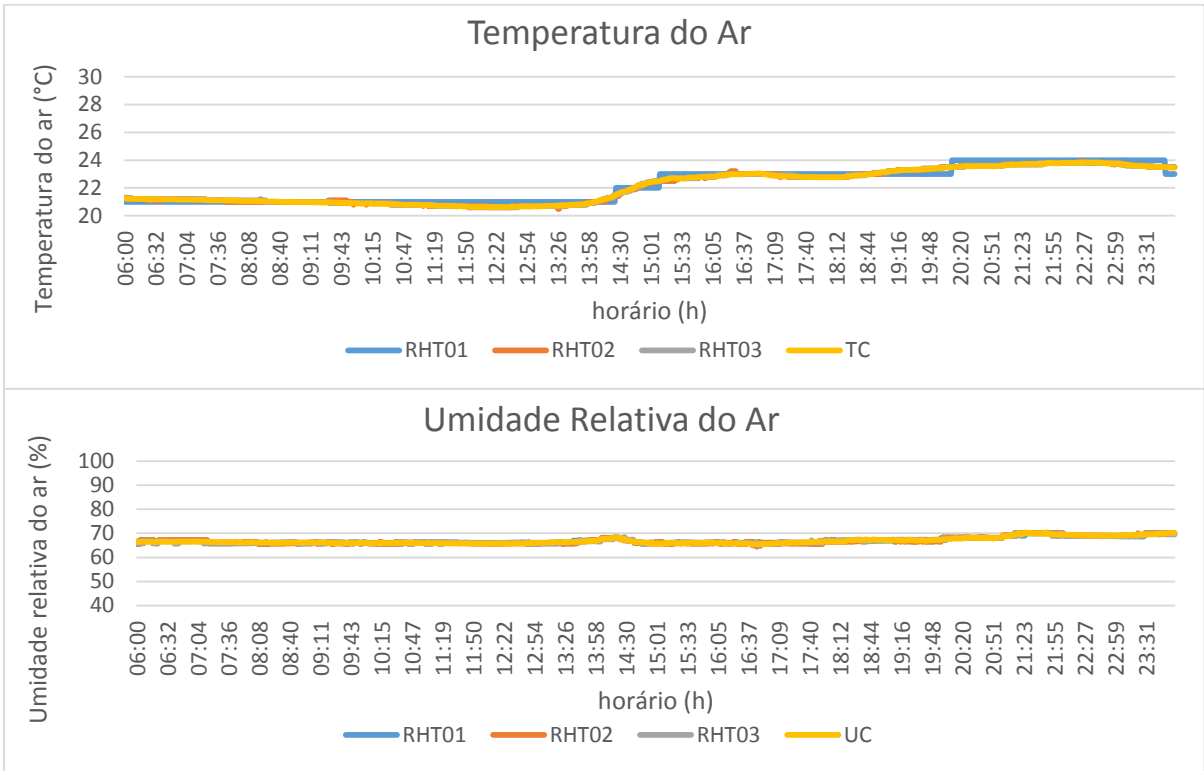


Figura 18 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 13/05/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

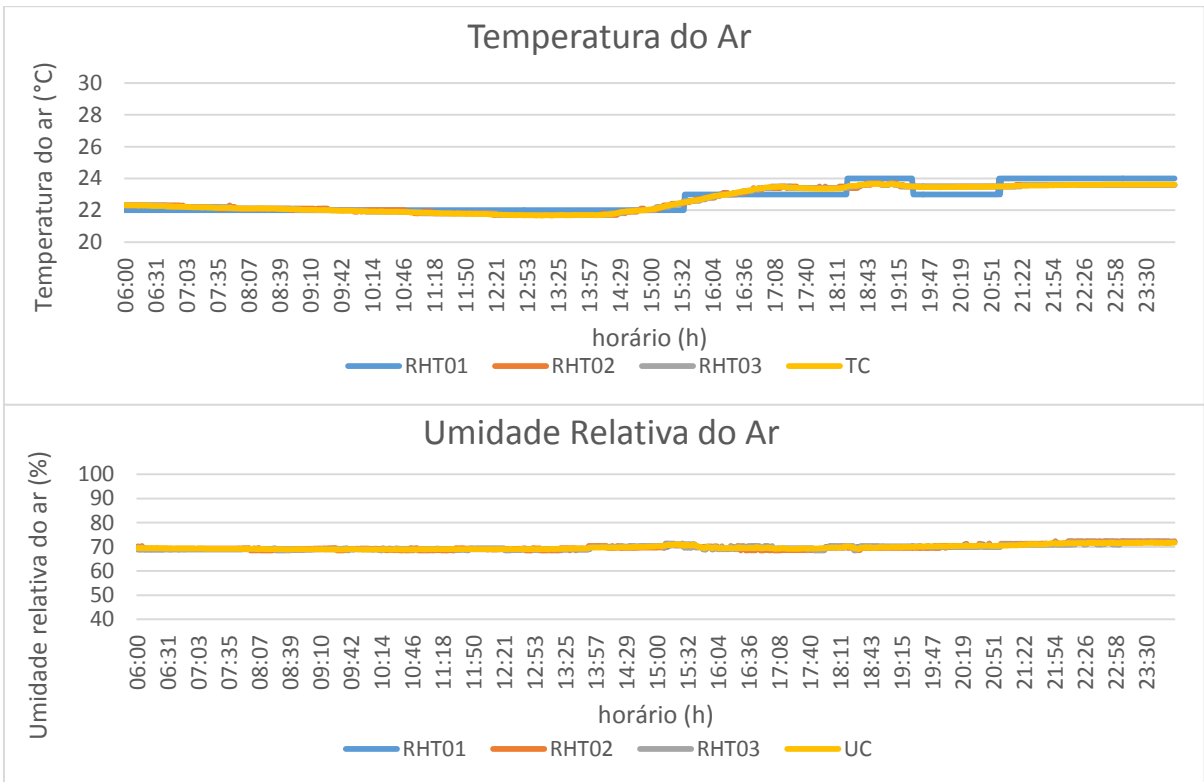


Figura 19 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 14/05/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

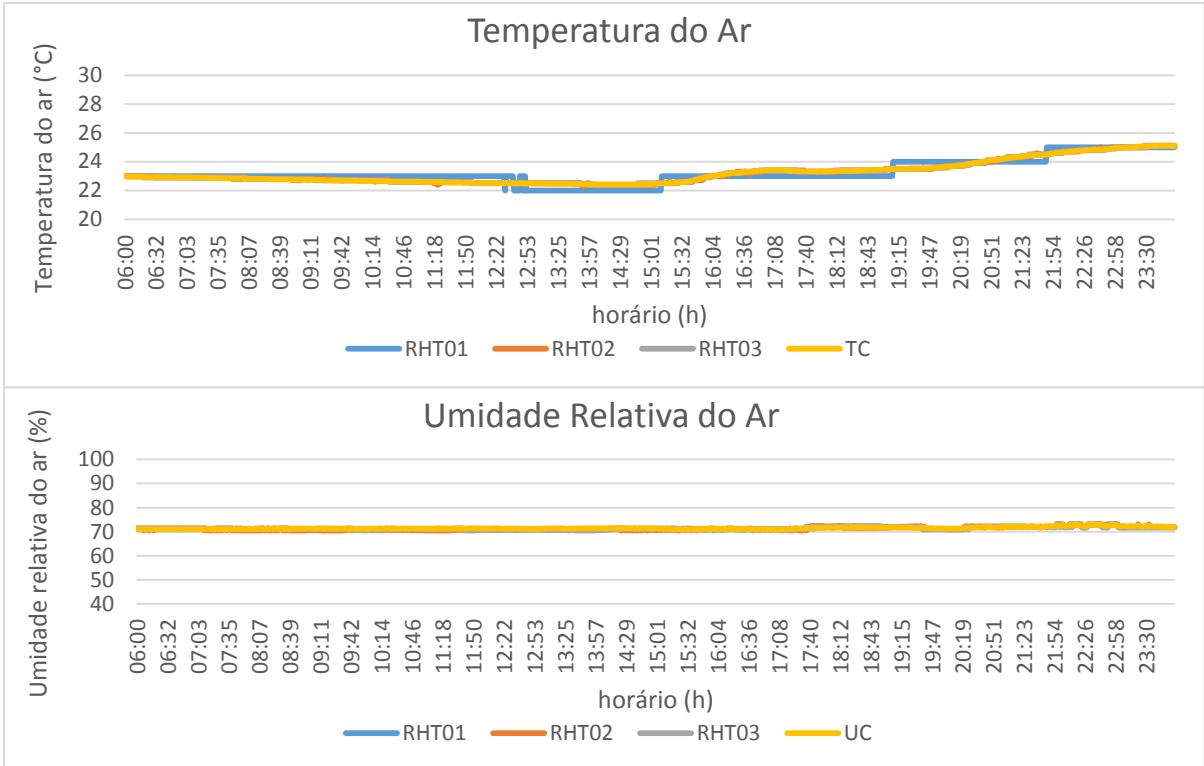


Figura 20 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 15/05/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

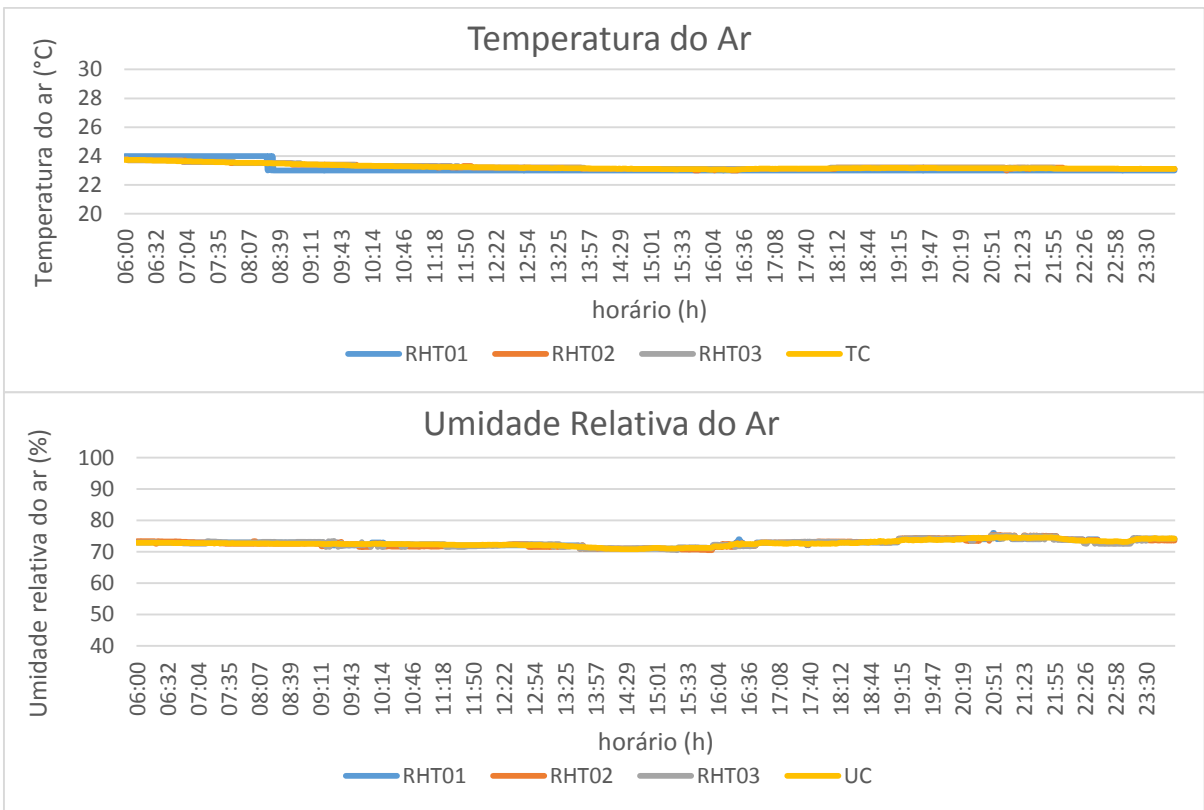


Figura 21 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 16/05/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

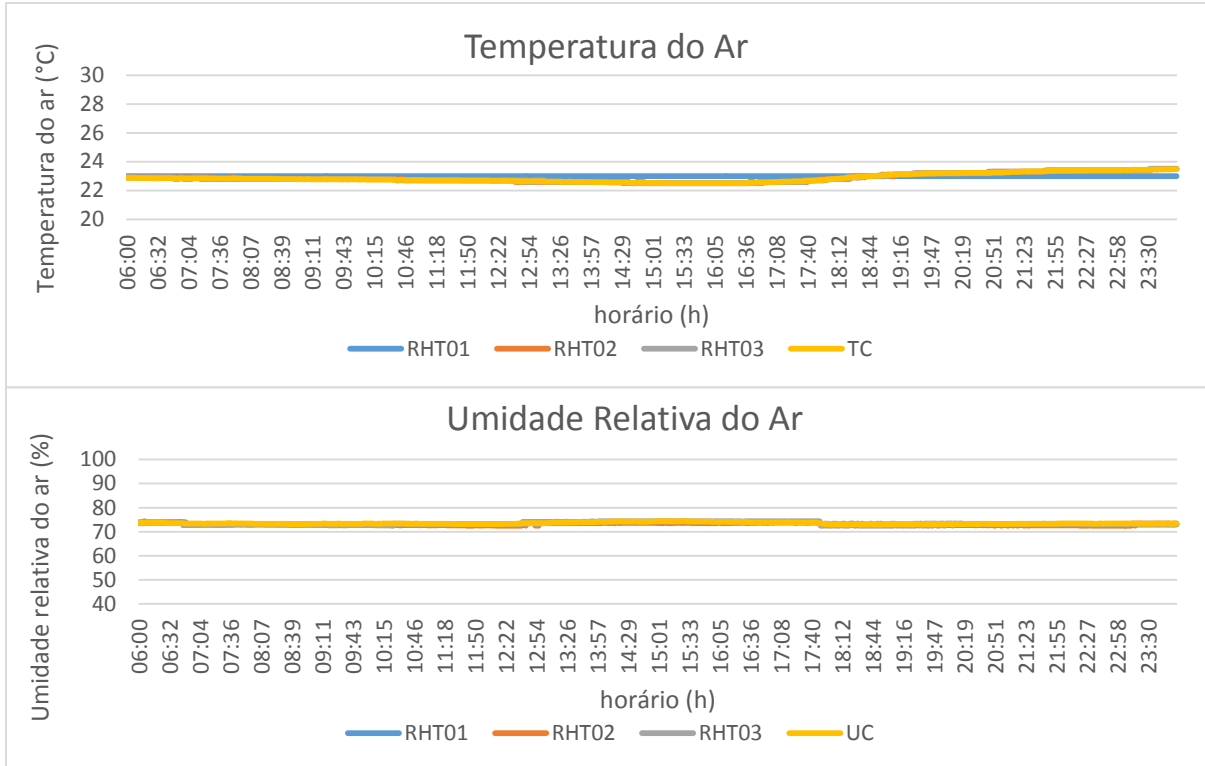


Figura 22 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 17/05/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

TESTE 3 - PAMPA

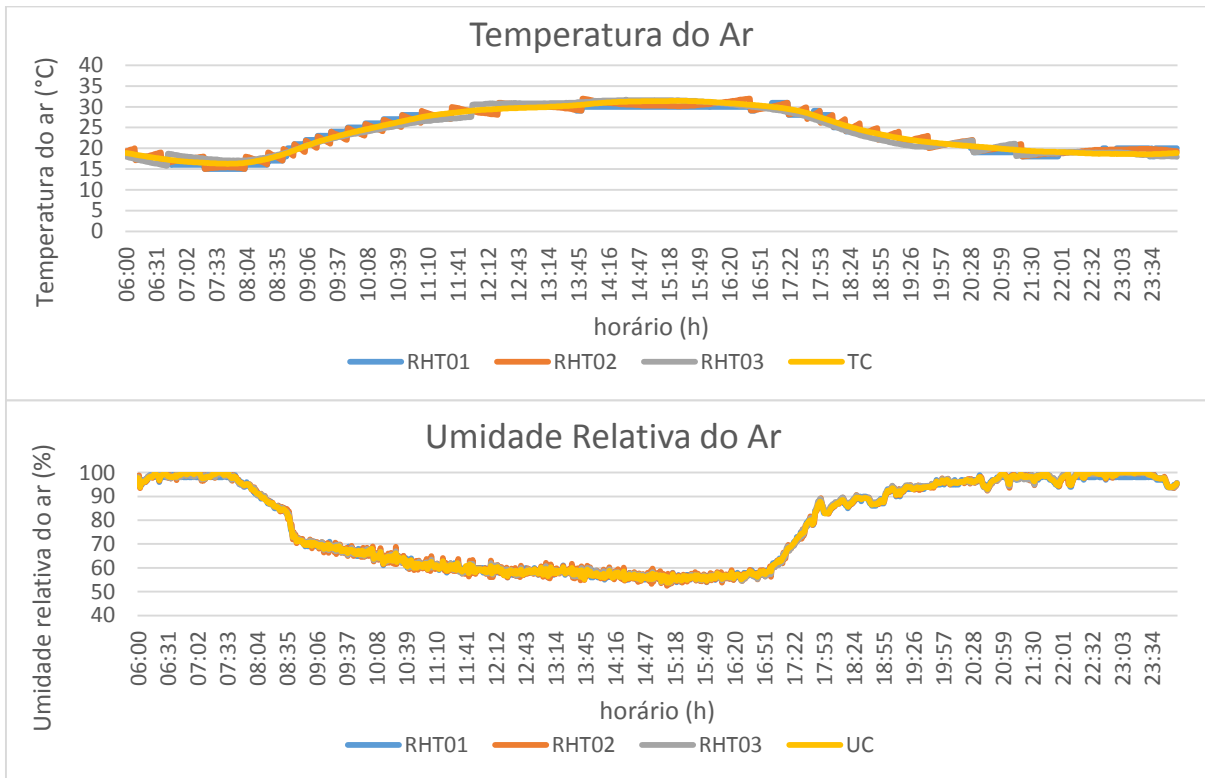


Figura 23 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 22/05/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

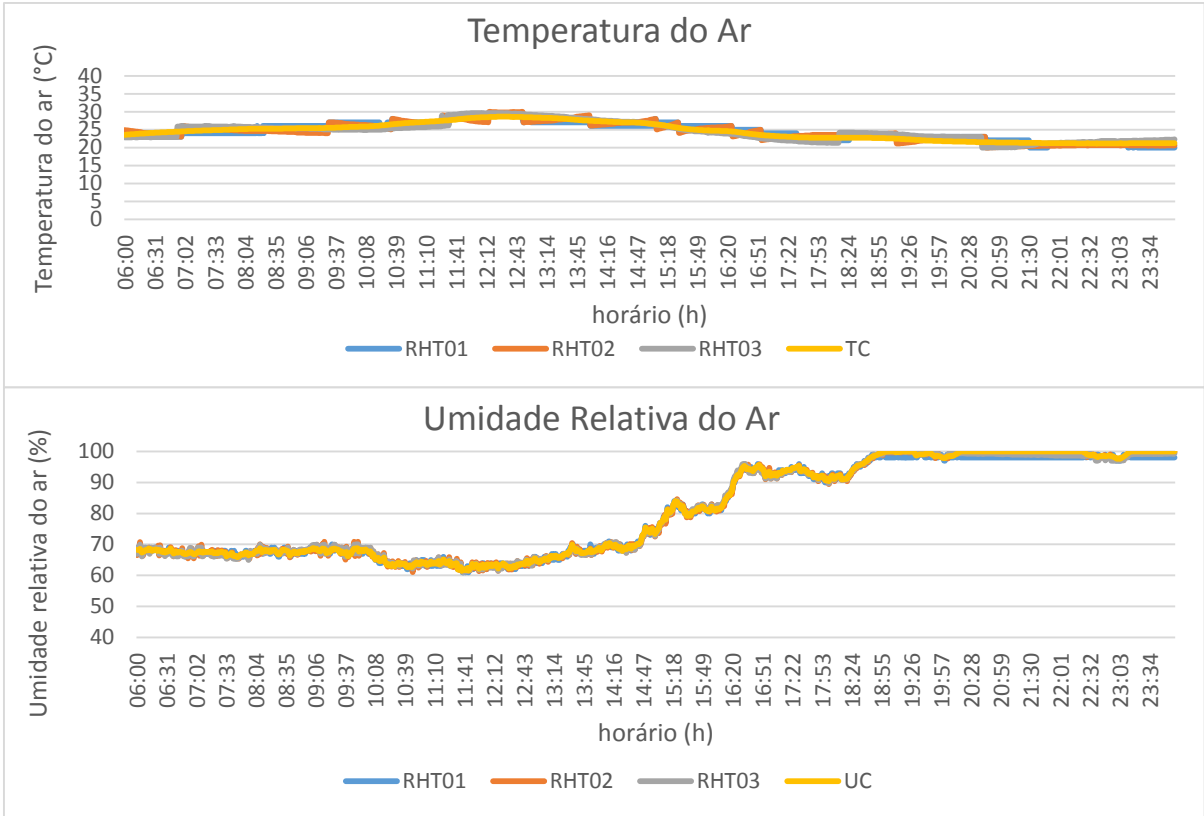


Figura 24 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 23/05/2015. Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

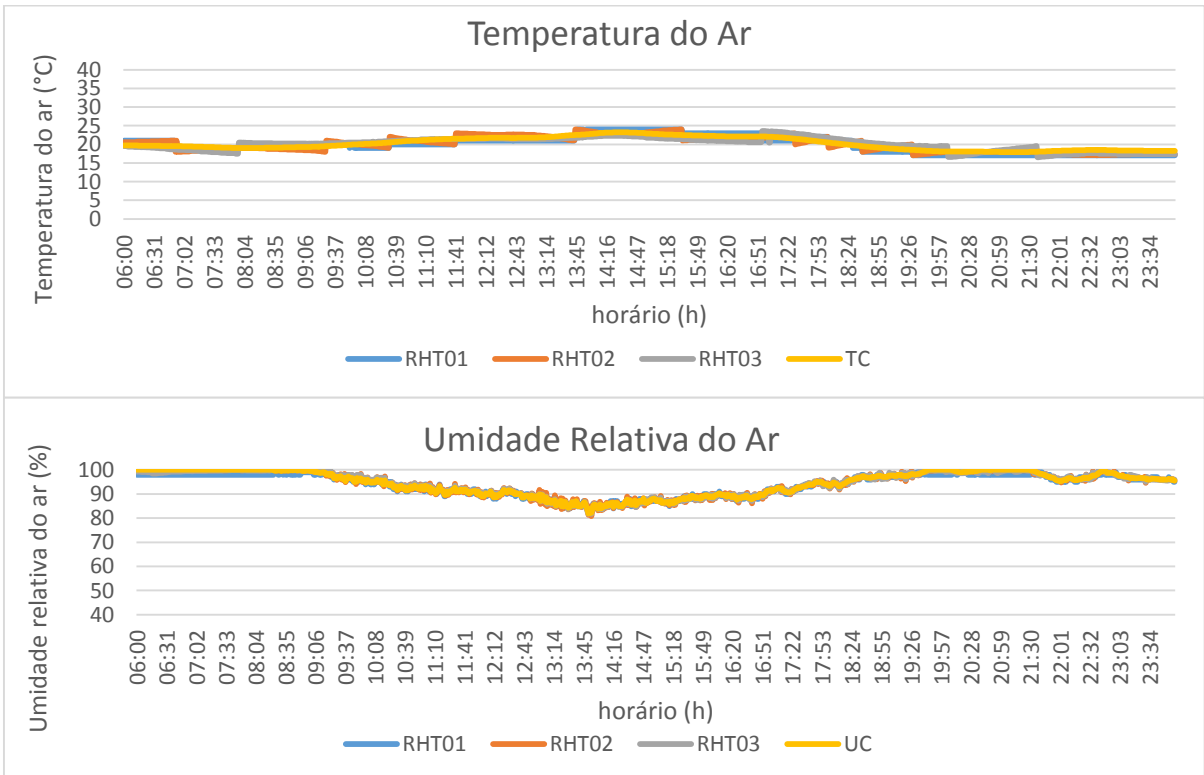


Figura 25 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 24/05/2015. Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

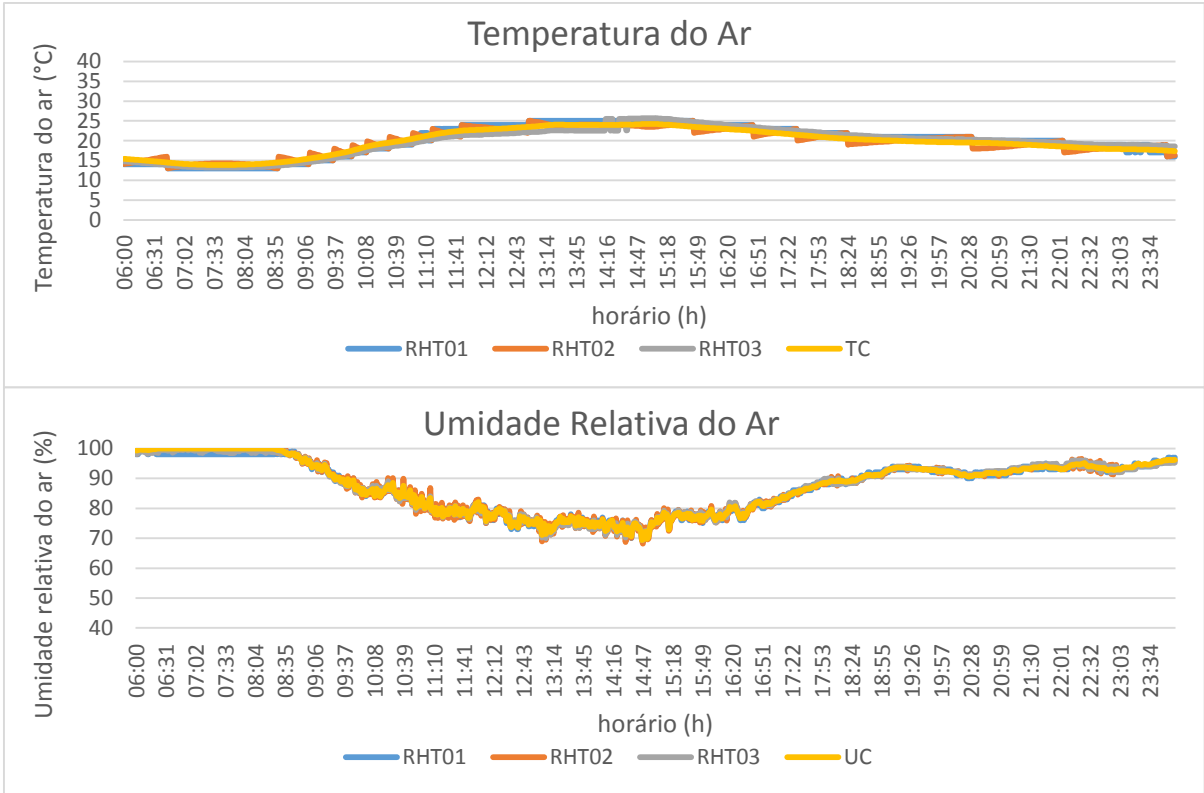


Figura 26 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 25/05/2015.
Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

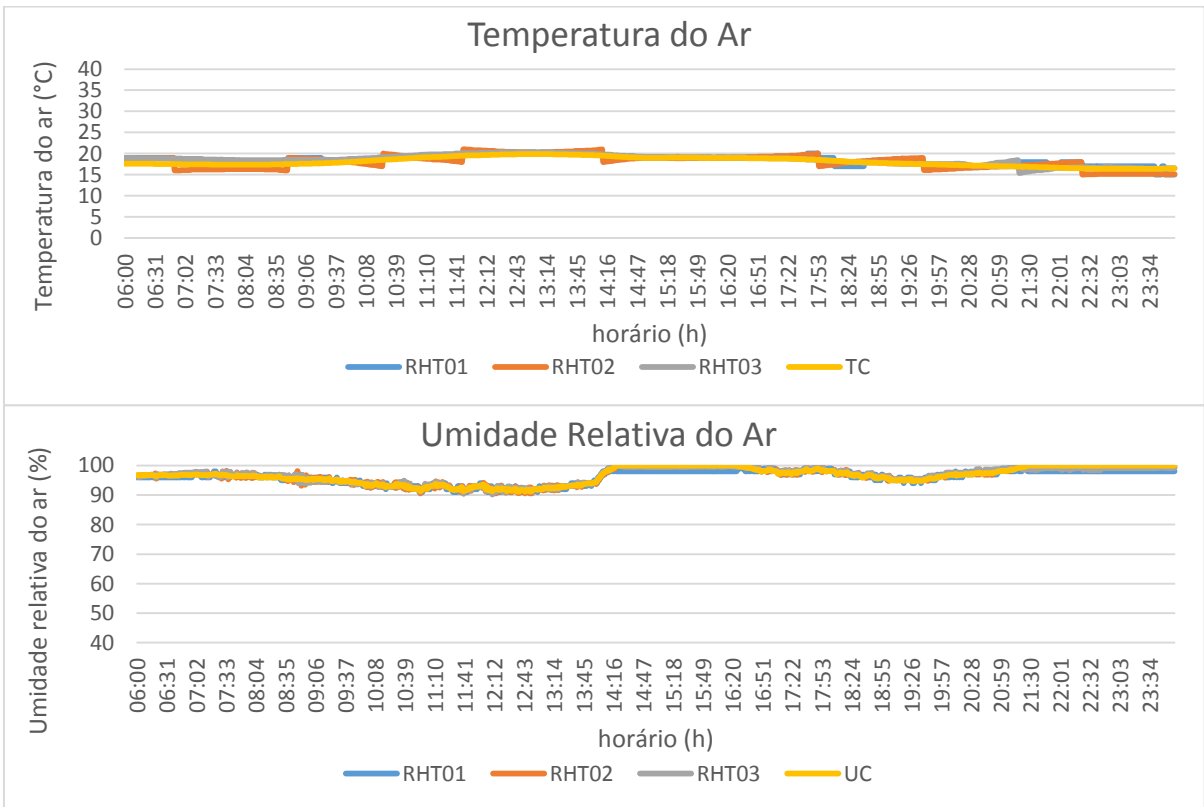


Figura 27 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 26/05/2015.
Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

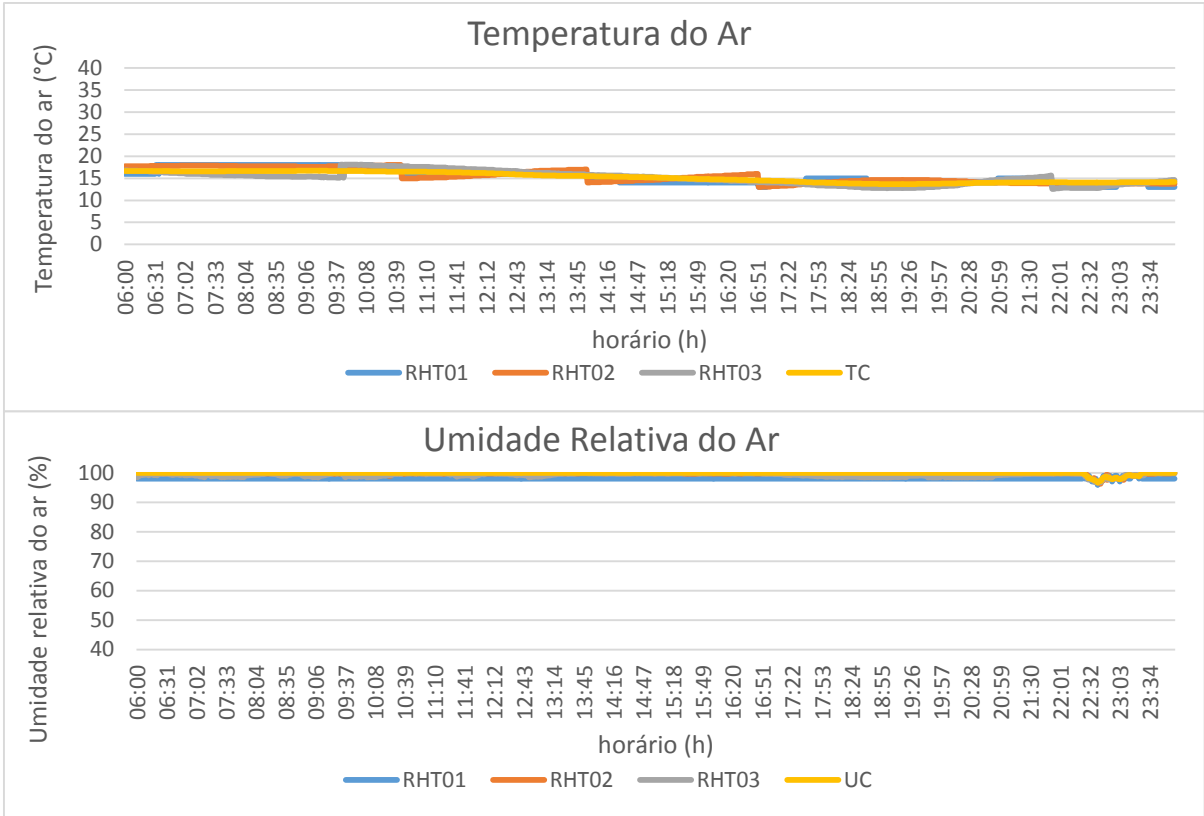


Figura 28 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 27/05/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

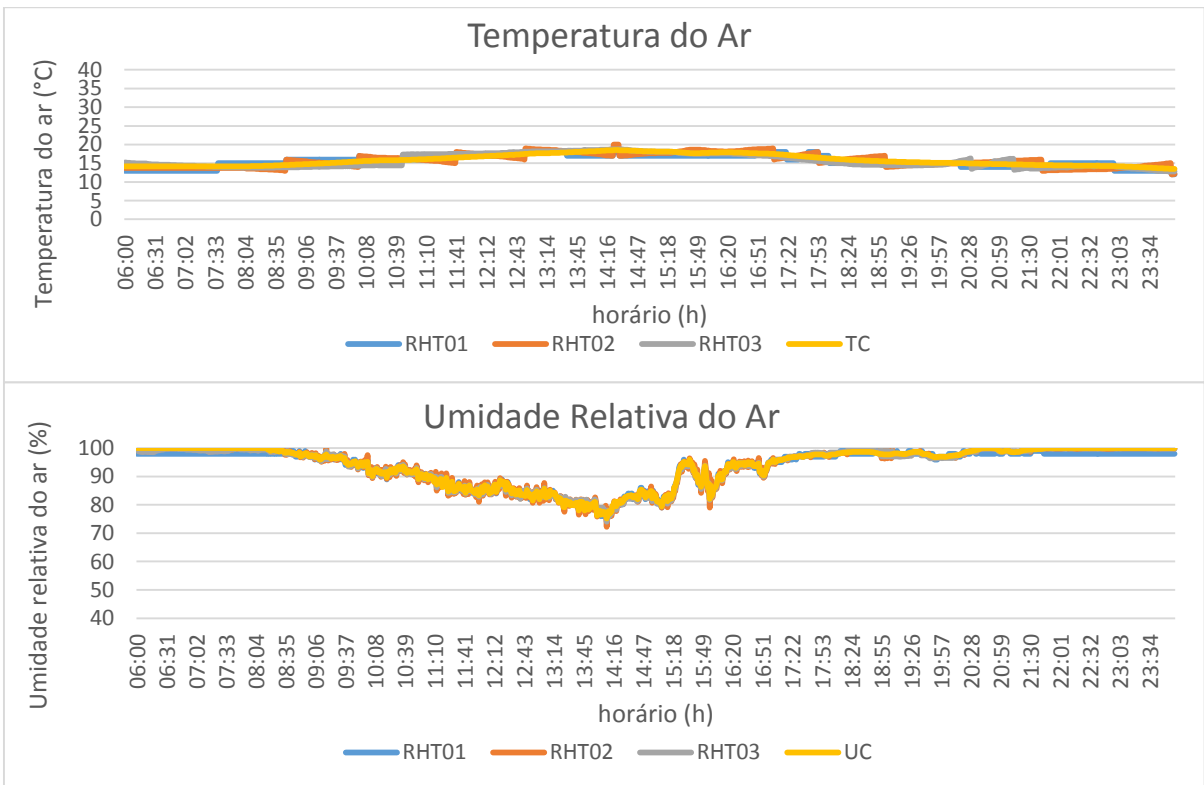


Figura 29 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 28/05/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

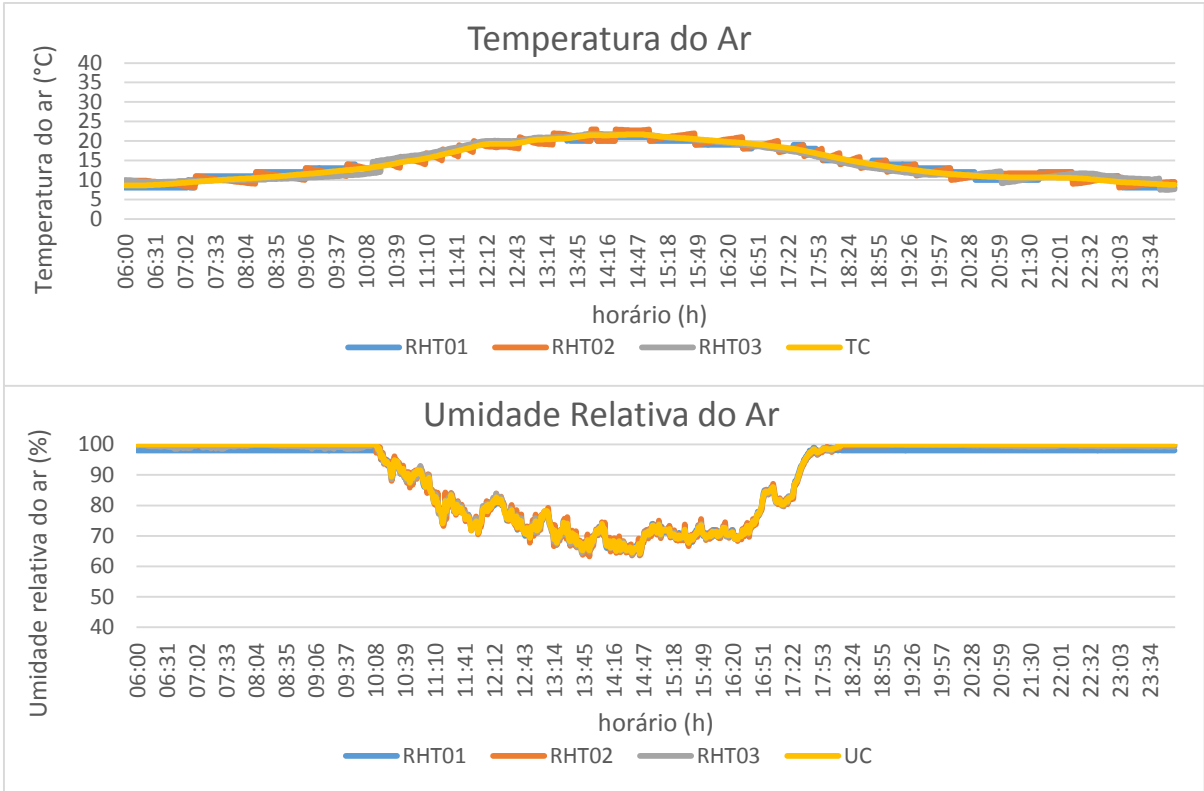


Figura 30 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 29/05/2015.
Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

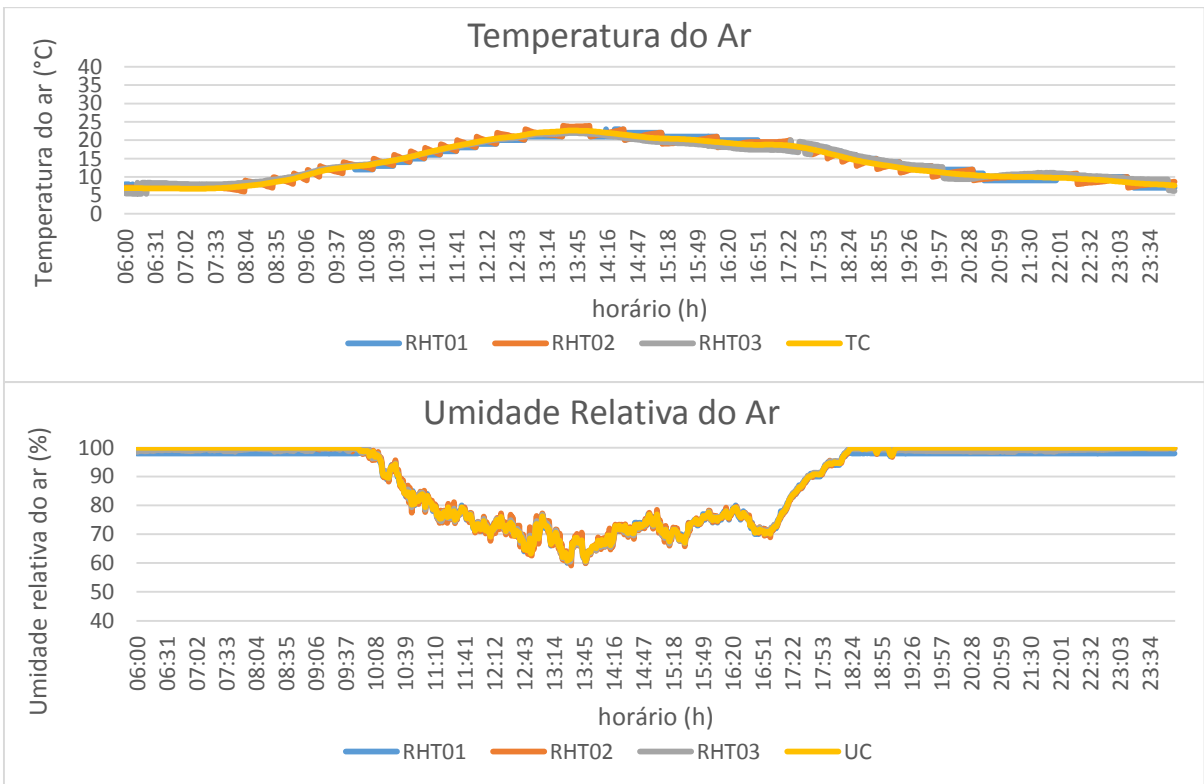


Figura 31 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 30/05/2015.
Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

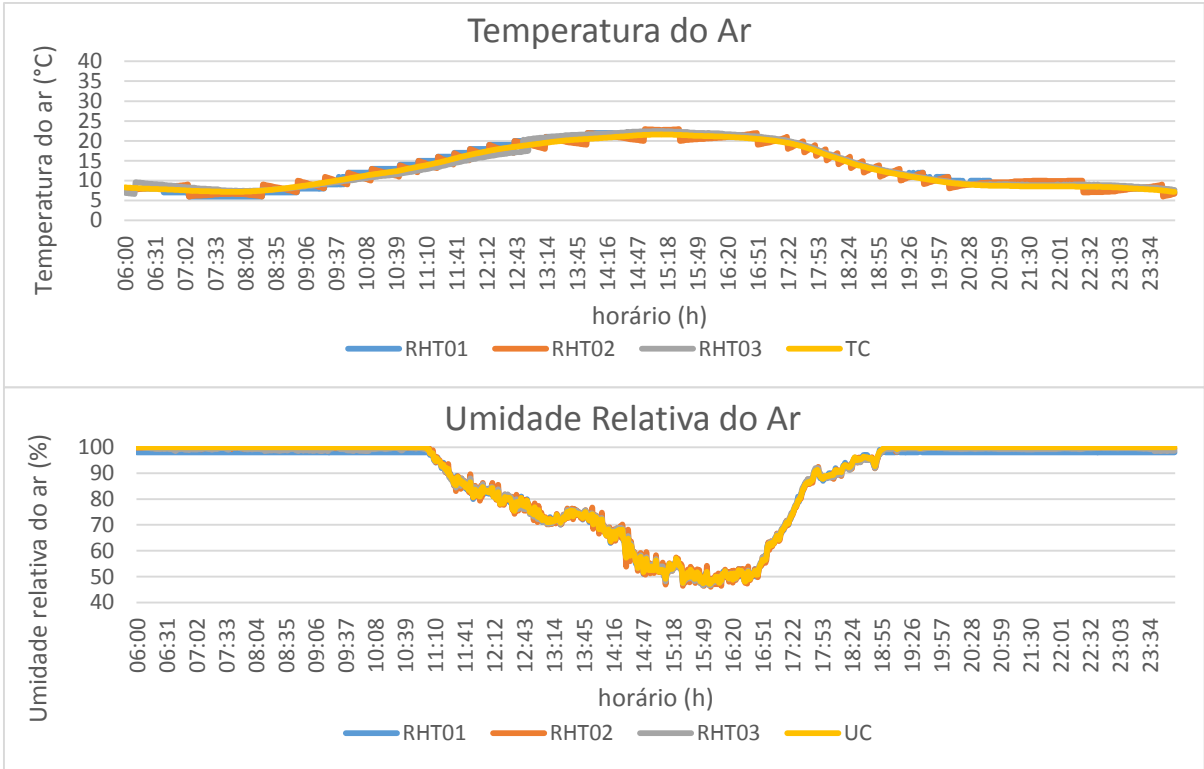


Figura 32 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 31/05/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

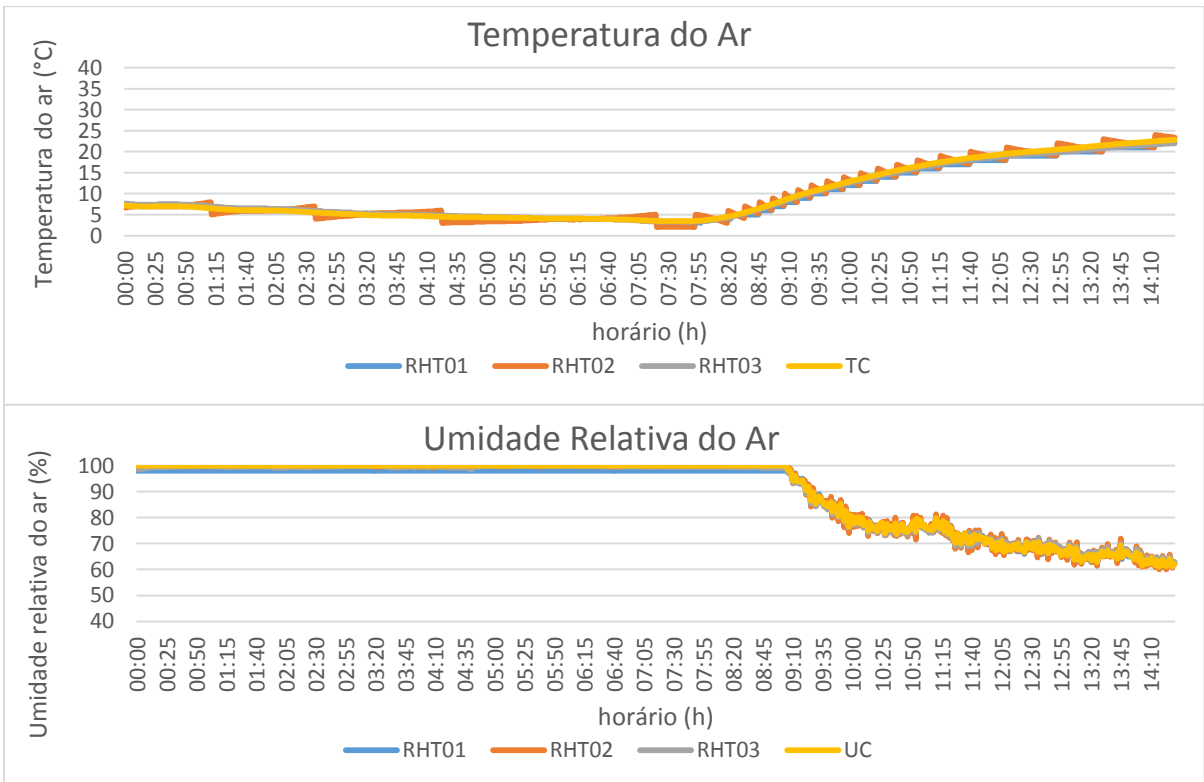


Figura 33 – Comportamento diário de temperatura e umidade relativa do ar – Dia 01/06/2015.
 Fonte: Rêgo, M. de S., 2015.

REFERÊNCIAS

- AGUDO, J. E. et al. A Low-Cost Real Color Picker Based on Arduino. **Sensors - Section Physical Sensors**. doi:10.3390/s140711943, jul. 2014. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/14/7/11943>>. Acesso em: 28 out. 2015.
- AMORIM, D. M. et al. Comparação de Dados Obtidos a partir de Sensores de Temperatura e Umidade Relativa do Ar Protegidos em um Abrigo Meteorológico de PVC. **Energia na Agricultura**. v. 30, n. 2, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2015v30n2p119-124>>. Acesso em: 28 out. 2015.
- ANZALONE, G. C.; GLOVER, A. G.; PEARCE, J. M. Open-Source Colorimeter. **Sensors**. doi:10.3390/s130405338, abr. 2013. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/13/4/5338>>. Acesso em: 26 out. 2015.
- ARDUINO. **Introduction**. Disponível em: <<http://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 21 jul. 2014a.
- ARDUINO. **Arduino Board Uno**. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>>. Acesso em: 22 jul. 2014b.
- ARDUINO. **Sd Card Shield**. Disponível em: <<http://forum.arduino.cc/index.php?topic=205586.0>>. Acesso em: 15 out. mai. 2014c.
- ARDUINO. **DS1302 Real Time Clock**. Disponível em: <<http://playground.arduino.cc/Main/DS1302>>. Acesso em: 10 out. 2014d.
- ARIMA, K. S. A.; PEREIRA, R. B. O.; PEREIRA, M. F. L. Sistema de Automação de Baixo Custo para Irrigação: estudo de caso em uma Horta Caseira Natural. **Anais da Escola Regional de Informática da Sociedade Brasileira de Computação (SBC) – Regional de Mato Grosso**, [S.l.], v. 6, p. 217-219, nov. 2015. ISSN 2447-5386. Disponível em: <<http://anaiserimt.ic.ufmt.br/index.php/erimt/article/view/10>>. Acesso em: 25 dez. 2015.
- AYOOLA, I; CHEN, W; FEIJS, L. Camera on Vessel: A Camera-Based System to Measure Change in Water Volume in a Drinking Glass. **Sensors - Section Physical Sensors**. doi:10.3390/s150923847, set. 2015. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/15/9/23847>>. Acesso em: 01 nov. 2015.
- BASTOS, A. **Instrumentação, Eletrônica Analógica e Digital**. Rio de Janeiro, 2002.
- BELTRÃO, N. E. de M. et al. **Zoneamento e época de plantio para o algodoeiro no norte do estado do Espírito Santo**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.7, n.1, p. 99-105, 2003.

BENAVIDES, M. et al. Design and Test of a Low-Cost RGB Sensor for Online Measurement of Microalgae Concentration within a Photo-Bioreactor. **Sensors - Special Issue Sensors for Bioprocess Monitoring and Control**. doi:10.3390/s150304766, fev. 2015. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/15/3/4766>>. Acesso em: 11 ago. 2015.

BITELLA, G. et al. A Novel Low-Cost Open-Hardware Platform for Monitoring Soil Water Content and Multiple Soil-Air-Vegetation Parameters. **Sensors - Special Issue Agriculture and Forestry: Sensors, Technologies and Procedures**. doi:10.3390/s141019639, out. 2014. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/14/10/19639>>. Acesso em: 07 nov. 2015.

BOLTON, W. **Instrumentação e controle**, São Paulo: Hemus, 1988. cap.2, p. 25-149.

BOXTEC. **Vergleich Temperatur- und Feuchtigkeitsfühler**. Disponível em: <http://playground.boxtec.ch/doku.php/sensors/temp-hum_sensors_compared>. Acesso em: 02 dez. 2014.

CELA, A. et al. Complete Low-Cost Implementation of a Teleoperated Control System for a Humanoid Robot. doi:10.3390/s130201385, jan. 2013. **Sensors - Special Issue New Trends towards Automatic Vehicle Control and Perception Systems**. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/13/2/1385>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

CHAO, C. et al. An Arduino-Based Resonant Cradle Design with Infant Cries Recognition. **Sensors - Section Physical Sensors**. doi:10.3390/s150818934, ago. 2015. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/15/8/18934>>. Acesso em: 27 out. 2015.

DASIOS, A. et al. Hands-On Experiences in Deploying Cost-Effective Ambient-Assisted Living Systems. **Sensors - Special Issue Sensors and Smart Cities**. doi:10.3390/s150614487, jun. 2015. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/15/6/14487>>. Acesso em: 28 out. 2015.

DINER, D. Arduino Uno vs BeagleBone vs Raspberry Pi. 2012. Disponível em: <<http://digitaldiner.blogspot.com.br/2012/10/arduino-uno-vs-beaglebone-vs-raspberry.html>>. Acesso em: 24 dez. 2015.

D-ROBOTICS UK. **DHT11 Humidity & Temperature Sensor**. PDF. Reino Unido, 2010. Disponível em: <<http://www.datasheetpdf.com/datasheet/DHT11.html>>. Acesso em: 28 out. 2014.

DX. **Dht11**. Disponível em: <<http://www.dx.com/p/arduino-digital-temperature-humidity-sensor-module-121350>>. Acesso em: 29 out. 2014.

FARIA, W. C. et al. Sistema Open-Source para Coleta e Armazenamento de Dados Meteorológicos. Congresso de Iniciação Científica do Inatel 2014. Disponível em <<http://tinyurl.com/pdeocr7>>. Acesso em: 29 nov. 2014.

FRITZING. **Fritzing electronics made easy**. Disponível em: <<http://fritzing.org/home/>>.

Acesso em: 20 out. 2014.

GENNARO, S. F. Di et al. An Open-Source and Low-Cost Monitoring System for Precision Enology. **Sensors**. doi:10.3390/s141223388, dez. 2014. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/14/12/23388>>. Acesso em: 12 out. 2015.

GONZÁLEZ, F. C. J. et al. Smart Multi-Level Tool for Remote Patient Monitoring Based on a Wireless Sensor Network and Mobile Augmented Reality. **Sensors: Special Issue Wireless Sensor Network for Pervasive Medical Care**. doi:10.3390/s140917212, set. 2014. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/14/9/17212>>. Acesso em: 30 out. 2015.

GÜTHS, S.; De PAULO, V. **Instrumentação em Ciências Técnicas**. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, 1998.

HERTZOG, P; SWART, A. J. The Use of an Innovative Jig to Stimulate Awareness of Sustainable Technologies among Freshman Engineering Students. **Sustainability**. doi:10.3390/su7079100, jul. 2015. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2071-1050/7/7/9100>>. Acesso em: 12 set. 2015.

HODGES, S. et al. **A new era for ubicomp development**. Pervasive Computing, IEEE, v. 11, n. 1, p. 5-9, Jan. 2012.

INMET. **Tempo/Gráficos**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos>>. Acesso em: 04 dez. 2015.

KATO, Y. **Splish: a visual programming environment for arduino to accelerate physical computing experiences**. 2010 Eighth International Conference on Creating, Connecting and Collaborating through Computing. IEEE Computer Society, 2010, p. 3-10.

KELLEY, C. D. et al. An Affordable Open-Source Turbidimeter. **Sensors**. doi:10.3390/s140407142, abr. 2014. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/14/4/7142>>. Acesso em: 01 nov. 2015.

KIM, K; MYUNG, H. Sensor Node for Remote Monitoring of Waterborne Disease-Causing Bacteria. **Sensors - Special Issue Biosensors for Pathogen Detection**. doi:10.3390/s150510569, mai. 2015. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/15/5/10569>>. Acesso em: 06 nov. 2015.

LEEuw, T; BOSS, E. S; WRIGHT, D. L. In situ Measurements of Phytoplankton Fluorescence Using Low Cost Electronics. **Sensors**. doi:10.3390/s130607872, jun. 2013. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/13/6/7872>>. Acesso em: 04 nov. 2015.

LENGFELD, K; AMENT, F. Observing Local-Scale Variability of Near-Surface Temperature and Humidity Using a Wireless Sensor Network. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**. v. 51, n. 1, jan. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-11-025.1>>. Acesso em: 27 out. 2015.

LIAN, K; HSIAO, S.; SUNG, W. Mobile Monitoring and Embedded Control System for Factory Environment. **Sensors**. doi:10.3390/s131217379, dez. 2013. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/13/12/17379>>. Acesso em: 13 out. 2015.

LIN, X; HUBBARD, G. Sensor and Electronic Biases/Errors in Air Temperature Measurements in Common Weather Station Networks. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**. v. 21, n. 7, jul. 2004. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426\(2004\)021<1025:SAEEIA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426(2004)021<1025:SAEEIA>2.0.CO;2)>. Acesso em: 01 nov. 2015

MARAN, V.; MORGENSTERN, M. S.; AURÉLIO, R.; G. N de A. Rede de sensores sem-fio para coleta de dados de lavoura na arquitetura agromobile. 2013. Disponível em: <<https://www.revistas.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/view/1939/1604>>. Acesso em: 24 dez. 2015.

MARANHÃO, G. N de A. et al. Using LDR as Sensing Element for an External Fuzzy Controller Applied in Photovoltaic Pumping Systems with Variable-Speed Drives. **Sensors - Section Physical Sensors**. doi:10.3390/s150924445, set. 2015. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/15/9/24445>>. Acesso em: 26 out. 2015.

MASSIMO, B.; CUARTIELLES, D. **Arduino**. Disponível em: <<http://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 06 set. 2014.

MCM. Arduino Uno vs Raspberry Pi vs BeagleBone Black. 2012. Disponível em: <http://blog.mcmelectronics.com/post/Arduino-Uno-Raspberry-Pi-and-BeagleBone-Black#.Vn6qz_krJdh>. Acesso em: 25 dez. 2015.

MICROS. G. **Arduino and DHT11 sensor example**. Disponível em: <<http://www.getmicros.net/arduino-dht11-sensor-example.php>>. Acesso em: 01 nov. 2014.

ML. **Dht21**. Disponível em: <http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-587807010-sensor-de-umidade-e-temperatura-dht21-arduino-outros-mcs-_JM>. Acesso em: 29 out. 2014a.

ML. **Time Shield**. Disponível em: <http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-590354064-time-shield-pinos-soldados-exemplo-rtc-hora-data-arduino-_JM>. Acesso em: 29 out. 2014b.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 3. Ed. Viçosas: UFV. 2007, 307p.

MRAOVIĆ, M. et al. Humidity Sensors Printed on Recycled Paper and Cardboard. **Sensors**. doi:10.3390/s140813628, jul. 2014. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/14/8/13628>>. Acesso em: 25 out. 2015.

NETO, A. J. S; ZOLNIER, S. Avaliação de Circuito Eletrônico para Medição de Temperatura em Instalações Agrícolas por meio da Porta Paralela de um Computador. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v. 26, n. 2, mai/ago, 2006. Disponível em:<<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v26n2/01.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2015.

NETO, A. M. da S.; ARAÚJO, A. E.; BELTRÃO, N. E. de M. **Clima e Solo**. In: Azevedo, D. M. P. de & Lima, E. F. **O agronegócio da mamona no Brasil**. Embrapa Algodão. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 63-76, 2001.

NEVES, G. A. R. **Desenvolvimento de Estação Micrometeorológica com Armazenamento de Dados**. Dissertação - 2011 [Universidade Federal do Mato Grosso - online]. Disponível em <<http://tinyurl.com/oa3jdab>>. Acesso em: 04 nov. 2014.

NILSIAM, Y. et al. Integrated Voltage—Current Monitoring and Control of Gas Metal Arc Weld Magnetic Ball-Jointed Open Source 3-D Printer. **Machines**. doi:10.3390/machines3040339, nov. 2015. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2075-1702/3/4/339>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

OKABE, A. M. dos S. et al. Monitoramento da temperatura e umidade relativa em um ambiente para secagem de madeira. DOI: 10.13140, set. 2015. Disponível em: <<http://www.researchgate.net/publication/283719680>>. Acesso em: 24 dez. 2015.

OLIVEIRA, M. D. et al. Autonomic model for irrigation control. **IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security**, Vol.15 n.4, abr. 2015. Disponível em: <http://paper.ijcsns.org/07_book/201504/20150405.pdf>. Acesso em: 24 dez. 2015.

PALMA, D. et al. An Internet of Things Example: Classrooms Access Control over Near Field Communication. **Sensors**. doi:10.3390/s140406998, abr. 2014. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/14/4/6998>>. Acesso em: 03 nov. 2015.

PALMIERI, A. M. **Desenvolvimento de sistema automatizado de baixo custo para coleta e armazenamento de dados de variáveis climáticas: aplicações no ambiente agrícola**. *Dissertação* - 2009 [USP - online]. Disponível em <<http://tinyurl.com/npazy9s>>. Acesso em: 01 ago. 2014.

PEARCY, R. W. et al. **Plant Physiological Ecology, Field methods and instrumentation**. London, British Library, 1989, 442p.

RAJARAMAN, S. et al. Design of a Functional Training Prototype for Neonatal Resuscitation. **Children**. doi:10.3390/children1030441, nov. 2014. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2227-9067/1/3/441>>. Acesso em: 06 nov. 2015.

RAVIGNANI, A. et al. Primate Drum Kit: A System for Studying Acoustic Pattern Production by Non-Human Primates Using Acceleration and Strain Sensors. **Sensors**. doi:10.3390/s130809790, jul. 2013. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/13/8/9790>>. Acesso em: 13 out. 2015.

R Development Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. **R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria**. ISBN 3-900051-07-0. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>. Acesso em: 30 out. 2015.

ROMIOTTO. **Estação meteorológica WS500, 8373.U01 Lufft**. Disponível em: <<http://romiotto.com.br/loja.php/p-228/estacao-meteorologica-ws500-8373.u01-lufft>>. Acesso em: 01 jun. 2014.

SALAMONE, F. et al. An Open Source Low-Cost Wireless Control System for a Forced Circulation Solar Plant. **Sensors**. doi:10.3390/s151127990, nov. 2015. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/15/11/27990>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

SAPUCCI, L. F. et al. Analysis of Relative Humidity Sensors at the WMO Radiosonde Intercomparison Experiment in Brazil. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**. v. 22, n. 6, jun. 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1175/JTECH1754.1>>. Acesso em: 29 out. 2015.

SILVA, K. O. et al. **Automated system for relative humidity data acquisition**. Eng. Agríc. [online]. 2007, vol.27, n.3, pp. 630-638. ISSN 0100-6916. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162007000400005>>. Acesso em: 27 jun. 2014.

SILVA, M. S.; FRUETT, F. Rede de sensores sem fio de baixo custo para monitoramento ambiental. 2010. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/anais/cba/2010/Artigos/66285_1.pdf>. Acesso em: 24 dez. 2015.

SOUZA, T. A. de. **Sistema Embarcado Aplicado ao Monitoramento e Controle de Irrigação Artificial em Condições Semiáridas**. Disponível em: <http://www.robolivres.org/uploads/documentos/cdc-minas-up/Monografia%20-%20Thalis%20Antunes%20de%20Souza_2215_1399723701.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2015.

SPARKFUN. **Humidity and Temperature Sensor**. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/products/10167>>. Acesso em: 01 jun. 2014.

TURCO, S. H. N. et al. **Zoneamento bioclimático para vacas leiteiras no estado da Bahia**. Revista de Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.26, n.1, p. 20-27, 2006.

VILLARRUBIA, G. et al. Ambient Agents: Embedded Agents for Remote Control and Monitoring Using the PANGAEA Platform. **Sensors - Special Issue Sensors Data Fusion for Healthcare**. doi:10.3390/s140813955, jul. 2014. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/14/8/13955>>. Acesso em: 01 nov. 2015.

VÖMEL, H. et al. Radiation Dry Bias of the Vaisala RS92 Humidity Sensor. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**. v. 24, n. 6, jun. 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1175/JTECH2019.1>>. Acesso em: 25 out. 2015.

WERNECK, P. **Introdução ao Arduino**. 2009. Disponível em: <<http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/1307>>. Acesso em: 12 jul. 2014.