

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**DESENVOLVIMENTO DE UMA REDE DE SENSORES SEM FIO
APLICADA NO MONITORAMENTO DA VARIABILIDADE
TÉRMICA EM CASAS DE VEGETAÇÃO**

ROGÉRIO ZANARDE BARBOSA

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Irrigação e Drenagem.

**BOTUCATU-SP
NOVEMBRO – 2015**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**DESENVOLVIMENTO DE UMA REDE DE SENSORES SEM FIO
APLICADA NO MONITORAMENTO DA VARIABILIDADE
TÉRMICA EM CASAS DE VEGETAÇÃO**

ROGÉRIO ZANARDE BARBOSA

Orientador: Prof. Dr. João Eduardo Machado Perea Martins

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Irrigação e Drenagem.

BOTUCATU-SP
NOVEMBRO – 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

B238d Barbosa, Rogério Eanarde, 1988-
Desenvolvimento de uma rede de sensores sem fio aplicada no monitoramento da variabilidade térmica em casas de vegetação / Rogério Eanarde Barbosa. - Botucatu : [s.n.], 2015 xv, 98 f. : fots. color.; grafs. color., ils. color., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2015
Orientador: João Eduardo Machado Perea Martins
Inclui bibliografia

1. Sensoriamento remoto. 2. Redes de sensores sem fio. 3. Aquisição de dados. 4. Temperatura. I. Martins, João Eduardo Machado Perea. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE BOTUCATU
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÔNOMICAS DE BOTUCATU


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

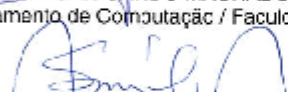
TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE UMA REDE DE SENSORES SEM FIO APLICADA NO MONITORAMENTO DA VARIABILIDADE TÉRMICA EM CASAS DE VEGETAÇÃO

AUTOR: ROGÉRIO ZANARDE BARBOSA

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOAO EDUARDO MACHADO P MARTINS


Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOAO EDUARDO MACHADO P MARTINS
Departamento de Computação / Faculdade de Ciências de Bauru


Prof. Dr. RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN
Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu


Prof. Dr. JOÃO CARLOS CURY SAAC
Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu


Prof. Dr. MARCELO GIROTTO
Departamento de Agronomia / Faculdade de Ensino Superior e Formação Integral de Garça


Profa. Dra. ANDREA CARLA GONCALVES VIANNA
Departamento de Computação / Faculdade de Ciências de Bauru

Data da realização: 16 de dezembro de 2015.

À Deus, pela graça e por ser essencial
em minha vida estando sempre presente
ao meu lado nos momentos mais difíceis
e nos momentos de decisão.

AGRADECIMENTOS

A esposa Arisa Ferreira de Souza que sempre me incentivou durante esta etapa da minha vida.

A toda minha família que contribuiu para a concretização deste grande sonho.

Aos meus pais Luiz Barbosa e Edna Maria Zanarde Barbosa, meu irmão Ronei Zanarde Barbosa que sempre acreditaram e me apoiaram durante este trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. João Eduardo Machado Perea Martins pela inestimável dedicação, determinação, paciência e orientação na condução deste trabalho.

Aos meus grandes e verdadeiros amigos Diego Scacalossi Voltan, José Marcio Bassan e Silas Franco dos Reis Alves que sempre estiveram ao meu lado me auxiliando neste trabalho.

A todos os professores, funcionários e amigos, da Faculdade de Ciências Agrônomicas - FCA em Botucatu (SP) pelo apoio, convívio e companheirismo no decorrer do doutorado.

Ao Departamento de Computação da Faculdade de Ciências – FC, da UNESP em Bauru (SP) pelo apoio ao desenvolvimento desse trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

O Professor Dr. Aloísio Costa Sampaio, a Professora Dra. Andrea Carla Gonçalves Vianna, o Prof. Dr. Humberto Ferrasoli Filho, docentes da FC-UNESP que me auxiliaram durante o estudo.

A Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal de Garça – SP e ao coordenador do curso de Agronomia prof. Dr. Marcelo Giroto que contribuem para o meu desenvolvimento profissional.

A todos aqueles que de alguma forma me auxiliaram durante o doutorado.

“
*Confia no Senhor de todo o teu coração, e
não te estribes no teu próprio entendimento.
Reconhece-o em todos os teus caminhos, e ele
endireitará as tuas veredas*

(Provérbios 3:5-6)

SUMÁRIO

	Página
DEDICATÓRIA.....	III
AGRADECIMENTOS	IV
EPÍGRAFE	V
SUMÁRIO.....	VI
DEDICATÓRIA	V
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XIV
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY	3
3 INTRODUÇÃO	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
4.1 Rede de sensores sem fio.....	8
4.1.1. Consumo de energia do nó de sensoriamento	11
4.2 Os sensores do nó da rede.....	11
4.2.1. Sensores térmicos.....	12
4.3 Mecanismos de hardware de aquisição de dados.....	13
4.4 Estado da arte sobre rede de sensores sem fio aplicado no monitoramento ambiental.....	15
4.4.1. Aplicação da rede de sensores sem fio no monitoramento térmico do processo de compostagem.....	15
4.4.2. Uso da rede de sensores sem fio na irrigação de precisão monitorando a umidade do solo num sistema de pivô central para cultura do milho	16
4.4.3. Uso da rede de atuadores em sistema de irrigação localizada na cultura do morango.....	17
4.4.4. Utilização de uma rede de sensores sem fio e atuadores na irrigação da uva	18

4.4.5. Uso da rede de sensores sem fio no monitoramento da temperatura e da umidade do solo	19
4.4.6. Uso da rede de sensores sem fio como atuadores em sistema de irrigação localizada na cultura do morango	19
4.4.7. Rede de sensores sem fio aplicados no monitoramento ambiental de casas de vegetação	20
4.4.8. Validação de informações de temperatura e umidade relativa do ar de casas de vegetação utilizando rede de sensores sem fio	21
4.4.9. Uso da telemetria no monitoramento de parâmetros físicos em casas de vegetação	23
4.4.10. Rede de sensores sem fio no monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar no interior de casas de vegetação utilizando o protocolo de comunicação ZigBee	24
4.4.11. Rede de sensores sem fio no monitoramento	25
4.4.12. Rede de sensores sem fio no controle da irrigação e uso de modelos matemáticos para estimativa da evapotranspiração da cultura	26
4.4.13. Utilização do protocolo de comunicação ZigBee no controle da irrigação	27
4.4.14. Aplicação de redes de sensores sem fio no monitoramento da umidade do solo e controle da irrigação	28
4.4.15. Estudo do comportamento climático no interior de diferentes tipos de casas de vegetação	29
5 MATERIAL E MÉTODOS	31
5.1 Características do módulo de rádio XBee	31
5.2 Particularidades do sensor LM35	39
5.3 Atributos técnicos do Arduino	41
5.4 Sistema de hardware	43
5.5 Software de aquisição de dados para rede de sensores sem fio	47
5.7 Verificação da exatidão dos sensores de temperatura	50
5.6 Detalhes da casa de vegetação utilizada	52
5.8 Metodologia do monitoramento térmico no interior da casa de vegetação	52

5.9 Metodologia da análise dos dados térmicos recebidos da casa de vegetação ..	55
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
6.1 Análise de exatidão dos sensores usados na rede.....	58
6.2 Avaliação do comportamento dos sensores LM35 em medidas térmicas contínuas	63
6.3 Avaliação de uma rede de sensores sem fio no monitoramento térmico numa casa de vegetação utilizando sensores LM35	66
6.4 Análise da resolução temporal das medições térmicas na casa de vegetação ..	71
6.5 Análise da Variabilidade espacial da temperatura do ar no interior de uma casa de vegetação.....	79
6.6 Variabilidade espacial da evapotranspiração de referência utilizando o método de Hargreaves e Samani no interior de uma casa de vegetação	87
7 CONCLUSÕES.....	91
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1: Modelo de uma rede de sensores sem fio e a transmissão dos dados para um computador central, em uma área de irrigação.....	6
Figura 2: Arquitetura básica de um nó de sensor, a estrutura física de um nó é composta por um microcontrolador, bateria, sensor e o módulo de rádio.....	9
Figura 3: Exemplo de três diferentes topologias de redes de sensores sem fio, onde os vários nós de sensoriamento, que fazem o monitoramento de parâmetros físicos em irrigação, enviam dados para um computador central, o qual pode armazenar as informações em um banco de dados ou efetuar ações de controle.	10
Figura 4: Sensor de temperatura do ar analógico modelo LM35 (A) e sensor de umidade relativa e temperatura do ar digital modelo CS490000 (B).	13
Figura 5: Processo de conversão de um sinal analógico, enviado por um sensor, para um sinal digital para ser processado pelo computador. Procedimento realizado pelo hardware denominado de conversor analógico-digital.	14
Figura 6: Tela inicial do software de aquisição de dados térmicos, desenvolvido para monitorar em tempo real a temperatura de processos de compostagem.....	15
Figura 7: Rede de sem fio com a função de atuador para abertura de válvulas solenoides no cultivo em vaso do morango.....	18
Figura 8: Casa de vegetação e arquitetura básica do sistema de rede de sensores sem fio utilizado no trabalho.	21
Figura 9: Casa de vegetação e nó da rede de sensor utilizado no estudo para validação das informações de temperatura e umidade relativa do ar.	22
Figura 10: Arquitetura básica do sistema GSM (Global System for Mobile communication) utilizado para realizar a aquisição de dados à distância da temperatura, umidade relativa do ar e umidade do solo.	23
Figura 11: Nó de sensor sem fio desenvolvido no trabalho (esquerda), neste hardware é possível conectar um painel solar para carregar uma bateria de lítio (direita).	24
Figura 12: Nó de sensor desenvolvido para monitorar a temperatura e umidade relativa do ar.....	25
Figura 13: Nó de sensor do sistema supervisor de aquisição de dados, coordenador da rede (a) onde os dados são recebidos e processados; monitor de pressão e	

controlador de válvulas solenoides acoplado à um controlador de carga para uso de painéis fotovoltaicos (b).....28

Figura 14: Arquitetura do sistema de rede de sensores sem fio desenvolvida para o monitoramento da umidade do solo e controle da irrigação.....29

Figura 15: Tipos de casas de vegetação utilizadas no estudo do comportamento da temperatura do ar e radiação solar.30

Figura 16: Diferentes modelos de módulos XBee que podem ser utilizados em aplicações agrícolas, a ilustração C apresenta o modelo utilizado no estudo.32

Figura 17: Vista superior e inferior do XBee PRO S2B utilizado durante os testes, o item 1 mostra o modelo do XBee que é o XBP24BZ7, o item 2 mostra o endereço individual do módulo que é 0013A200 4066BAD9.32

Figura 18: Funções com o nome e descrição de cada pino do módulo XBee, a disposição dos pinos são semelhantes entre os modelos de rádio, o que facilita o desenvolvimento de nós de sensor com características diferentes sem comprometer o projeto.34

Figura 19: Diferentes tipos de antenas dos módulos XBee, destacando a antena do tipo wire, utilizada durante o teste.....34

Figura 20: Padrão de uma string utilizada num comando AT para configuração dos módulos XBee.36

Figura 21: Tela inicial do software X-CTU, com as funções de configuração do computador (1); teste de alcance de transmissão (2) terminal de configuração em modo AT; configuração do módulo; serial ativa (5); configuração da porta serial (6) botão de configuração da serial (7) e ativação do modo API (8).37

Figura 22: Tela de configuração do software X-CTU com a aba Modem Configuration ativa com a função de ler os parâmetros do módulo (1); gravar as configurações (2); escolher o modelo do módulo de rádio (3); atualizações das versões (4); função do módulo (5) e parâmetros de configuração (6).38

Figura 23: Tela do software X-CTU habilitado o modo de configuração através do comando AT, a ilustração 1 mostra o botão responsável por fechar a porta de comunicação serial, a ilustração 2 mostra o botão de limpar a tela, o ilustração 3 mostra o botão responsável por apresentar os comandos em hexadecimal e a ilustração 4 mostra a tela de comando AT com uma função de exemplo.....39

Figura 24: Sensor de temperatura modelo LM35 (A) utilizado nos testes de monitoramento térmico e disposição dos pinos de saída (B).40

Figura 25: Placa eletrônica do Arduino Nano utilizado como parte constituinte do nó de sensor vista superior (A) e vista inferior (B).	41
Figura 26: Tela inicial do programa computacional IDE Arduino utilizado para programar o microcontrolador Arduino Nano com as funções de verificar e gravar (1) guia de ferramentas e configurações (2); tela de programação (3) e painel de verificação de erros (4).	43
Figura 27: Placa de circuito comercial modelo Bee Adapter V1.4 utilizada para o módulo coordenador da rede que é ligado ao computador central.	44
Figura 28: Esquema de montagem do nó de sensoriamento desenvolvido para o monitoramento da temperatura, composto basicamente pelo módulo de rádio, Arduino nano, chip de tensão de referência MCP-1541, e sensores de temperatura LM35. ...	45
Figura 29: Placa do nó de sensor para monitoramento da temperatura do ar desenvolvido que foram desenvolvidas no presente trabalho.	46
Figura 30: Tela inicial do software de aquisição de dados de rede de sensores sem fio desenvolvido, destacando a área de configuração da porta serial (1), os botões de conectar e desconectar a serial (2), abrir e fechar arquivo (3), limpar e sair (4) indicador da serial (5) e indicador de arquivo (6).	48
Figura 31: Padrão de informações dos sensores na rede, com informações de data (1), hora (2) e valores de temperatura de 16 sensores (3).	49
Figura 32: Termohigrômetro modelo HTR-152, utilizado como padrão de referência na correção dos valores dos sensores de térmicos, este equipamento mede a temperatura (°C) e a umidade relativa (%) simultaneamente.	51
Figura 33: Nó de sensor para monitoramento da temperatura do ar, desenvolvido e sendo testado e corrigido em laboratório.	51
Figura 34: Interior da casa de vegetação utilizada durante os testes de monitoramento térmico usando rede de sensores sem fio.	52
Figura 35: Vista superior da casa de vegetação e a distribuição dos sensores LM35 no seu interior.	53
Figura 36: Sensor de temperatura do ar modelo LM35 e abrigo construído com a utilização de prato plástico instalado na parte superior da casa de vegetação.	54
Figura 37: Formato e especificações do abrigo construído para proteger os sensores de temperatura LM35 contra a incidência direta de radiação solar direta, constituído basicamente pelo prato (1) e poliestireno expandido (3).	54
Figura 38: Valores da temperatura do ar, medidas com o Termohigrômetro modelo HTR-152 e os sensores 1, 2, 3 e 4.	61

Figura 39: Valores da temperatura do ar, medidas com o Termohigrômetro modelo HTR-152 e os sensores 5, 6, 7 e 8.	61
Figura 40: Valores da temperatura do ar, medidas com o Termohigrômetro modelo HTR-152 e os sensores 9, 10, 11 e 12.	62
Figura 41: Valores da temperatura do ar no, medidas com o Termohigrômetro modelo HTR-152 e os sensores 13, 14, 15 e 16.	62
Figura 42: Temperatura do ar em medidas contínuas, medidas com o Termohigrômetro modelo HTR-152 (referência) e os sensores 1, 2, 3 e 4.	63
Figura 43: Temperatura do ar em medidas contínuas no interior do laboratório, medidas com o Termohigrômetro modelo HTR-152 (referência) e os sensores 5, 6, 7 e 8.	64
Figura 44: Temperatura do ar em medidas contínuas no interior do laboratório, medidas com o Termohigrômetro modelo HTR-152 (referência) e os sensores 9, 10, 11 e 12.	64
Figura 45: Temperatura do ar em medidas contínuas no interior do laboratório, medidas com o Termohigrômetro modelo HTR-152 (referência) e os sensores 13, 14, 15 e 16.	65
Figura 46: Comportamento da temperatura do ar dos sensores 1, 2, 3, 4 e 5 ao longo de três dias no interior de uma casa de vegetação.	68
Figura 47: Comportamento da temperatura do ar dos sensores 6, 7, 8, 9 e 10 ao longo de três dias no interior de uma casa de vegetação.	68
Figura 48: Comportamento da temperatura do ar dos sensores 11, 12, 13, 14 e 15 ao longo de três dias no interior de uma casa de vegetação.	69
Figura 49: Comportamento da temperatura do ar dos sensores 1, 2, 3, 4 e 5 no dia de maior variação térmica no interior de uma casa de vegetação.	70
Figura 50: Comportamento da temperatura do ar dos sensores 6, 7, 8, 9 e 10 no dia de maior variação térmica no interior de uma casa de vegetação.	70
Figura 51: Comportamento da temperatura do ar dos sensores 11, 12, 13, 14 e 15 no dia de maior variação térmica no interior de uma casa de vegetação.	71
Figura 52: Diferença em módulo das medições consecutivas em intervalos de 15 minutos (barras) e variação contínua da temperatura registrada pelos sensores (linha) de número 1, 2 e 3 dentro da casa de vegetação.	74

Figura 53: Diferença em módulo das medições consecutivas em intervalos de 15 minutos (barras) e variação contínua da temperatura registrada pelos sensores (linha) de número 4, 5 e 6 dentro da casa de vegetação.	75
Figura 54: Diferença em módulo das medições consecutivas em intervalos de 15 minutos (barras) e variação contínua da temperatura registrada pelos sensores (linha) de número 7, 8 e 9 dentro da casa de vegetação.	76
Figura 55: Diferença em módulo das medições consecutivas em intervalos de 15 minutos (barras) e variação contínua da temperatura registrada pelos sensores (linha) de número 10, 11 e 12 dentro da casa de vegetação.	77
Figura 56: Variação térmica (°C) e temperatura do ar (°C) no interior da casa de vegetação dos sensores 13, 14 e 15. Diferença em módulo das medições consecutivas em intervalos de 15 minutos (barras) e variação contínua da temperatura registrada pelos sensores (linha) de número 13, 14 e 15 dentro da casa de vegetação.	78
Figura 57: Variograma da variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação no horário das 0:00h (A) e 3:00hs (B).	80
Figura 58: Variograma da variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação no horário das 6:00h (A) e 9:00hs (B).	81
Figura 59: Variograma da variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação no horário das 12:00h (A) e 15:00hs (B).	81
Figura 60: Variograma da variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação no horário das 18:00h (A) e 21:00hs (B).	81
Figura 61: Variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação no horário das 0:00h (A) e 3:00hs (B).	83
Figura 62: Variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação no horário das 6:00h (A) e 9:00hs (B).	84
Figura 63: Variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação no horário das 12:00h (A) e 15:00hs (B).	85
Figura 64: Variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação no horário das 18:00h (A) e 21:00hs (B).	86
Figura 65: Variograma da variabilidade espacial da evapotranspiração potencial no interior da casa de vegetação.	88
Figura 66: Variabilidade espacial da evapotranspiração potencial (ET _o) no interior da casa de vegetação para o dia de maior variação térmica.	89

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1: Descrição das principais características avaliadas nos sensores, quanto ao seu modo de funcionamento e operação, que podem ser fundamentais no momento da escolha do sensor ideal.	12
Tabela 2: Principais características operacionais de diferentes modelos de módulos XBee mais utilizado em aplicações agrícolas.	33
Tabela 3: Diferentes frequências do protocolo ZigBee utilizadas no mundo e seus respectivos números de canais e taxa de transmissão de dados.	35
Tabela 4. Tipos de dispositivos e funções de uma rede de sensor sem fio operando no protocolo de comunicação ZigBee.	35
Tabela 5: Atributos e especificações do Arduino Nano utilizado como elemento construtivo do nó de sensor para o monitoramento térmico.	42
Tabela 6: Principais componentes eletrônicos utilizados no desenvolvimento do hardware de um nó de sensoriamento.	47
Tabela 7: Valores da radiação no topo da atmosfera (R_a), $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, para diferentes latitudes sul e meses do ano.	56
Tabela 8: Valores de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) dos sensores utilizados na rede implementada, e seus relativos valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão, coeficiente de variação e diferença entre a referencial e a média do sensor.	60
Tabela 9: Temperatura do ar de 16 sensores LM35 coletados em laboratório em medidas contínuas.	65
Tabela 10: Análise estatística de valores de temperatura do ar monitorados no interior de uma casa de vegetação.	67
Tabela 11: Valores estatísticos da diferença entre medições consecutivas, em intervalos de 15 minutos, da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) com 15 sensores LM35 no interior da casa de vegetação.	72
Tabela 12: Resultados dos parâmetros do variograma da distribuição espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação para os modelos Gaussiano e Exponencial nos horários das 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 horas.	80
Tabela 13: Valores de média, máximo, mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação para medidas de Evapotranspiração de referência (ET_o), em mm.d^{-1} , no	

interior de uma casa de vegetação levando em consideração 15 pontos de amostragem térmica.....87

Tabela 14: Resultados dos parâmetros do variograma da distribuição espacial da evapotranspiração de referência (ET_o) para o dia de maior variação térmica no interior da casa de vegetação para o modelo Gaussiano.88

1 RESUMO

Este é um trabalho de tecnologia computacional aplicada na área agrícola, cujo objetivo principal do trabalho é desenvolver uma rede de sensores sem fio, que envolve aspectos de software e hardware, para o monitoramento térmico no interior de uma casa de vegetação. Além da rede propriamente dita, o trabalho também inclui a sua aplicação no levantamento quantitativo da variabilidade térmica na casa de vegetação o que pode ser aplicado em diversas atividades agrícolas a serem desenvolvidas no interior da estrutura.

A proposta é que a rede desenvolvida seja de fácil implementação e manuseio, com baixo custo, e que use técnicas computacionais eficientes a fim de permitir a sua fácil adaptação a diferentes necessidades das pesquisas.

As redes de sensores sem fios dependem fundamentalmente de estruturas chamadas de nós de sensoriamento, que são responsáveis pelas medições de um parâmetro físico e também pela troca de informações via rádio. No presente trabalho, o nó de sensoriamento desenvolvido é constituído pelo módulo de rádio XBee Pro S2B; por um módulo de processamento Arduino Nano e por sensores de temperatura modelo LM35. O processador de cada nó de sensoriamento da rede desenvolvida executa um programa que faz a captura dos dados dos sensores de temperatura e os enviam por rádio à um computador onde existe um software que também foi desenvolvido no presente trabalho com o objetivo de receber, separar e gravar os dados de uma rede de sensores sem fio para o monitoramento térmico em casas de vegetação.

Cada nó de sensoriamento possui capacidade de ser conectado a até 8 sensores LM35. Na análise térmica, foram distribuídos dois nós de sensoriamento e um

total de 15 sensores distribuídos sistematicamente no interior de uma casa de vegetação do tipo teto em arco com dimensões de 8 X 16 metros localizada em Garça – SP. Os sensores foram corrigidos e instalados numa altura de 1,70 metros avaliando o comportamento, variação, e a variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da estrutura. Foi avaliado também a distribuição espacial da evapotranspiração de referência utilizando a metodologia proposta por Hargreaves-Samani, que leva em consideração os valores de temperatura diária e radiação solar no topo da atmosfera.

A avaliação dos dados mostra que o comportamento da temperatura do ar no interior da casa de vegetação sofreu variações significativas tanto em termos espaciais quanto temporais, evidenciando que o microclima neste ambiente é dinâmico, podendo modificar conforme a localização do sensor e hora do dia, sendo que as maiores variações térmicas ocorreram no período que varia das 8:00 às 14:00 horas. Com esta análise também é possível fazer um cálculo da evapotranspiração no interior da casa de vegetação, o que compõe no sistema desenvolvido uma ferramenta eficaz para a irrigação de precisão.

A análise dos dados permite concluir que o sistema desenvolvido atendeu de maneira satisfatória o objetivo proposto, sendo uma importante ferramenta no monitoramento de parâmetros físicos à distância e em tempo real. O emprego desta tecnologia facilita a aquisição de dados e a tomada de decisão em cultivos agrícolas.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento térmico, Redes de sensores sem fio, aquisição de dados, telemetria.

ANALYSIS OF THERMAL VARIABILITY IN GREENHOUSES USING WIRELESS SENSOR NETWORK. Botucatu, 2015. 113 p.

Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP.

Author: ROGÉRIO ZANARDE BARBOSA

Adviser: JOÃO EDUARDO MACHADO PEREA MARTINS

2 SUMMARY

This work presents the use of computer technology applied in agricultural systems, which involves aspects of software and hardware for thermal monitoring inside a greenhouse. It includes detailed analyses of the thermal variability in the greenhouse, which can be used in various agricultural activities implemented within the structure.

The work also includes the design of a wireless sensor network with main features are easy implementation, low cost, and efficient use of computational techniques to allow easy adaptation to new different needs of research.

Wireless sensor networks depend of a structure called sensor node, which are responsible for measuring a physical parameter and by wireless information exchange. In this work, the sensing node was designed with a radio module XBee Pro S2B; an Arduino Nano by a processing module; and the LM35 temperature sensor. The sensor nodes processor runs a program that makes the capture of data from temperature sensors and sends them by radio to a computer where a software which was also developed in this work

and aim to receive, separate and record data from a wireless sensor network for monitoring the air temperature inside greenhouses.

Each sensor node has the ability to be connected to up to eight LM35 sensors. In greenhouse thermal analysis, they were distributed in two sensing nodes connected to 15 sensors systematically distributed into the greenhouse with dimensions of 8 x 16 meters located in Garça – SP, Brazil. The sensors were fixed and installed at a height of 1.70 meters evaluating the behavior variation and spatial variation of the air temperature inside the structure. It was also evaluated the spatial distribution of reference evapotranspiration using the methodology proposed by Hargreaves-Samani, which takes into account the daily temperatures and solar radiation in the top of the atmosphere.

The temperature data analyses shows that the air temperature presents significant variations in spatial and temporal terms, showing that the microclimate in this environment is dynamic and can change as the sensor location and time of day with the greatest temperature changes occurred in the period ranging from 8:00AM to 2:00PM. This analysis is also possible to make a calculation of evapotranspiration inside the greenhouse, which makes up the system developed an effective tool for precision irrigation.

The data analysis shows that the system developed satisfactorily met the proposed objective, being an important tool in monitoring physical parameters remotely and in real time. The use of this technology facilitates data acquisition and decision making in agricultural crops.

KEYWORDS: Thermal monitoring, Wireless sensor network, Data acquisition, Telemetry.

3 INTRODUÇÃO

Uma rede de sensores sem fio é uma rede de dispositivos de sensoriamento distribuídos espacialmente com o propósito de medir alguma característica física ou ambiental (ZHENG e JAMALIPOUR, 2009). Em uma rede de sensores sem fio, cada módulo de sensoriamento é denominado de nó de sensoriamento, ou simplesmente nó, sendo que os nós são distribuídos em uma determinada área, comunicando-se direta ou indiretamente com um computador central, o qual é responsável por receber sinais dos vários nós de sensoriamento, sem a utilização de fios (DARGIE e POELLABAUER, 2010). Nesse computador central é gerada uma base de dados, através de um programa computacional, com as informações de todos os nós de sensoriamento da rede, o que permite a geração de uma base de dados para pesquisas e também para a tomada de decisão (KARL e WILLIG, 2007).

Uma importante característica das redes de sensores sem fio é a mobilidade, pois os dispositivos de sensoriamento podem ser movidos de local com grande facilidade, permitindo o seu deslocamento conforme desejado de acordo com o alcance do transmissor, sem necessidade de transtornos relacionados a sua instalação (RAGHAVENDRA; SIVALINGAM; ZNATI, 2004).

A Figura 1 mostra o modelo de uma rede de sensores sem fio distribuídos em uma área de irrigação monitorando parâmetros físicos como, temperatura do ar, umidade relativa, umidade do solo, etc.

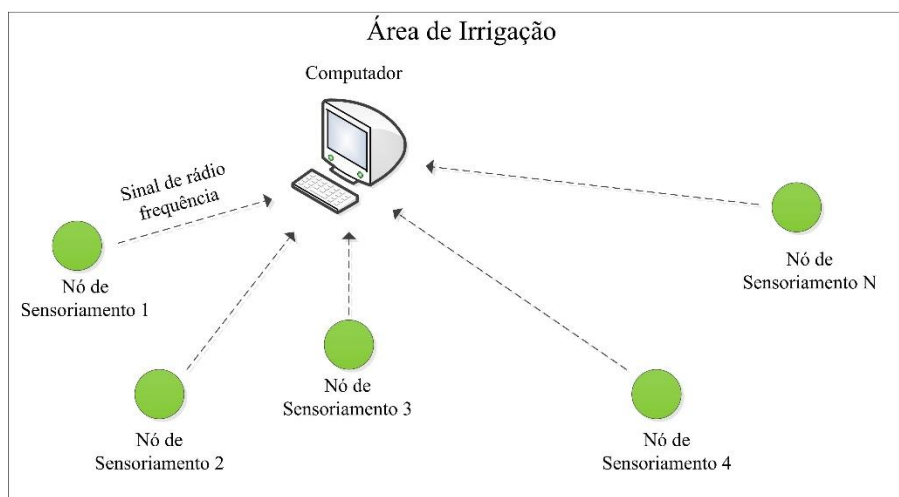


Figura 1: Modelo de uma rede de sensores sem fio e a transmissão dos dados para um computador central, em uma área de irrigação.

As rede de sensores sem fio estão ligadas diretamente à uma tecnologia denominada de telemetria que é a união de duas palavras de origem grega em que *tele* significa longe e *meter* que significa medir. Portanto, telemetria significa a medição de alguma grandeza de interesse à distância. Embora a troca de informação à distância possa ser feita por fios, a telemetria teve um grande avanço com os sistemas de rádio, o que posteriormente induziu a criação de redes de sensores. Este processo de troca de informações é bem pertinente a área tecnológica e agrícola, e o seu uso se expande em diversas áreas, como, agrometeorologia, irrigação, mecanização, manejo de pragas, etc. (LI, 2008).

Uma grande vantagem da utilização de rede de sensores sem fio é que as informações são recebidas em tempo real, o que favorece a tomada de decisões mais eficientes e rápidas na agricultura. A aquisição de dados em tempo real permite também a implantação de sistemas de controle. Por exemplo, a utilização da telemetria para o controle ambiental, de parâmetros como, temperatura e umidade relativa no interior de casas de vegetação (SUPREM; MAHALIK; KIM, 2013). A aplicação desta tecnologia no monitoramento térmico em casas de vegetação busca possibilitar a determinação de padrões climáticos no interior da estrutura, conforme as características de cada local, pois os dispositivos de sensoriamento são distribuídos conforme a característica de cada setor da casa de vegetação, podendo obter um maior desempenho das culturas com maior precisão e controle do ambiente que as envolvem (REHMAN et al., 2014).

O objetivo principal deste trabalho é projetar e implementar uma rede de sensores sem fio, o que envolve aspectos de software e hardware, para o

monitoramento térmico e da evapotranspiração potencial no interior de uma casa de vegetação. A proposta é o desenvolvimento de uma rede que seja de fácil implementação e manuseio, com baixo custo, e com um alcance que permita o seu uso eficiente na agricultura, a fim de permitir a sua fácil adaptação a diferentes necessidades das pesquisas. Nesse trabalho a rede de sensores sem fio foi instalada em uma estufa onde foi feito o monitoramento térmico em tempo real de 16 pontos de medições, o que permite um levantamento preciso da variabilidade térmica no interior da estufa, permitindo uma análise tomadas de decisão mais criteriosa em processos que usem a temperatura como um parâmetro operacional.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados conceitos técnicos associados à área de rede de sensores sem fio aplicado no monitoramento agrícola, incluindo considerações básicas sobre esta técnica aplicada na aquisição de dados em sistemas de monitoramento físico em ambiente protegido.

4.1 Rede de sensores sem fio

A Figura 2 mostra a arquitetura física de um nó da rede de sensores, que é composto basicamente pelo processador, módulo de rádio, bateria e o sensor. O processador é responsável por processar o sinal do sensor e enviá-lo para o módulo de rádio. O módulo de rádio envia os dados já processados sem fio para um receptor, onde encontra-se o computador central. A bateria é responsável por alimentar todos os componentes eletrônicos do nó, como, o módulo de rádio, o microcontrolador, o sensor, etc.

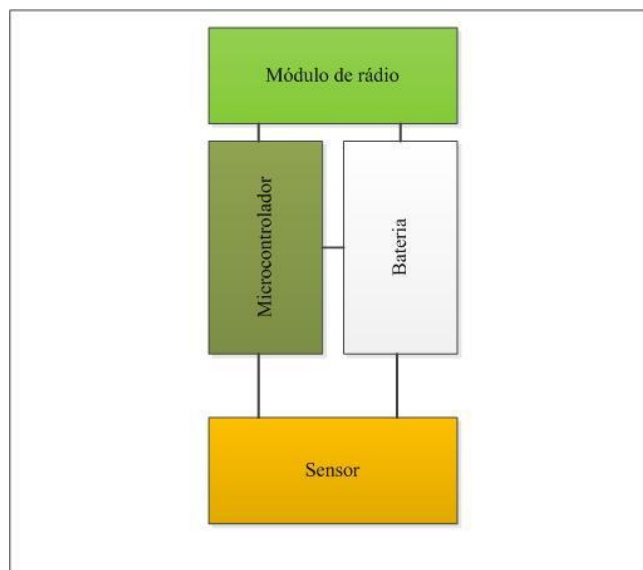


Figura 2: Arquitetura básica de um nó de sensor, a estrutura física de um nó é composta por um microcontrolador, bateria, sensor e o módulo de rádio.

Um importante fator da rede de sensores é a topologia da rede de sensores, a qual refere-se à forma com que os nós de sensoriamento são interconectados, ou seja, maneira de disposição ou arquitetura principal de uma rede de sensores (UMAR, 2004). Neste contexto, as principais topologias empregadas em rede de sensores sem fio, aplicadas no monitoramento ambiental, pode ser classificadas como, estrela, árvore e malha, sendo que todas são exemplificadas na Figura 3.

Na topologia estrela os nós de sensoriamento são conectados ponto a ponto diretamente ao computador central. As informações são enviadas ou recebidas diretamente do computador central para o nó de sensoriamento. Assim não existe a comunicação entre os nós de sensoriamento, exceto se a informação passar pelo computador central (NUNES; CAPPELLI; UMEZU, 2011).

Na topologia em árvore os nós de sensoriamento se comunicam de ponto a ponto, porém há uma organização hierárquica das informações, havendo nós de diferentes capacidades (NAYAK e STOJMENOVIC, 2010).

A topologia em malha tem como característica o roteamento dinâmico, onde os nós se comunicam entre si enviando as informações para o computador central final, que realiza a centralização dos dados (NUNES, 2008).

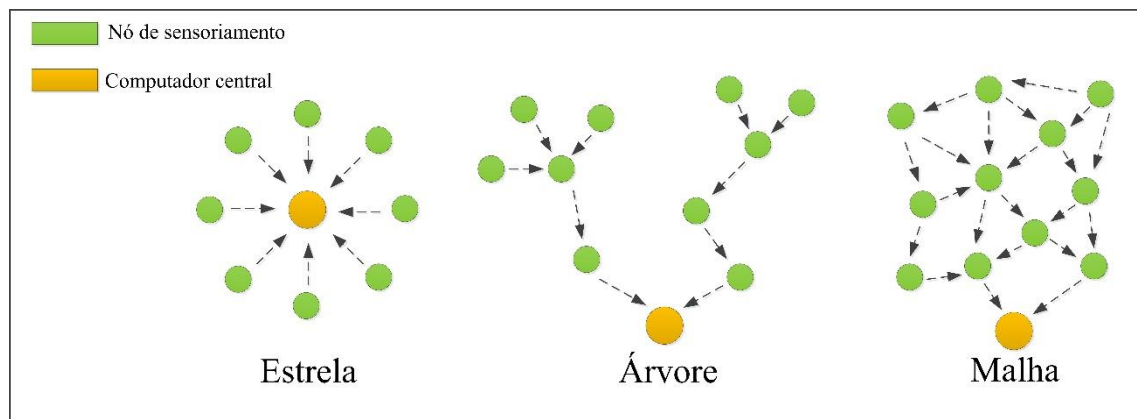


Figura 3: Exemplo de três diferentes topologias de redes de sensores sem fio, onde os vários nós de sensoriamento, que fazem o monitoramento de parâmetros físicos, enviam dados para um computador central, o qual pode armazenar as informações em um banco de dados ou efetuar ações de controle.

Ainda Segundo Nayak e Stojmenovic (2010) outro fator importante em rede de sensores é o protocolo de acesso ao meio, que é o conjunto de regras ou estratégias que, entre outras coisas, asseguram que não ocorram colisões de dados. O termo colisão é empregado quando dois ou mais pacotes de dados são transmitidos simultaneamente pelo mesmo meio físico e ocorre uma degradação dos dados em função da interferência mútua. Existem diversas formas, por meio de protocolos de acesso ao meio, para evitar a colisão de dados. Dentre os quais podemos exemplificar Time Division Multiplexing e Carrier Sense Multiple.

No Time Division Multiplexing (TDM) são criadas pequenas unidades de tempo, chamadas tecnicamente de slots, onde são enviados os pacotes de dados, que são informações contendo dados e, se necessário, informações adicionais de controle. Neste caso, cada nó da rede acessa-a apenas durante um período de tempo (slot) que lhe é reservado e, assim, nunca haverá colisão. Porém, existem desvantagens como, a exigência de um mecanismo preciso de controle de tempo (sincronização) ou a possibilidade de o nó não ter informações para enviar e então a rede ficará ociosa neste slot (KARL e WILLIG, 2007).

O Carrier Sense Multiple (CSM) é um protocolo de acesso múltiplo com sensor de portadora. A característica do CSM é verificar se a rede está ocupada, antes de enviar um pacote de dados para não haver a colisão de informações. A principal limitação deste protocolo é em um caso específico, onde dois nós verificam a rede simultaneamente e a detectam como ociosa, e então começam a enviar seus pacotes simultaneamente, o

que poderá provocar colisões. Numa forma de evitar este tipo de problema, surgiu o Carrier Sense Multiple - Collision Detection (CSM/CD) esse protocolo é semelhante ao CSM, porém, o nó fica monitorando continuamente o meio físico durante a transmissão do pacote e, caso ocorra alguma colisão, o nó interrompe a transmissão imediatamente e tenta retransmitir o pacote posteriormente (FALUDI, 2010).

4.1.1. Consumo de energia do nó de sensoriamento

Os nós de uma rede de sensores sem fio possuem capacidade energética limitada, a qual depende diretamente de sua bateria. Além disso, muitas vezes os sensores são alocados em áreas remotas, o que dificulta o acesso para manutenção ou troca da bateria. Diante deste contexto, a vida útil da bateria, muitas vezes está ligada, a vida útil de todo dispositivo de sensoriamento, tornando a questão energética primordial para toda a rede (ALVES, 2011).

O tempo de funcionamento de um nó de sensoriamento varia conforme a quantidade de energia existente na bateria. Em aplicações agrícolas e ambientais onde o monitoramento geralmente é feito em regiões remotas é de suma importância que a quantidade de energia da bateria seja o suficiente para a aplicação em questão, portanto, sendo infactível a troca de bateria neste caso, necessitando a utilização de uma bateria com maior carga ou de sistemas para carregar a bateria do nó de sensoriamento, caso contrário uma das principais vantagens da rede de sensores sem fio (mobilidade) seria perdida (KOLOKOTSA et al., 2010).

As principais formas utilizadas para a redução do consumo de energia nos nós são: formação de clusters de sensores, redução da carga computacional no sensor, protocolos eficientes, circuitos de baixo consumo, adormecimento de nós inativos e produção local de energia, com por exemplo, através do uso de células solares (NIKOLIDALIS et al., 2015).

4.2 Os sensores do nó da rede

O sensor é definido como um dispositivo físico capaz de responder, através de sinais elétricos, à estímulos do ambiente. Os sinais elétricos produzidos pelo sensor pode ser na forma de tensão, resistência, corrente ou frequência (SINCLAIR, 2001).

Todo o sensor possui uma diferença entre o valor medido com relação ao valor real, esta relação é chamada de exatidão e representa uma forma de erro que pode variar entre os sensores do mesmo modelo e do mesmo fabricante (SOLOMAN, 2010).

De acordo com Vetelino e Reghu (2011) fundamental no momento da escolha de um sensor, para um determinado projeto eletrônico, observar suas características, ou seja, a forma com que o sensor funciona, isso trará informações importantes para o emprego certo do sensor para determinada aplicação. As características dos sensores podem assim ser resumidas na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1: Descrição das principais características avaliadas nos sensores, quanto ao seu modo de funcionamento e operação, que podem ser fundamentais no momento da escolha do sensor ideal.

Item	Descrição
Exatidão	Erro que o sensor possui com relação a medida real.
Precisão	Repetibilidade do erro do sensor.
Resolução	Menor grandeza física que o sensor consegue medir em um determinado ambiente.
Linearidade	Relação entre o sinal de saída elétrico com a resposta do estímulo do ambiente no qual o sensor está medindo.
Sensibilidade	Relação entre a amplitude de saída com a amplitude de entrada, permitindo estabelecer padrões de conversão do sinal elétrico.
Faixa de atuação	Maior e menor valor do ambiente recebido pelo sensor.
Tempo de resposta	Intervalo de tempo de leitura do ambiente pelo sensor.

Fonte: Vetelino e Reghu (2011).

4.2.1. Sensores térmicos

O monitoramento térmico utilizando sensores de temperatura é uma das aplicações mais usuais no meio agrícola, isso se deve ao fato de que a temperatura do ar influencia diretamente no desenvolvimento vegetal (KITTAS e BARTZANAS, 2007).

Segundo Fraden (2010) os sensores térmicos podem ser divididos em dois grupos quanto ao tipo de sinal de saída. Os sensores analógicos, geralmente são sensores de menor custo e que precisam utilizar o conversor analógico-digital para que suas informações sejam lidas e processadas pelo computador e os sensores digitais, que geralmente possuem um custo maior e os sinais são mais fáceis de serem processados. Cada

um destes tipos de sensores possuem suas características de precisão, exatidão, etc. que variam conforme o modelo e o fabricante. A Figura 4 mostra dois exemplos de sensores de temperatura do ar, a ilustração A mostra o sensor analógico modelo LM35 de baixo custo e confiável, a ilustração B mostra o sensor digital CS490000 que mede simultaneamente a temperatura e a umidade relativa do ar.

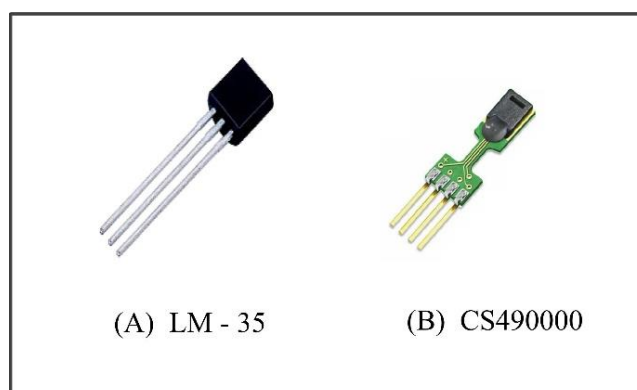


Figura 4: Sensor de temperatura do ar analógico modelo LM35 (A) e sensor de umidade relativa e temperatura do ar digital modelo CS490000 (B).

4.3 Mecanismos de hardware de aquisição de dados

De acordo com Li (2008) os mecanismos de aquisição de dados podem ser definidos como dispositivos eletrônicos capazes de obter, reunir e organizar informações de interesse. Estas informações podem ser dados de temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, etc.

Um mecanismo de aquisição de dados é composto por circuitos condicionadores de sinais, conversores analógicos digitais e programa computacional para o gerenciamento e processamento das informações. O condicionador de sinal é um circuito eletrônico que possui a função de melhorar o sinal, buscando facilitar sua leitura pelo processador ou computador (MORAIS et al., 2008).

Geralmente, os sinais recebidos pelo mecanismo de hardware de aquisição de dados são analógicos, ou seja, sinais elétricos que precisam ser transformados em sinais digitais, para serem processados pelo computador e o mecanismo responsável por esta transformação é o conversor analógico-digital (LATHI, 2004). A Figura 5 mostra o

processo de conversão de um sinal analógico em um sinal digital. Este processo de conversão é realizado pelo conversor analógico-digital.

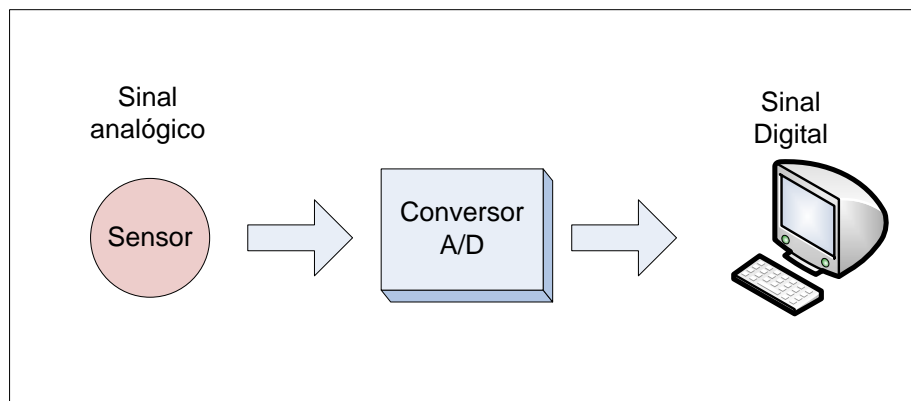


Figura 5: Processo de conversão de um sinal analógico, enviado por um sensor, para um sinal digital para ser processado pelo computador. Procedimento realizado pelo hardware denominado de conversor analógico-digital.

O conversor analógico-digital está presente em grande parte dos instrumentos de medição e ele é a base para o interfaceamento entre o meio analógico e digital. O conversor analógico-digital é representado pelo número de bits, ou seja, geralmente no mercado encontra-se conversores que variam de 8 a 20 bits. Assim, quanto maior a resolução do conversor, maior a sua sensibilidade, pois o número de bits do conversor, representada pela equação abaixo, está sendo dividido pela tensão de referência, que é a tensão de entrada do conversor. A tensão de referência precisa ser um valor mais preciso possível, pois influencia diretamente na resolução do conversor e conseqüentemente no sinal de saída do sensor lido por ele (FRADEN, 2010).

$$\text{Resolução} = \frac{V_{ref}}{2^n} \quad [1]$$

Em que:

V_{ref} : tensão de referência;

n : número de bits do conversor analógico-digital.

4.4 Estado da arte sobre rede de sensores sem fio aplicado no monitoramento ambiental

Este capítulo mostra algumas tendências tecnológicas no estado da arte na área de rede de sensores sem fio, através de uma análise de artigos selecionados realizando uma síntese individual de cada referência bibliográfica.

4.4.1. Aplicação da rede de sensores sem fio no monitoramento térmico do processo de compostagem

O monitoramento térmico utilizando rede de sensores sem fio é uma prática já utilizada em outras áreas da agricultura. A exemplo, num estudo realizado por Casas et al. (2014) utilizou-se uma rede de sensores sem fio com o objetivo de realizar o monitoramento térmico do processo de compostagem em tempo real, pois o grande problema encontrado pelo autor foi monitorar a temperatura do composto em tempo real, visto que a temperatura é um dos principais indicativos para determinar o momento em que a compostagem encontra-se pronta para uso na agricultura. A Figura 6 mostra a tela inicial do software desenvolvido pelo autor para monitorar a temperatura de processos de compostagem.



Figura 6: Tela inicial do software de aquisição de dados térmicos, desenvolvido para monitorar em tempo real a temperatura de processos de compostagem.

Fonte: Casas et al. (2014).

Embora existam outras formas para medir a temperatura da compostagem, a utilização da rede de sensores sem fio tem a vantagem da ausência de fios, o que facilita o manejo do composto. O presente estudo, assim como o realizado pelo autor, possui tendências inovadoras no que diz respeito ao uso da tecnologia sem fio para o monitoramento térmico. A presença de fios podem atrapalhar a movimentação no interior da casa de vegetação, e o uso da rede de sensores permite à ausência do uso de fios e cabos elétricos, facilitando operações e tratos culturais no interior da estrutura.

4.4.2. Uso da rede de sensores sem fio na irrigação de precisão monitorando a umidade do solo num sistema de pivô central para cultura do milho

Aplicações de rede de sensores sem fio na agricultura se torna cada vez mais expressiva. Esta tecnologia auxilia áreas como agricultura de precisão, monitoramento ambiental, irrigação, entre outras. No monitoramento da irrigação, a determinação da umidade do solo é importante no processo de manejo da lâmina d'água a exigida pela cultura a ser aplicada. Nesse sentido Dong; Vuran; Irmak (2013) desenvolveram um sistema de rede de sensores sem fio instalados abaixo da superfície do solo para o monitoramento da umidade na cultura do milho em um sistema envolvendo a irrigação por meio de um pivô central.

O objetivo deste estudo foi criar um sistema de monitoramento da umidade do solo em tempo real totalmente sem fio, onde as informações eram enviadas para um computador central onde foi feito o processamento dos dados e a partir deste ponto fornecendo informações referentes a quanto e quando irrigar a cultura do milho.

O autor observou que havia uma necessidade de irrigar de forma diferente e mais precisa, ou seja, entende-se que cada porção do solo é diferente numa determinada área, sendo assim, a irrigação também é diferente numa área para outra, irrigando conforme a planta necessita é possível economizar água, energia elétrica, e consequentemente, obter maior lucro. A rede de sensores sem fio auxiliou neste estudo, pois as informações coletadas de cada ponto da área são enviadas para um computador central para serem processadas, o que seria impossível numa telemetria convencional, pois há possibilidade de colisão dos dados e perda das informações.

Um dos grandes diferenciais deste trabalho é que envolve a técnica da irrigação de precisão, que procura irrigar a cultura conforme a sua necessidade, com a

aplicação de água em proporções espacialmente variáveis conforme a necessidade da cultura.

O presente estudo, assim como o trabalho citado acima, trata-se do uso da mesma tecnologia, porém o diferencial é o emprego do monitoramento ambiental no interior de casas de vegetação. Observando a variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação e utilizar métodos empíricos para determinar a perda de água pelas plantas (evapotranspiração da cultura) no interior da estrutura e posteriormente irrigar a cultura conforme sua necessidade hídrica diária numa determinada região da casa de vegetação, podendo assim, evitar desperdício de água e energia elétrica, maximizando os lucros com a economia energética e aumento de produtividade.

4.4.3. Uso da rede de atuadores em sistema de irrigação localizada na cultura do morango

Uma rede de sensores sem fio pode ser empregada para várias funções numa determinada área. A exemplo Goumopoulos et al. (2014) utilizou uma rede sem fio de atuadores para controlar válvulas solenoides na irrigação da cultura do morango. A Figura 7 mostra uma rede sem fio empregada como atuador no controle da irrigação do morango. Atuadores sem fio são dispositivos eletrônicos utilizados no controle de processos, como por exemplo, no controle da irrigação.

O autor observou que havia poucos estudos relacionados ao uso de dispositivos sem fio que possuem a função de atuadores em processos de irrigação. O uso de sistemas sem fio para o monitoramento e controle de processos agrícolas é cada vez mais usual. O presente estudo, propõe a utilização da rede de sensores sem fio no monitoramento térmico, que posteriormente poderá servir de base para estudos futuros envolvendo o controle através de nós atuadores sem fio.



Figura 7: Rede de sem fio com a função de atuador para abertura de válvulas solenoides no cultivo em vaso do morango.

Fonte: Goumopoulos et al. (2014).

4.4.4. Utilização de uma rede de sensores sem fio e atuadores na irrigação da uva

Rede de sensores sem fio é uma tecnologia que permite a aquisição de dados e controle processos à distância, a exemplo Coates et al. (2013) desenvolveram um sistema de rede de sensores sem fio para o controle de válvulas solenoides na irrigação numa lavoura de uva, pois constataram que haviam poucos estudos relacionados a aplicação de rede de sensores sem fio no controle de dispositivos agrícolas à distância. Ao todo, foram instaladas no campo 54 válvulas solenoides com um alcance máximo dos nós de 1,6Km.

Neste trabalho desenvolveu-se um sistema de monitoramento da umidade do solo e controle da irrigação, no entanto, o seu grande diferencial foi o desenvolvimento de nós atuadores, que consistiam de válvulas solenoides que acionavam setores específicos na área de irrigação, aumentando o desempenho do sistema e diminuindo custos no sistema de bombeamento. Outro grande diferencial deste trabalho é que as informações e sensoriamento e controle do sistema foram coletadas por um computador central e enviadas para um servidor web remoto, assim as informações poderiam ser vistas e controladas em qualquer lugar do mundo.

Contribuindo com o estudo desenvolvido pelo autor, o presente trabalho também trata da aquisição de dados à distância, no entanto, foi realizado um mapa

de variabilidade espacial das informações recebidas, com o objetivo de avaliar o comportamento da variável em estudo (temperatura do ar) com relação ao tempo e ao espaço.

4.4.5. Uso da rede de sensores sem fio no monitoramento da temperatura e da umidade do solo

A análise dos dados em tempo real coletados de maneira independente na área agrícola, bem como a facilidade da aquisição destes dados, mesmo em locais de difícil acesso são as principais vantagens da rede de sensores sem fio. Majone et al. (2013) implementaram e testaram uma rede de sensor sem fio na análise da umidade e a temperatura do solo no cultivo de maçãs num local íngreme na região alpina de Cles na Itália, mostrando que a uma das vantagens da tecnologia é o monitoramento de áreas de difícil acesso. A área foi dividida em três parcelas que era submetida a diferentes tratamentos conforme os valores de umidade do solo coletados pelos sensores.

A rede de sensores foi composta de 135 sensores de umidade do solo instalados nas profundidades de 10, 20, 30, 50 e 80cm e 27 sensores de temperatura do solo instalados numa profundidade de 20cm que coletavam os dados em tempo real e enviados para um computador central. O objetivo deste trabalho foi avaliar a dinâmica da umidade e temperatura do solo na camada superficial, bem como a variabilidade espacial e temporal destas variáveis naquelas condições de clima e solo.

Os autores observaram que a empregabilidade da rede de sensores no monitoramento destes parâmetros auxilia na coleta de informações de à distância, em tempo real e em áreas de difícil acesso. Entretanto, para obter uma medida confiável é necessário que os erros sejam corrigidos objetivando dados mais confiáveis para o monitoramento e nas tomadas de decisão. No presente, estudo foi realizado uma calibração individual dos sensores buscando a aquisição dos dados térmicos mais confiáveis.

4.4.6. Uso da rede de sensores sem fio como atuadores em sistema de irrigação localizada na cultura do morango

Com o avanço tecnológico as redes de sensores sem fio vão se associando a outras tecnologias eletrônicas e computacionais já existentes, a exemplo, Li et al. (2014) desenvolveram, implantaram e testaram um sistema de rede de sensores sem fio

associado a tecnologia 3G, que é uma tecnologia de telefonia móvel de longo alcance que envia dados através do uso de um modem de celular. O trabalho consiste no desenvolvimento de uma rede de sensores sem fio no monitoramento de parâmetros físicos do solo, como, umidade, temperatura e condutividade elétrica.

O objetivo deste estudo foi desenvolver um sistema para aquisição de informações oriundas da rede de sensores que tenha um longo alcance de transmissão. Para isso, a arquitetura da rede operava enviando as informações para um nó de sensoriamento central, denominado de coordenador, que por sua vez, enviava as informações dos nós para um modem de celular que enviava todos os dados para um computador central.

Foi avaliado o erro referente à taxa de transmissão dos dados, efetuando a contagem do número de pacotes de dados que chegaram errados ao computador central, desta forma aferindo a qualidade e confiabilidade do sistema desenvolvido. Os dados mostram que a taxa de erro foi de 5%, comprovando sua implementação em aquisição de dados em determinados tipos de monitoramento agrícola onde esta taxa de erro não interfere no sistema. No presente estudo, também foi avaliado o erro recorrente do processo de transmissão de dados. Esses erros foram corrigidos via software e os pacotes de dados com erros foram descartados.

4.4.7. Rede de sensores sem fio aplicados no monitoramento ambiental de casas de vegetação

A utilização da rede de sensores sem fio no monitoramento ambiental no interior de casas de vegetação é uma tecnologia promissora. A exemplo Srbinovska et al. (2015) desenvolveram uma rede de sensores para o monitoramento de parâmetros físicos como, luminosidade, temperatura e umidade relativa do ar no interior de casas de vegetação cultivadas com pimentão, visto que estes parâmetros influenciam diretamente o desenvolvimento vegetal. Foi constada que existiam poucas tecnologias de baixo custo que poderiam ser empregadas neste tipo de aplicação. A Figura 8 mostra a casa de vegetação utilizada no estudo a arquitetura básica da rede de sensores empregada no trabalho.

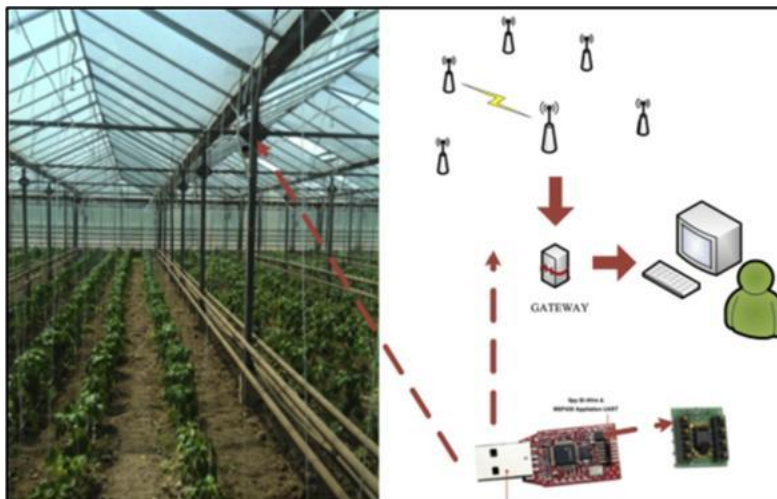


Figura 8: Casa de vegetação e arquitetura básica do sistema de rede de sensores sem fio utilizado no trabalho.

Fonte: Srbinovska et al. (2015).

Foram distribuídos sensores de temperatura, umidade relativa e luminosidade em 5 pontos no interior da casa de vegetação monitorando os dados em tempo real pelo computador central, que processava e armazenava as informações da rede.

Assim como o trabalho do autor, o presente estudo busca desenvolver uma rede de sensores sem fio de baixo custo e de fácil operação, o que facilita a difusão da tecnologia e simplifica a utilização do sistema pelo usuário final. No entanto, o trabalho utilizou poucos pontos de amostragem, o que limita a realização de uma análise da distribuição espacial das variáveis físicas medidas. No presente estudo, será utilizado um total de 15 pontos distribuídos de forma sistemática no interior da casa de vegetação, o que permite estudos do comportamento climático em cada ponto no interior da estrutura.

4.4.8. Validação de informações de temperatura e umidade relativa do ar de casas de vegetação utilizando rede de sensores sem fio

As informações coletadas por uma rede de sensor sem fio precisam ser confiáveis, ou seja, é necessário que o usuário tenha dados que permitam a tomada de decisão garantindo que as informações coletadas pelo computador central esteja livre de erros. A Figura 9 mostra o detalhe da casa de vegetação do estudo e o nó de sensoriamento para o monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar.

Embora todo o sistema de sensoriamento possuir algum tipo de falha de leitura, este erro precisa de certa forma ser corrigido através de circuitos condicionadores de sinais ou via software.

A exemplo, Wang et al. (2015) realizaram o monitoramento e a validação de informações de temperatura e umidade relativa do ar para um sistema de rede de sensores sem fio em casas de vegetação. Os autores destacam a importância da realização da correção do erro dos sensores de monitoramento de parâmetros físicos e da importância destes dados no desenvolvimento vegetal visto que existem poucos estudos empregando a correção de sensores de temperatura e umidade relativa do ar no interior de casas de vegetação.

O presente estudo, comparado com o trabalho dos autores, leva em consideração a correção do erro individual de cada sensor de temperatura do ar com base no erro médio de cada sensor, assim, obtendo informações mais confiáveis para estudos científicos ou para tomadas de decisão.



Figura 9: Casa de vegetação e nó da rede de sensor utilizado no estudo para validação das informações de temperatura e umidade relativa do ar.

Fonte: Wang et al. (2015).

4.4.9. Uso da telemetria no monitoramento de parâmetros físicos em casas de vegetação

A utilização de tecnologias para o monitoramento ambiental é crescente. A exemplo, Rahali et al. (2015) mostra o desenvolvimento e implementação de um sistema de aquisição de dados utilizando a tecnologia GSM (Global System for Mobile communication) para realizar a aquisição de dados à distância de temperatura, umidade relativa do ar e umidade do solo. A Figura 10 mostra a arquitetura básica do sistema de aquisição de dados desenvolvido para o monitoramento de parâmetros físicos em casas de vegetação.

Os autores evidenciaram que existem poucos estudos empregadas no monitoramento à distância em áreas agrícolas e, por este motivo criaram esse sistema que contribui para estudos científicos e para tomadas de decisão no processo produtivo.

Embora o trabalho apresente características inovadoras, o sistema de aquisição de dados utilizando a tecnologia GSM apresenta um custo maior quando comparado com o sistema adotado no presente trabalho.

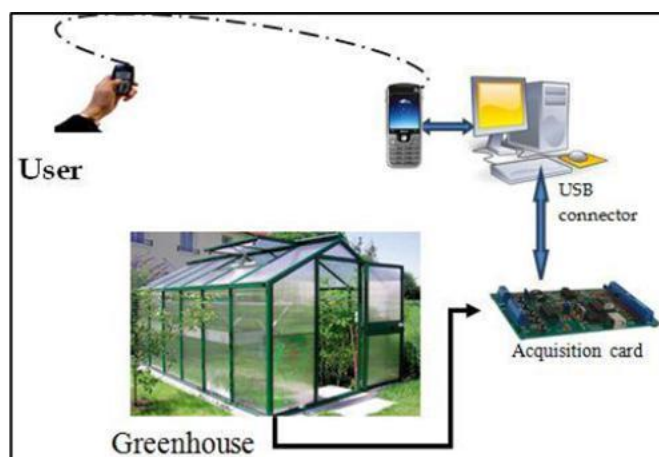


Figura 10: Arquitetura básica do sistema GSM (Global System for Mobile communication) utilizado para realizar a aquisição de dados à distância da temperatura, umidade relativa do ar e umidade do solo.

Fonte: Rahali et al. (2015).

4.4.10. Rede de sensores sem fio no monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar no interior de casas de vegetação utilizando o protocolo de comunicação ZigBee

Num modelo de agricultura de precisão, monitoramento das informações se torna de grande importância, os dados são essenciais para um modelo de agricultura econômica e sustentável. Neste contexto, Gomes et al. (2015) desenvolveram um sistema de rede de sensores sem fio para o monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar em casas de vegetação utilizando um protocolo de comunicação de rede denominado de ZigBee. A Figura 11 mostra o nó de sensor desenvolvido para o monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar (à esquerda), podendo ser acoplado à uma placa solar que carregará a bateria de lítio (à direita) para alimentar a placa de circuito do nó.

Os autores perceberam que haviam poucos estudos realizados com o emprego do protocolo de comunicação ZigBee no monitoramento de parâmetros físicos na agricultura e isso os motivaram a realizar em trabalho. Este estudo mostra que o autor desenvolveu a tecnologia, porém não realizou nenhum teste prático de monitoramento no interior de uma casa de vegetação real. O presente estudo leva em consideração testes práticos envolvendo a instalação de sensores no interior destas estruturas, pois haja visto que o ambiente agrícola pode ser hostil, ou seja, em alguns casos é preciso que o sistema desenvolvido seja mais robusto para suportar as adversidades do ambiente na qual a rede está instalada.

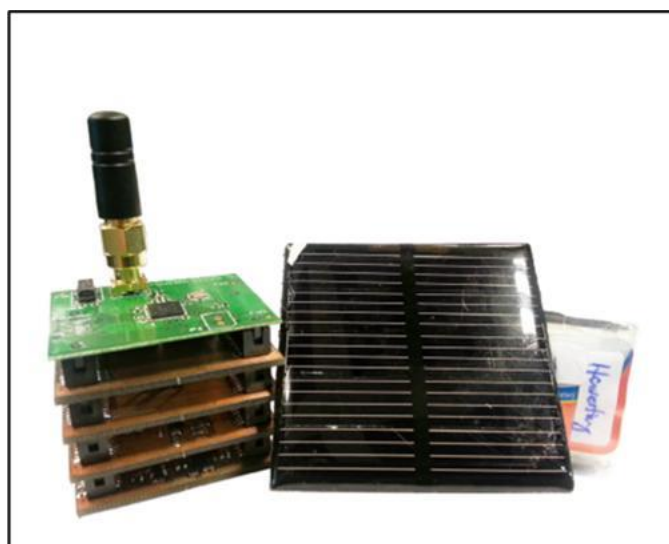


Figura 11: Nó de sensor sem fio desenvolvido no trabalho (esquerda), neste hardware é possível conectar um painel solar para carregar uma bateria de lítio (direita).

Fonte: Gomes et al. (2015).

4.4.11. Rede de sensores sem fio no monitoramento

A agricultura de precisão é baseada em informações e tecnologia, o uso da rede de sensores sem fio contribui para aquisição de informações que são importantes para o agricultor tomar decisões no cultivo. A exemplo, Carrascosa et al. (2015) desenvolveram uma rede de sensores sem fio para o monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar. A rede recebia o sinal de sensores de temperatura e umidade relativa do ar, os modelos de sensores utilizados no estudo foram, o LM-35 (sensor de temperatura analógico), DS18B20 (sensor de temperatura digital) e DTH22 (sensor de temperatura e umidade relativa do ar digital). A Figura 12 mostra o interior da caixa que representa o nó de sensor desenvolvido no trabalho, onde estão localizados o sensor, o microcontrolador e a bateria.



Figura 12: Nó de sensor desenvolvido para monitorar a temperatura e umidade relativa do ar.

Fonte: Carrascosa et al. (2015).

Um diferencial deste trabalho perante os demais é o uso de uma tecnologia chamada de código aberto, utilizando uma placa de aquisição e processamento dos dados denominada de Arduino, ou seja, com esta placa é possível programar e configurar a rede para exercer outras funções sem nenhum custo adicional. Assim, pelo Arduino possuir código aberto é possível adaptar o código fonte para outras aplicações, obtendo maior opções para o uso da rede.

Igualmente ao trabalho de Carrascosa et al. (2015), o presente estudo também utiliza o Arduino como substituto ao microcontrolador do nó de sensor, favorecendo outras aplicações a rede visto que esta tecnologia é de código aberto, ou seja, é possível implementar novos sensores ou novas funções à rede sem grandes dificuldades técnicas.

4.4.12. Rede de sensores sem fio no controle da irrigação e uso de modelos matemáticos para estimativa da evapotranspiração da cultura

O monitoramento e controle de processos agrícolas diminui custos relacionados à mão de obra e melhora o gerenciamento da propriedade. Num trabalho realizado por Cancela et al. (2015) avaliou um sistema automático para controle da irrigação num cultivo de uvas utilizando rede de sensores sem fio.

O trabalho conta com uma rede de dispositivos atuadores dotados de válvulas solenoides distribuídos sistematicamente em talhões na plantação. Para determinação da quantidade e do momento certo para aplicar a água na cultura, os autores estimaram a evapotranspiração através de métodos empíricos utilizando modelos matemáticos, tendo como entrada ao modelo, informações de uma estação climatológica do local.

O objetivo principal do estudo foi criar uma tecnologia que facilita o processo de automação no controle da irrigação e também o uso de modelos matemáticos que indica o momento e a quantidade de água a ser aplicada na cultura.

Este estudo foi motivado pela falta de pesquisas referentes ao emprego de uma rede de sensores sem fio na automatização do processo de irrigação. Igualmente ao estudo dos autores, o presente estudo utiliza métodos empíricos através de

equações matemáticas para estimativa da evapotranspiração potencial, utilizando também como ferramenta a rede de sensores sem fio.

4.4.13. Utilização do protocolo de comunicação ZigBee no controle da irrigação

Uma dos fatores que influenciam no manejo da irrigação é a determinação da quantidade de água que realmente a necessita ser aplicada na cultura. Diante deste fato Pacheco et al. (2014) desenvolveram um sistema supervisorio de aquisição de dados (SCADA) utilizando rede de sensores se fio com protocolo de comunicação ZigBee.

O sistema consiste na aquisição de dados de uma estação climática automática pelo computador central onde os dados são processados sendo determinada a evapotranspiração da cultura. As informações são enviadas para o sistema SCADA que envia os dados para o nó atuador que efetua o controle da irrigação através do uso de válvulas solenoides. A Figura 13 mostra o nó de sensoriamento do sistema supervisorio de aquisição de dados desenvolvido.

O objetivo do estudo foi criar uma tecnologia que permite o controle de sistemas de irrigação com informações de uma estação climática com o uso de rede de sensores sem fio.

Embora o trabalho de Pacheco et al. (2014) seja legitimo e original, o custo do sistema de modo geral é elevado. O presente estudo utiliza sensores de temperatura do ar de baixo custo para determinação da evapotranspiração potencial para posteriormente realizar a determinação da lâmina d'água a ser aplicada na cultura.

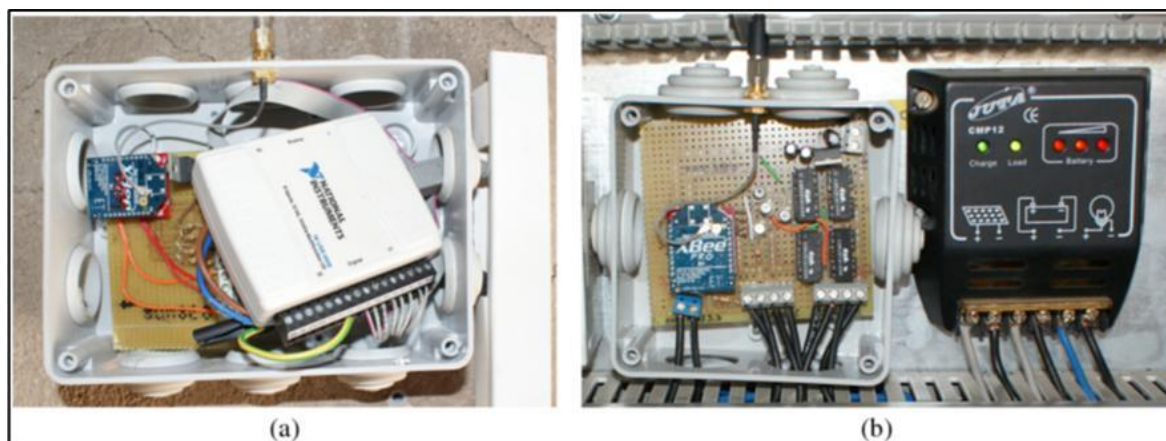


Figura 13: Nó de sensor do sistema supervisorio de aquisição de dados, coordenador da rede (a) onde os dados são recebidos e processados; monitor de pressão e controlador de válvulas solenoides acoplado à um controlador de carga para uso de painéis fotovoltaicos (b).

Fonte: Pacheco et al. (2014).

4.4.14. Aplicação de redes de sensores sem fio no monitoramento da umidade do solo e controle da irrigação

A utilização de redes de sensores sem fio no monitoramento e controle da irrigação é uma importante ferramenta ao agricultor, pois além de facilitar o manejo, evita o desperdício de água e energia elétrica, tornando a irrigação uma atividade mais sustentável sobre o ponto de vista econômico e sustentável. A exemplo, Nikolidakis et al. (2015) desenvolveram uma rede de sensores sem fio para o monitoramento da umidade do solo e controle da irrigação. Foram distribuídos sensores de umidade do solo numa área de estudo, as informações dos sensores enviadas para uma estação base que recebam os dados e enviava as informações para um provedor web, que por sua vez, pode ser acessado em qualquer local que tenha acesso à internet. A Figura 14 mostra a arquitetura básica do sistema desenvolvido para o monitoramento da umidade do solo e controle da irrigação.

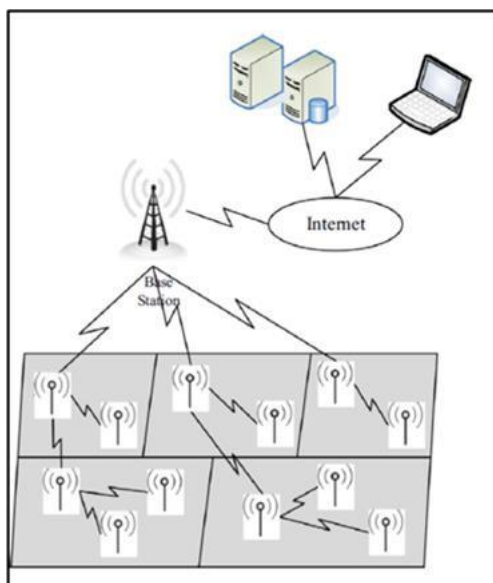


Figura 14: Arquitetura do sistema de rede de sensores sem fio desenvolvida para o monitoramento da umidade do solo e controle da irrigação.

Fonte: Nikolidakis et al. (2015).

A determinação da umidade do solo com o uso de sensores de pode apresentar um maior custo de implantação, pois geralmente são sensores mais caros e de difícil calibração. No presente será utilizado sensores de temperatura do ar de baixo custo para a determinação da evapotranspiração e posteriormente a quantificação da lâmina de irrigação.

4.4.15. Estudo do comportamento climático no interior de diferentes tipos de casas de vegetação

O estudo do comportamento climático no interior de uma casa de vegetação é tema de vários estudos, pois o clima neste ambiente influencia diretamente o desenvolvimento, produção e incidência de pragas e doenças nas culturas. Neste contexto, Çakir e Sahin (2015) desenvolveram estudos e modelos para avaliar o comportamento ambiental de variáveis como a temperatura do ar e radiação solar no interior de diferentes tipos de estruturas de casas de vegetação. A Figura 15 mostra os diferentes tipos de casas de vegetação utilizadas no estudo do comportamento climático.

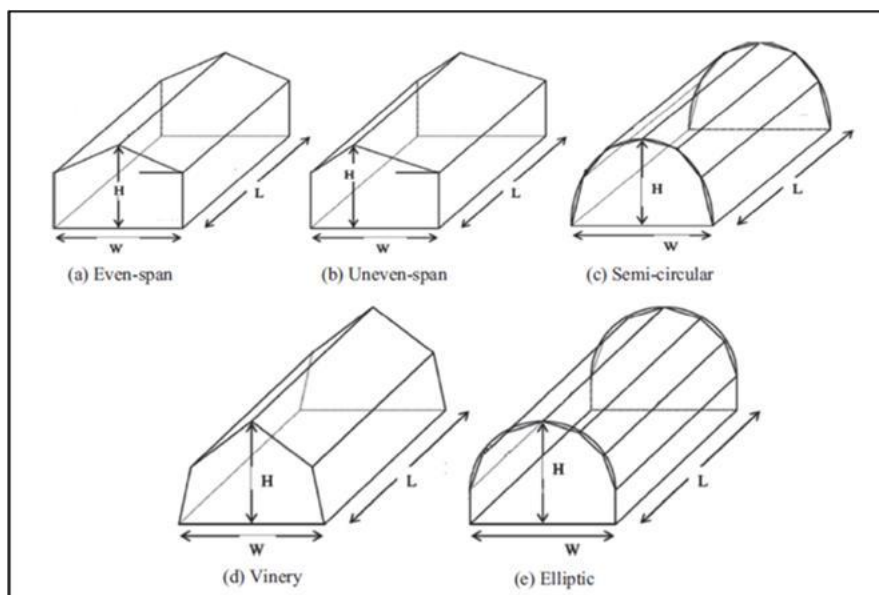


Figura 15: Tipos de casas de vegetação utilizadas no estudo do comportamento da temperatura do ar e radiação solar.

Fonte: Çakir e Sahin (2015).

O objetivo deste estudo foi criar modelos matemáticos e simulá-los em diferentes situações, com o propósito de avaliar o comportamento da temperatura do ar e da radiação solar no interior de diferentes tipos de casas de vegetação.

As informações coletadas durante este estudo foram realizadas manualmente utilizando instrumentos de medição de sistemas de aquisição de dados. O presente trabalho, estuda o comportamento térmico no interior destas estruturas utilizando uma tecnologia sem fio, que possibilita a coleta dos dados de temperatura do ar simultaneamente em vários pontos.

5 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado a descrição dos principais materiais utilizados no trabalho, tais como o software e o hardware. E a metodologia utilizada no desenvolvimento do sistema de rede de sensores e nos testes envolvendo a aplicação prática da tecnologia desenvolvida.

5.1 Características do módulo de rádio XBee

O módulo de rádio é um dos principais componentes da rede. Neste trabalho, optou-se por utilizar módulos que seguem o protocolo de comunicação ZigBee. O protocolo é uma normatização para o uso de rede de sensores sem fio para o controle e aquisição de dados. O protocolo ZigBee também é conhecido como IEEE 802.15.4 que foi desenvolvido pelo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). O padrão constitui de três tipos de dispositivos, que são: coordenadores, roteadores e dispositivos finais.

No trabalho utilizou o modelo comercial denominado XBee, fabricados pela Digi®, que é operado com o padrão de comunicação descrito acima. A Figura 16 mostra os diferentes modelos de módulos de rádio.

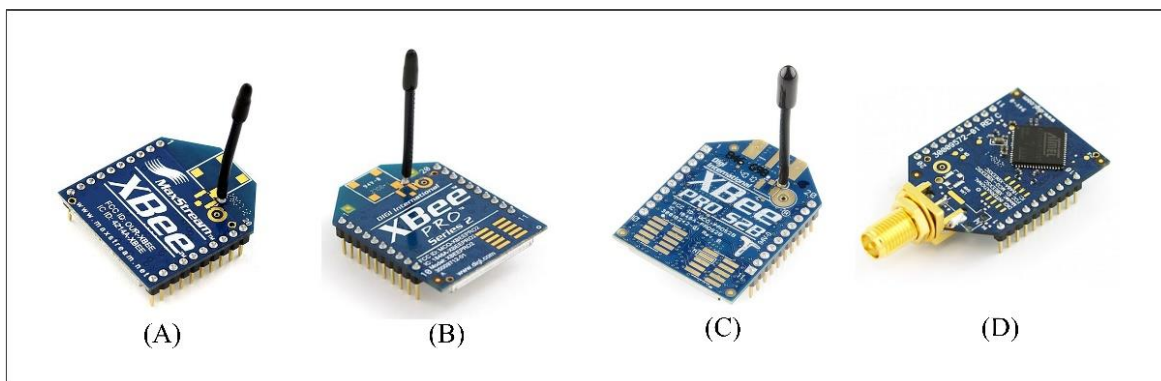


Figura 16: Diferentes modelos de módulos XBee que podem ser utilizados em aplicações agrícolas, a ilustração C apresenta o modelo utilizado no estudo.

A Figura 16 mostra diferentes modelos do módulo XBee, sendo que fisicamente seguem exatamente o mesmo padrão, porém se diferenciam em relação ao alcance da transmissão de dados. No presente trabalho foi usado o modelo XBee Pro S2B que possui um alcance na ordem de 1,6 quilômetros, representado na Figura 16 C.

A Figura 17 mostra com mais detalhes a vista superior e inferior do modelo XBee Pro S2B utilizado no desenvolvimento dos nós de sensor da rede de sensores sem fio.



Figura 17: Vista superior e inferior do XBee PRO S2B utilizado durante os testes, o item 1 mostra o modelo do XBee que é o XBP24BZ7, o item 2 mostra o endereço individual do módulo que é 0013A200 4066BAD9.

A Tabela 2 mostra as características e particularidades de cada modelo apresentado na Figura 16.

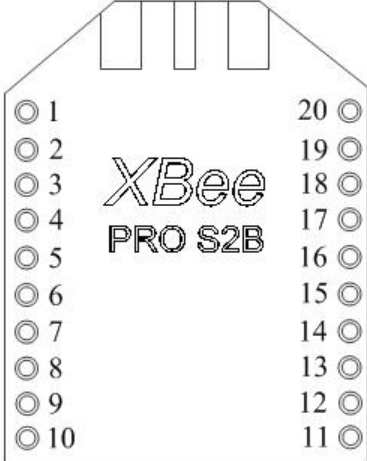
Tabela 2: Principais características operacionais de diferentes modelos de módulos XBee mais utilizado em aplicações agrícolas.

Especificações	XBee	XBee PRO (S2)	XBee PRO (S2B)	XBee PRO XSC (900MHz)
Alcance em ambientes internos	40m	60 à 90m	60 à 90m	370m
Alcance em ambientes externos	120m	1500 à 3200m	1500 à 3200m	9600 à 24000m
Potência de saída	2 mW	50 mW	63 mW	100 mW
Sensibilidade do receptor	92 dBm	102 dBm	102 dBm	106 dBm
Frequência de operação	2.4GHz	2.4GHz	2.4GHz	900MHz
Taxa de dados	250000bps	250000bps	250000bps	10240bps
Tensão de alimentação	2.1 à 3.6V	3.0 à 3.4V	2.7 à 3.6V	3.0 à 3.6V
Corrente de transmissão	40mA	295mA	220mA	265mA
Corrente de recepção	40mA	45mA	62mA	65mA
Corrente em modo Sleep	1µA	3.5µA	3.5µA	50µA
Dimensões	2.438cmX2.761cm	2.438cmX3.294cm	2.438cmX3.294cm	2.438cmX3.294cm
Peso	3g	3g	3g	5 à 8g (dependendo da antena)
Temperatura de operação	40 à 85°C	40 à 85°C	40 à 85°C	40 à 85°C
Opções de antena	Chip, Wire, U.FL., RPSMA	Chip, Wire, U.FL., RPSMA	Chip, Wire, U.FL., RPSMA	U.FL., RPSMA
Número de canais	16	14	15	25
Topologia de rede	ponto-a-ponto, ponto-a-multiponto, par-a-par e malha.	ponto-a-ponto, ponto-a-multiponto, par-a-par e malha.	ponto-a-ponto, ponto-a-multiponto, par-a-par e malha.	ponto-a-ponto, ponto-a-multiponto, par-a-par.

No trabalho selecionamos o modelo XBee Pro S2B por possuir características como um alcance de transmissão na ordem de 1,6 km e baixo custo consumo de energia na ordem de 220mA em módulos configurados para transmissão e 62mA em módulos configurados para recepção de dados.

Assim como o modelo selecionado para o desenvolvimento do nó da rede de sensor sem fio, os outros modelos de rádio também podem ser facilmente adaptados a rede, pois a maioria deles, exceto o XBee Pro XSC, possuem frequência de transmissão de 2,4GHz.

Outra característica é que os módulos possuem a mesma disposição de pinos (pinagem) o que facilita o processo de nós de sensor sem fio com diferentes características, dependendo do modelo de módulo XBee utilizado no projeto. A Figura 18 mostra a disposição dos pinos do XBee e suas respectivas funções com a descrição de cada uma delas.



Pino	Nome	Descrição
1	VCC	Alimentação 3,3V
2	DOUT	Saída de dados UART
3	DIN/CONFIG	Entrada de dados UART
4	DO8	Saída digital 8
5	RESET	Inicializa o módulo
6	PWM0/RSSI	Saída do PWM 0
7	PWM1	Saída do PWM 1
8	(RESERVADO)	Não tem função definida
9	DTR/SLEEP_IRQ/DI8	Função sleep ou entrada digital 8
10	GND	Terra
11	AD4/DIO4	Entrada analógica 4 ou entrada/saída digital 4
12	CTS/DIO7	Controle de fluxo CTS ou entrada/saída digital 7
13	ON/SLEEP	Indicador de estado do módulo
14	VREF	Tensão de referência para o conversor A/D
15	Associação/DIO5	Indicador de associação ou entrada/saída digital 5
16	RTS/AD6/DIO6	Controle de fluxo RTS ou entrada/saída digital 6
17	AD3/DIO3	Entrada analógica 3 ou entrada/saída digital 3
18	AD2/DIO2	Entrada analógica 2 ou entrada/saída digital 2
19	AD1/DIO1	Entrada analógica 1 ou entrada/saída digital 1
20	AD0/DIO0	Entrada analógica 0 ou entrada/saída digital 0

Figura 18: Funções com o nome e descrição de cada pino do módulo XBee, a disposição dos pinos são semelhantes entre os modelos de rádio, o que facilita o desenvolvimento de nós de sensor com características diferentes sem comprometer o projeto.

A antena é parte constituinte de todo o módulo de rádio. Nos diferentes modelos de módulos XBee existem diferentes tipos de antenas, na qual o consumidor poderá optar de acordo com o seu projeto. Na Figura 19 apresenta os quatro modelos de antena dos módulos XBee, a antena do tipo chip é integrada a placa do módulo poupando espaço, no entanto, por possuir este formato ela pode perder alcance. A antena do tipo wire é a mais comum, pois além de ser pequena não possui perda significativas de alcance.

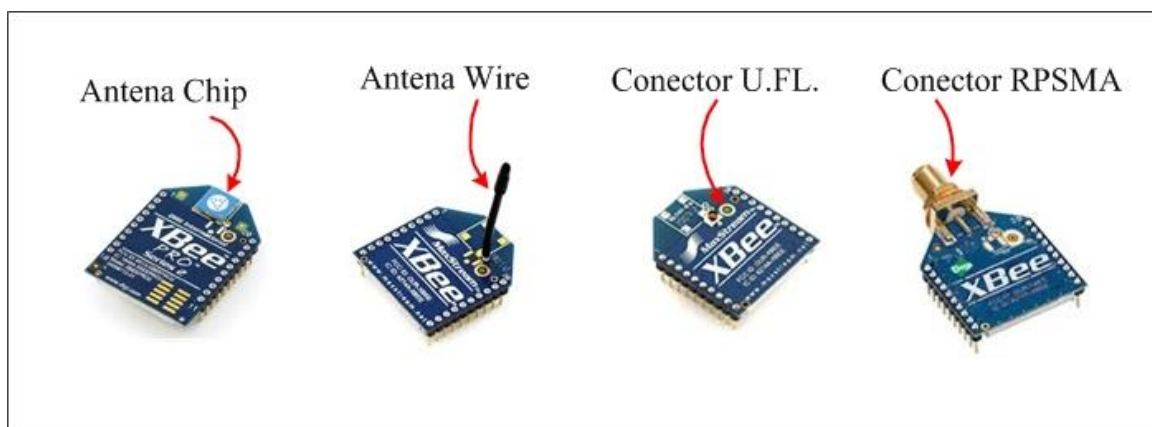


Figura 19: Diferentes tipos de antenas dos módulos XBee, destacando a antena do tipo wire, utilizada durante o teste.

A frequência utilizada em estudo foi a de 2,4GHz que é o padrão para o Brasil de acordo com a Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) para este tipo de módulo de rádio.

O sistema foi operado com apenas um canal, mas ele pode ser configurado para operar em até 15 canais. A Tabela 3 mostra as diferentes frequências do protocolo ZigBee (Padrão IEEE 802.15.4) para diferentes regiões do planeta. De acordo com o protocolo, a frequência global é de 2,4GHz e em algumas regiões a legislação permite sua operação em outras frequências pré-estabelecidas.

Tabela 3: Diferentes frequências do protocolo ZigBee utilizadas no mundo e seus respectivos números de canais e taxa de transmissão de dados.

Padrão	Frequências	Uso	Número de Canais	Taxa de Transmissão
802.15.4	2,4 a 2,4835 GHz	Global	16	250 kbps
	868 a 870 MHz	Europa	1	20 kbps
	902 a 928 MHz	América	10	40 kbps

A rede de sensor sem fio foi configurada para operar num sistema de malha, portanto, o nó central que recebe as informações da rede e manda via USB para o computador foi configurado como Coordenador, pois possui a função de gerenciar e toda a rede. Os nós remoto, ou seja, o nó no qual estão os sensores de temperatura do ar, foram configurados para operar como Roteador. A Tabela 4 descreve as funções e cada elemento da rede de sensores sem fio seguindo o protocolo de comunicação ZigBee.

Tabela 4. Tipos de dispositivos e funções de uma rede de sensor sem fio operando no protocolo de comunicação ZigBee.

Dispositivo	Dispositivo físico associado ao IEEE	Função
Coordenador	FFD	Gerencia a rede e atribuem endereços. Existe apenas um por rede.
Roteador	FFD	Reúne os nós de sensoriamento, aumentando o alcance físico, faz o encaminhamento dos dados com um repetidor. A existência é opcional.
Dispositivo Final	RFD ou FFD	Efetua o controle e o monitoramento de parâmetros físicos. Pode operar em modo <i>Sleep</i> .

No total foram utilizados um módulo ZigBee Coordenador e dois módulos XBee Roteador. Cada um dos módulos roteador possuía entrada para 8 sensores de temperatura do ar modelo LM35.

Na configuração dos módulos de rádio XBee é utilizado um comando serial enviado diretamente ao dispositivo, este comando é denominado de comando AT. O comando de configuração possui um padrão que é iniciado pelo prefixo “AT”, depois um comando que designa a função, em seguida um parâmetro de configuração, que dependendo da função ele é opcional. A Figura 20 mostra o padrão de comunicação denominado de comando AT para configuração do módulo de rádio XBee.

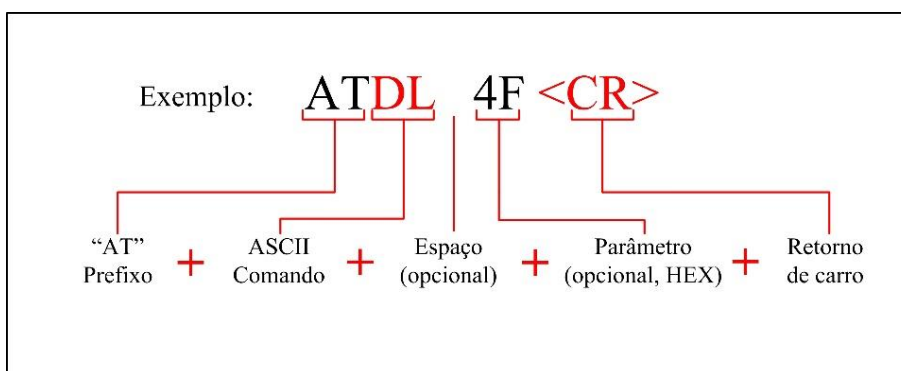


Figura 20: Padrão de uma string utilizada num comando AT para configuração dos módulos XBee.

Na configuração do módulo de rádio a própria empresa fabricante disponibiliza aos usuários um software de configuração denominado de X-CTU. Este software é completo e fornece todas as configurações possíveis ao módulo de rádio XBee.

O processo de configuração se torna mais simples exigindo pouco conhecimento específico de programação computacional.

A Figura 21 mostra a tela inicial do software X-CTU. No item 1 é apresentado as funções de configuração do computador, como por exemplo, a comunicação serial; a aba no item 2 mostra o teste de alcance de transmissão; onde é possível verificar a performance do sinal de rádio; o item 3 mostra terminal de configuração em modo AT, como já descrito na Figura 20; no item 4 mostra a configuração do módulo, onde é possível determinar as funções do módulo de rádio; o item 5 mostra a serial ativa, ou seja, a conectada ao módulo XBee; o item 6 apresenta a configuração da porta serial, com as opções de taxa de transmissão, controle de fluxo de dados, bit de dados, paridade, e bit de parada; o item 7 mostra o botão de configuração da serial e no item 8 a ativação do modo API.

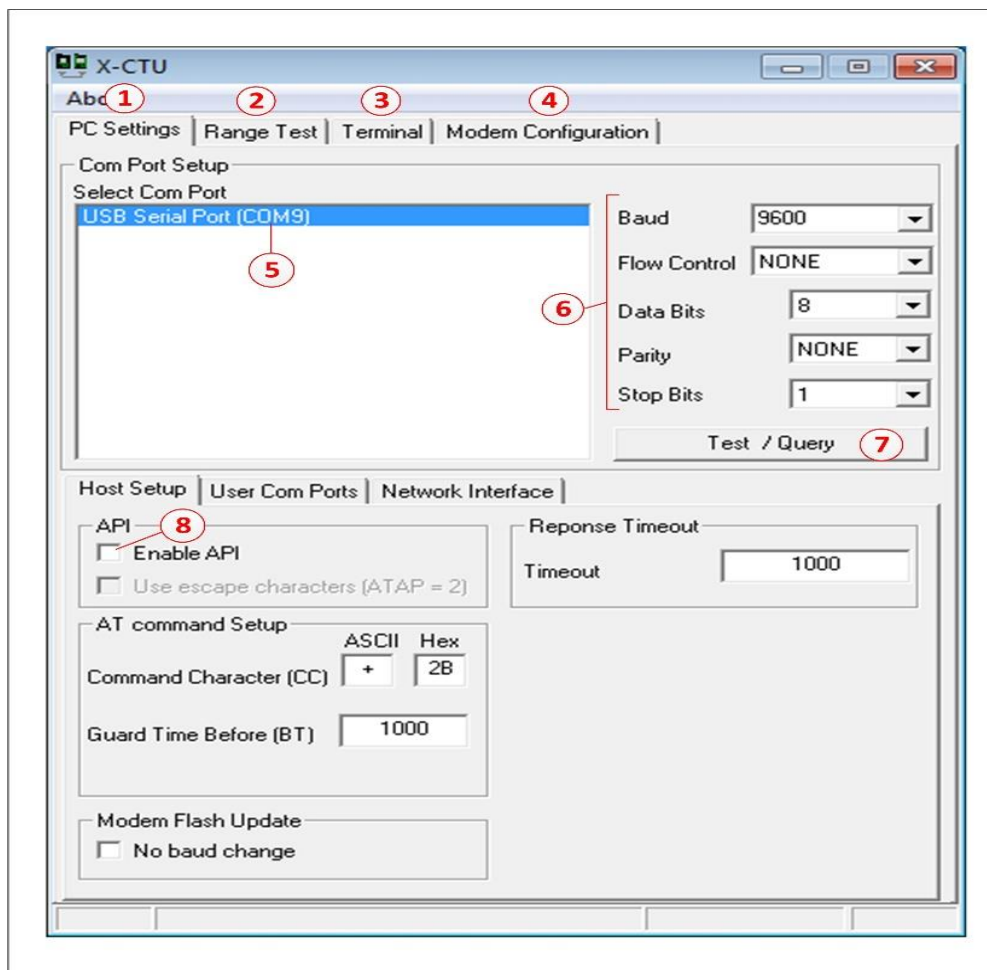


Figura 21: Tela inicial do software X-CTU, com as funções de configuração do computador (1); teste de alcance de transmissão (2) terminal de configuração em modo AT; configuração do módulo; serial ativa (5); configuração da porta serial (6) botão de configuração da serial (7) e ativação do modo API (8).

Com o software X-CTU é possível configurar os módulos XBee de maneira fácil e rápida utilizando a guia Modem Configuration. A Figura 22 mostra a guia Modem Configuration habilitada.

Na Figura 22 (1) mostra a o botão Ler, através dele é possível identificar os parâmetros dos módulos de rádio conectado, caso a porta serial estiver ativa. A Figura 22 (2) apresenta o botão Write, que tem como função gravar as configurações que foram pré-estabelecidas na Figura 22 (6).

Na Figura 22 (3) mostra o modelo do módulo de rádio Xbee e na Figura 22 (5) sua função, podendo assumir o papel de coordenador, roteador ou dispositivo final. Na Figura 22 (4) mostra o botão no qual é possível baixar uma nova versão atualizada

de firmware para o XBee, ou seja, atualizando é possível corrigir problemas que podem ocorrer com os módulos de rádio.

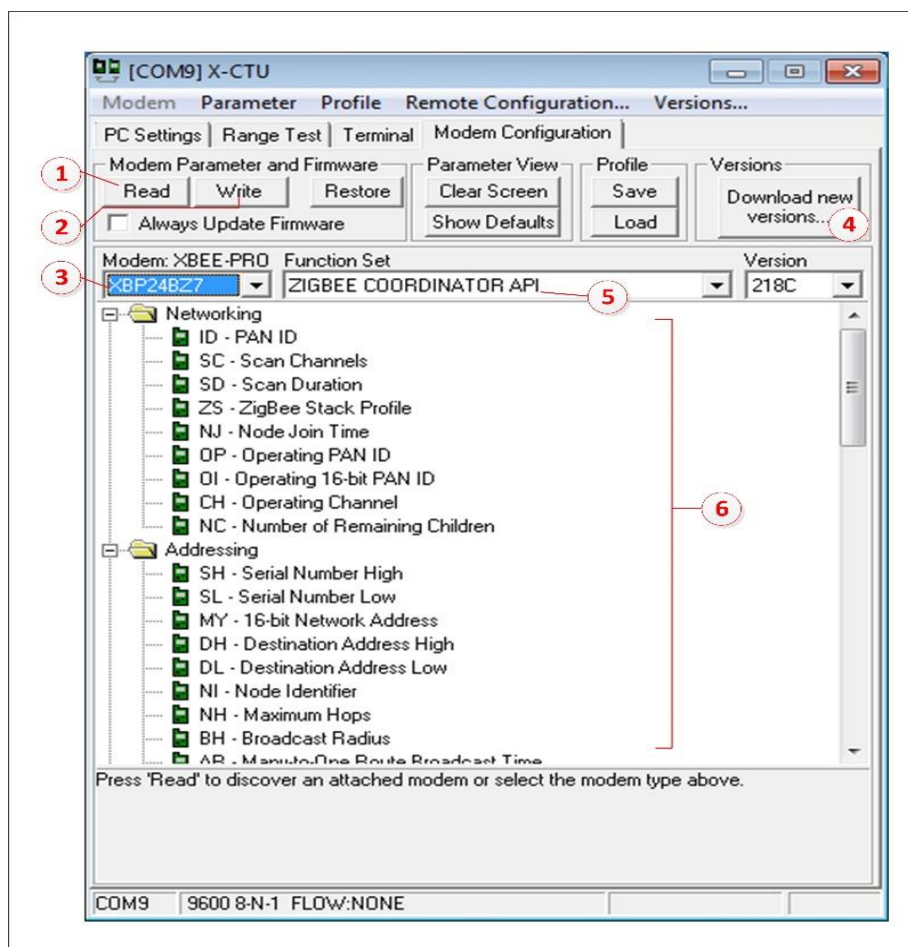


Figura 22: Tela de configuração do software X-CTU com a aba Modem Configuration ativa com a função de ler os parâmetros do módulo (1); gravar as configurações (2); escolher o modelo do módulo de rádio (3); atualizações das versões (4); função do módulo (5) e parâmetros de configuração (6).

O software X-CTU possui a opção de configuração dos módulos de rádio através de comandos AT, como já foi descrito na Figura 20. O comando AT são linhas de código que possuem a função de configurar os módulos através de comandos.

A Figura 23 mostra a tela do software X-CTU com a aba Terminal habilitada. A Figura 23 (1) mostra o botão Close Com Port responsável por fechar a porta de comunicação serial e encerrar a transferência de dados. Na Figura 23 (2) observa-se o botão Clear Screen que tem a função de limpar toda a tela de comando AT da Figura 23 (4). Na Figura 23 (3) toda a tela de comando pode ser apresentada em hexadecimal, que é uma maneira de representar as informações do código.

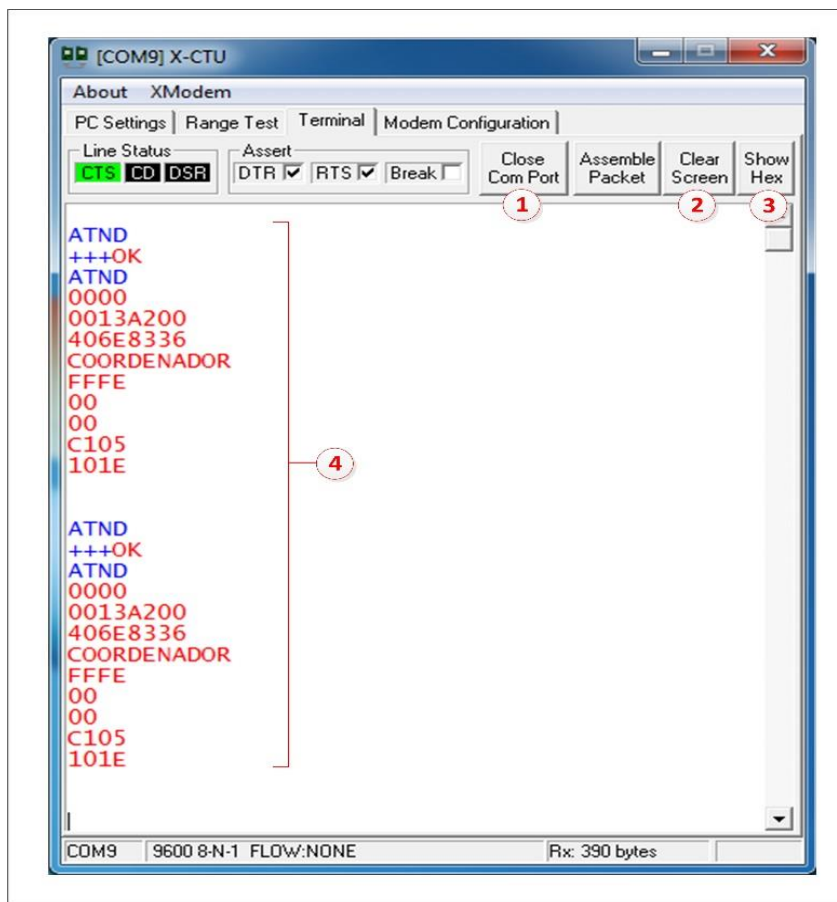


Figura 23: Tela do software X-CTU habilitado o modo de configuração através do comando AT, a ilustração 1 mostra o botão responsável por fechar a porta de comunicação serial, a ilustração 2 mostra o botão de limpar a tela, o ilustração 3 mostra o botão responsável por apresentar os comandos em hexadecimal e a ilustração 4 mostra a tela de comando AT com uma função de exemplo.

Pode-se concluir que o XBee é um módulo de fácil configuração, pois utiliza uma plataforma de programação própria e gratuita. Através do uso do software X-CTU é possível habilitar qualquer função do módulo. Outra vantagem é que existem vários modelos de XBee no mercado nacional, que possuem a mesma forma de configuração e a mesma disposição de pinos, o que facilita novas e futuras aplicações, permitindo, por exemplo, aumentar o alcance do módulo sem alterar o projeto eletrônico.

5.2 Particularidades do sensor LM35

Esta seção descreve o sensor de temperatura modelo LM35 que foi utilizado no presente trabalho para formar o sistema de monitoramento térmico por rede de sensores sem fio.

O sensor LM35 é um sensor de temperatura que é muito utilizado em aplicações agrícolas, ambientais e industriais. Tem como características principais o baixo custo, a medida precisa de temperatura, com saída em forma de tensão linear e proporcional à valores em graus centígrados ($^{\circ}\text{C}$). Por este motivo este sensor foi escolhido como parte constituinte do sistema de rede de sensores sem fio desenvolvido.

O LM35 possui um consumo de energia baixo, quando comparado à outros sensores térmicos, na ordem de $60\mu\text{A}$. A faixa de operação deste sensor varia de -55°C à 150°C , ou seja, nesta faixa é possível utilizá-lo em diversas aplicações agrícolas ou no monitoramento ambiental.

O fator de escala deste sensor é linear, ou seja, é a tensão de saída é proporcional a temperatura em graus centígrados, que é de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$, isso significa que, por exemplo, numa temperatura do ar de 25°C a tensão de saída do sensor é de 250mV .

O LM35, além de possuir um baixo consumo de energia, ele opera numa faixa de tensão de 4 a 30V o que facilita o seu uso em projetos eletrônicos por ter uma faixa de tensão nesta ordem e não variar sua tensão de saída.

A Figura 24 (A) mostra um sensor LM35 utilizado nos testes de monitoramento térmico utilizando rede de sensores sem fio que possui $4,3\text{mm}$ de altura e $4,3\text{mm}$ de diâmetro.

A Figura 24 (B) mostra a disposição dos pinos do sensor. Nota que são três saídas, uma delas é a tensão de entrada ou tensão de alimentação, a outra é a saída de dados que é em forma de tensão sendo proporcional a medida térmica do ambiente e o último pino é o GND, também conhecido como terra.

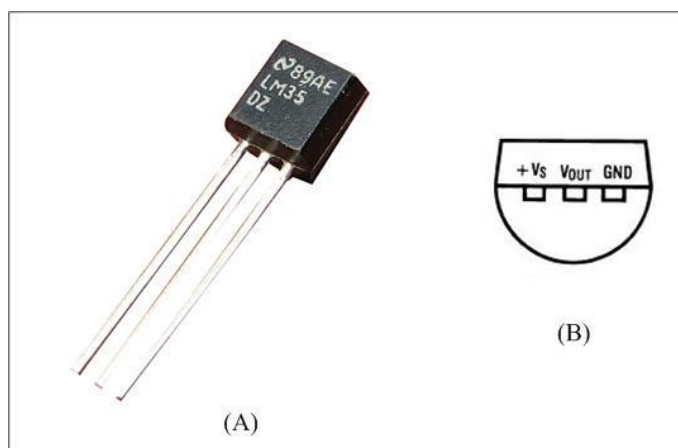


Figura 24: Sensor de temperatura modelo LM35 (A) utilizado nos testes de monitoramento térmico e disposição dos pinos de saída (B).

5.3 Atributos técnicos do Arduino

Neste trabalho utilizou a placa eletrônica Arduino Nano como elemento de processamento do nó de sensoriamento. A Figura 25 mostra a vista superior e vista inferior do Arduino Nano utilizado para o desenvolvimento da rede de sensor sem fio.

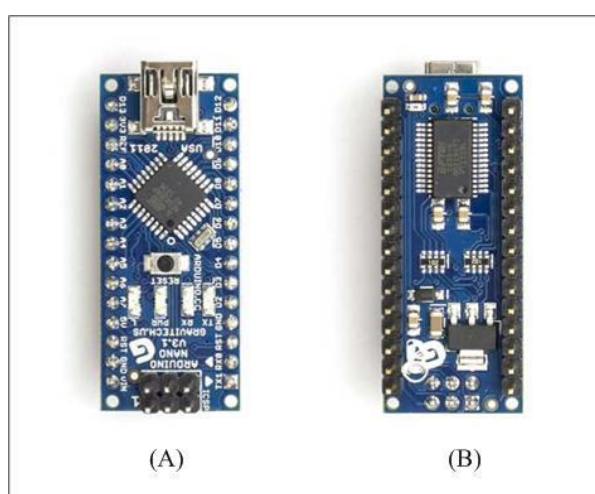


Figura 25: Placa eletrônica do Arduino Nano utilizado como parte constituinte do nó de sensor vista superior (A) e vista inferior (B).

Fonte: Margolis (2011).

As vantagens de se utilizar a plataforma de desenvolvimento do Arduino é que se trata de um ambiente livre, ou seja, o código fonte é aberto, assim qualquer pessoa pode utilizá-lo e alterá-lo sem nenhum custo adicional. Uma outra vantagem é o baixo custo, a placa eletrônica do Arduino tem um custo acessível, diferentemente de outros modelos de placas de aquisição de dados.

Existem no mercado diversos tipos de placas de Arduino, no trabalho utilizamos o modelo Arduino Nano, por possuir um tamanho reduzido, baixo custo e capacidade de memória e armazenamento suficiente para a aplicação em questão.

A Tabela 5 mostra as principais características do Arduino Nano utilizado no estudo, como os atributos e as especificações da placa utilizada como constituinte do nó de sensor.

Tabela 5: Atributos e especificações do Arduino Nano utilizado como elemento construtivo do nó de sensor para o monitoramento térmico.

Atributos	Especificações
Microcontrolador	ATmega168 ou ATmega328
Tensão de operação	5V
Tensão de entrada (recomendada)	7-12V
Tensão de entrada (limites)	6-20V
Pinos de entrada e saída digital	14
Pinos de entrada e saída analógico	8
Memória EEPROM	512bytes (ATmega168) ou 1KB (ATmega328)
Resolução do A/D	10 bits
Dimensão	1,9cmX4,3cm
Peso	5g

Fonte: Margolis (2011).

O Arduino possui um ambiente de desenvolvimento denominado de IDE (Ambiente de desenvolvimento integrado) que é gratuito e de fácil manuseio. O software do Arduino utilizado no estudo foi a versão 1.0.2, a tela inicial deste software é apresentado na Figura 26.

Para utilização deste ambiente basta ter a placa eletrônica e acoplá-la a USB e estabelecer conexão com a porta serial na opção Tools localizada na Figura 26 (2). O código que é gravado ao microcontrolador é realizado na área de mostrada na Figura 26 (3).

Para gravar o código que está no software para o microcontrolador é preciso clicar sobre o botão upload nas ferramentas do sistema localizado Figura 26 (1). Existe uma área do software destinada a mostrar os erros com relação ao processo de programação, esta área encontra-se localizada na Figura 26 (4).

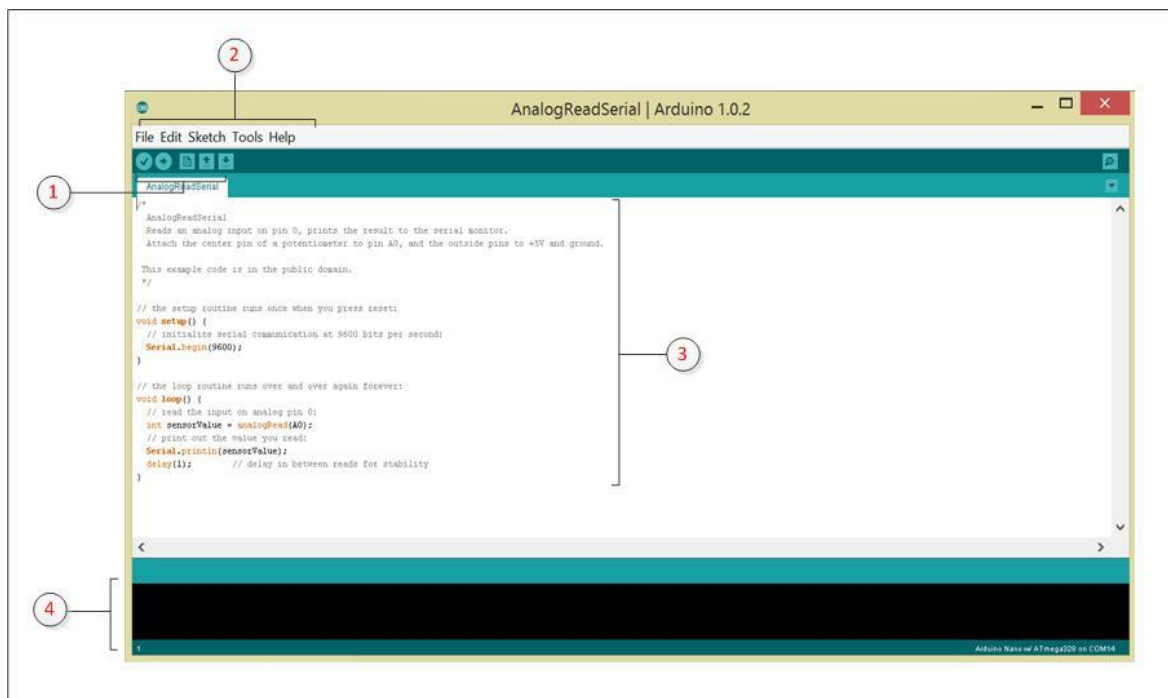


Figura 26: Tela inicial do programa computacional IDE Arduino utilizado para programar o microcontrolador Arduino Nano com as funções de verificar e gravar (1) guia de ferramentas e configurações (2); tela de programação (3) e painel de verificação de erros (4).

Neste trabalho foi desenvolvido um software para ambiente Arduino que recebe os sinais dos sensores LM35, processando-os em valores de temperatura do ar. A rotina do software foi desenvolvida de modo que a cada 2 segundos o microcontrolador recebe o processa o sinal e os enviam pela porta de saída serial ao módulo XBee. As informações enviadas seguem organizadas em forma de string (sequência de caracteres) separadas por um espaço em branco.

5.4 Sistema de hardware

O sistema de hardware desenvolvido é basicamente composto por dois tipos de nós para comporem a rede de sensores sem fio. O primeiro é o nó de sensoriamento que envia as informações de temperatura do ar para o segundo nó, denominado de coordenador. O nó coordenador é acoplado à uma placa eletrônica comercial modelo Bee Adapter V1.4 que possui um chip no seu interior que converte os sinais de dados em formato serial do módulo para o formato USB. Esta placa tem uma saída mini USB que é acoplada ao computador central no qual o software desenvolvido para receber os dados térmicos da rede foi instalado. Assim, é possível que os dados recebidos por rádio pelo nó

coordenador sejam diretamente enviados a um computador, via interface USB, a fim de que sejam processados ou gravados em arquivos.

A Figura 27 mostra a placa de circuito comercial modelo Bee Adapter V1.4 utilizada junto ao módulo coordenador para receber os dados da rede.

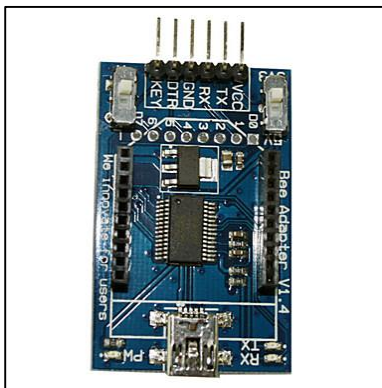


Figura 27: Placa de circuito comercial modelo Bee Adapter V1.4 utilizada para o módulo coordenador da rede que é ligado ao computador central.

O nó de sensoriamento da rede foi desenvolvido no Laboratório de Instrumentação Inteligente da Faculdade de Ciências do Campus da UNESP em Bauru – SP. O nó é composto basicamente pelo módulo de rádio XBee Pro S2B, Arduino Nano, MCP-1541 e LM35.

Na rede de sensores sem fio, o Arduino Nano tem a função de processar o sinal dos sensores de temperatura. O sistema desenvolvido tem capacidade para utilizar até 8 sensores de temperatura analógico modelo LM35. Para melhorar o sinal de saída do sensor foi acrescentado ao circuito um capacitor de 10 μ F ligado ao GND (terra) e na saída, como mostra a Figura 28.

A saída dos sensores é conectada as entradas analógicas do Arduino Nano. A alimentação dos sensores de temperatura LM35 é realizada através da saída de 5V do Arduino Nano no pino 28, que alimenta também o chip modelo MCP-1541, como mostra na Figura 28.

O chip MCP-1541 tem como função regular a tensão de referência para o conversor analógico digital (ADC) do Arduino Nano. O sinal de saída do sensor é analógico e para ser processado precisa ser convertido para digital, o que é feito por um conversor analógico digital interno do Arduino. A tensão referência é fixada em 4,096V, esta saída é estável, mesmo que a tensão de entrada varie entre 4,3V a 5,5V. Isso significa

que se dividirmos 1024 (resolução do A/D do Arduino Nano) por 4,096V (saída de tensão do chip MCP-1541) temos o valor de 0,004V. Portanto, a cada 4mV do sinal de entrada o conversor analógico digital incrementa uma unidade em seu contador. Como a saída do sensor é de 10mV por °C, teremos uma resolução de medição de temperatura de 0,4°C.

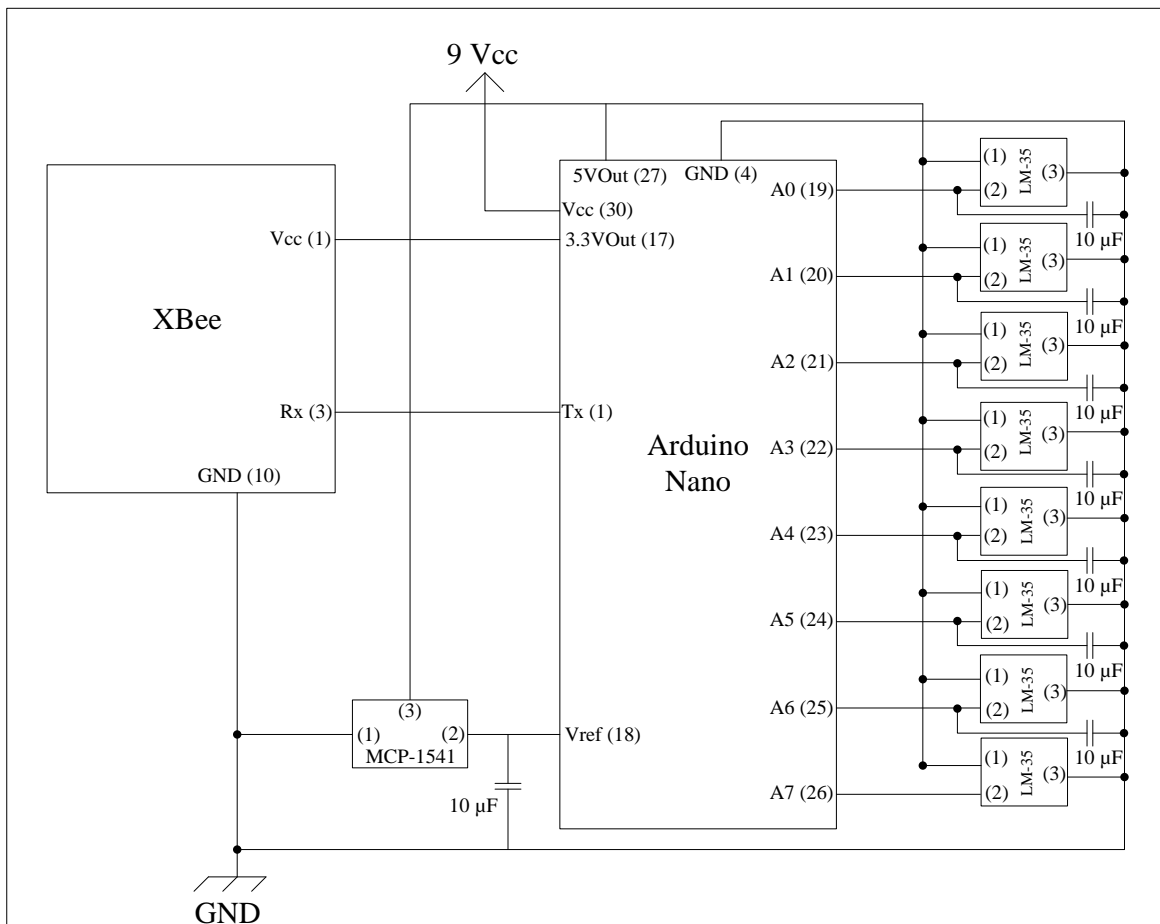


Figura 28: Esquema de montagem do nó de sensoriamento desenvolvido para o monitoramento da temperatura, composto basicamente pelo módulo de rádio, Arduino nano, chip de tensão de referência MCP-1541, e sensores de temperatura LM35.

O dados dos sensores são processados e enviados via serial do Arduino Nano para o módulo de rádio XBee Pro S2B pelo pino número 3 (Rx). O XBee utilizado possui um alcance nominal de 1,6Km em ambiente externo em visada livre e envia os dados para o coordenador da rede onde está conectado ao computador central que processa e separa os dados.

A placa de circuito foi desenvolvida utilizando componentes descritos acima, soldando-os numa placa universal de 10cm de comprimento por 10cm de

largura, pintadas na coloração azul e vermelho para diferenciá-las no momento da instalação no interior da casa de vegetação, como mostra a Figura 29.

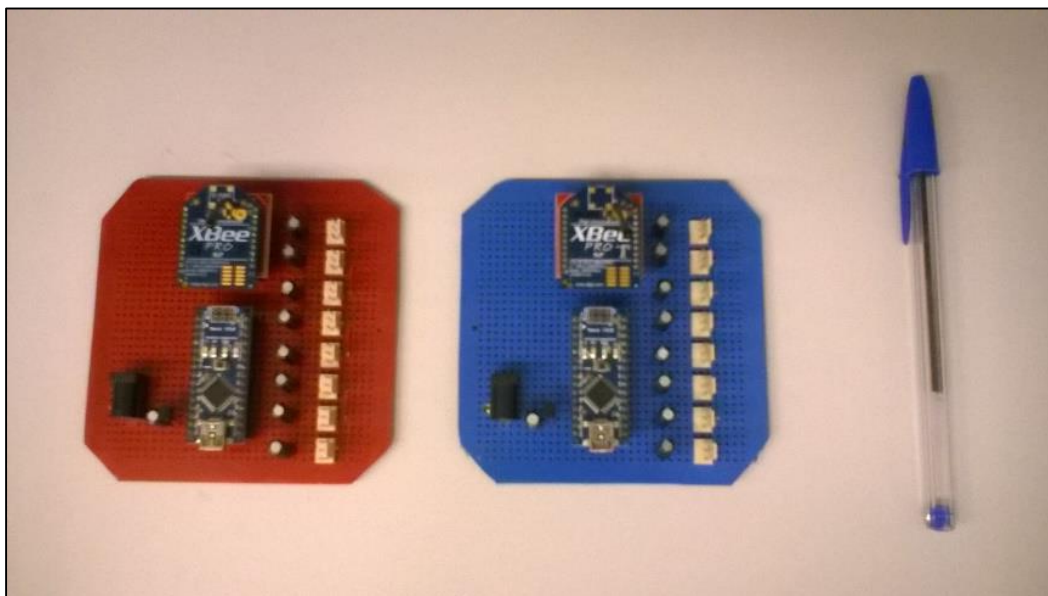


Figura 29: Placa do nó de sensor para monitoramento da temperatura do ar desenvolvido que foram desenvolvidas no presente trabalho.

A placa foi desenvolvida em tamanho reduzido para facilitar a instalação e o manuseio. Os materiais utilizados para o desenvolvimento da placa são instrumentos comuns de encontrar.

No desenvolvimento da placa de circuito do nó de sensor foram utilizados diversos componentes eletrônicos. A Tabela 6 mostra os componentes necessários para o desenvolvimento de um único nó de sensor.

Tabela 6: Principais componentes eletrônicos utilizados no desenvolvimento do hardware de um nó de sensoriamento.

Item	Descrição	Quantidade
1	XBee Pro S2B	1
2	Capacitor eletrolítico 10 μ F	9
3	Conector para alimentação	1
4	Arduino Nano	1
5	Adaptador XBee	1
6	Placa Universal (10x10cm)	1
7	Caixa de Circuito (Steck 10x10cm)	1
8	Regulador MCP-1541	1
9	Conector de três saídas	8

Os principais componentes da placa são o módulo de rádio XBee Pro S2B; o Arduino Nano; os sensores modelo LM35 e o regulador para tensão de referência modelo MCP-1541.

5.5 Software de aquisição de dados para rede de sensores sem fio

O Software de aquisição de dados para rede de sensores sem fio foi desenvolvido com o uso de Delphi 7, que é uma plataforma de programação para o desenvolvimento de sistemas, que utiliza como linguagem o Object Pascal.

O objetivo do software desenvolvido é receber, separar e gravar os dados de uma rede de sensores sem fio para o monitoramento da temperatura do ar no interior de casas de vegetação. A Figura 30 mostra a tela inicial do software desenvolvido.

O desenvolvimento do software foi baseado na criação de um sistema que seja de fácil utilização e manuseio, com uma estrutura visual simples, facilitando o seu uso para usuário leigos.

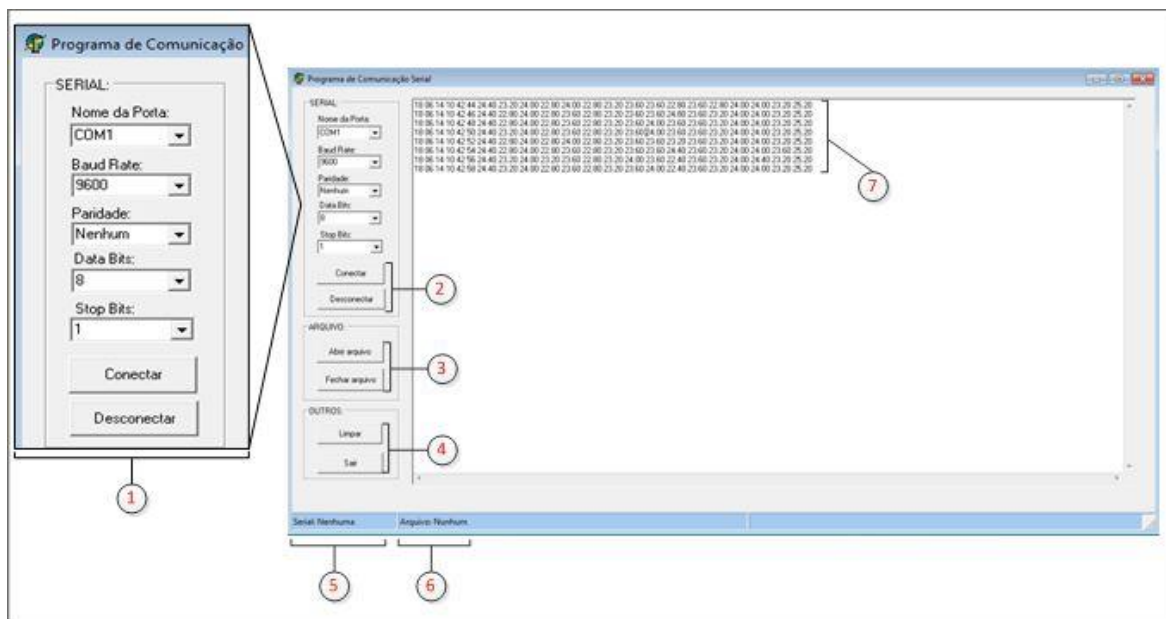


Figura 30: Tela inicial do software de aquisição de dados de rede de sensores sem fio desenvolvido, destacando a área de configuração da porta serial (1), os botões de conectar e desconectar a serial (2), abrir e fechar arquivo (3), limpar e sair (4) indicador da serial (5) e indicador de arquivo (6).

A Figura 30 (1) mostra a área de configuração da porta de comunicação serial, onde o usuário define as configurações e estabelece a comunicação serial passando a receber os dados da rede. Neste item, encontram-se as opções: Nome da Porta, onde o usuário pode optar por escolher até 16 portas de comunicação, bastando escolhê-las, de modo que a máquina deve possuir estas portas fisicamente.

Outro item é a *Baud Rate*, ou taxa de transmissão, onde o usuário a configura, podendo variar de 110 a 256000bps (bit por segundo). É válido lembrar que a *Baud Rate* é configurada de acordo com a taxa de transmissão do módulo de rádio XBee, que por padrão neste trabalho utilizou, 9600bps por ser a taxa de transmissão mais comum entre os instrumentos existentes no mercado.

No item Paridade, refere-se à verificação de erros de transmissão, pode variar entre, nenhum, par, ímpar, marca e espaço. Caso não haja necessidade de verificação de erros recomenda-se colocar a paridade como “nenhum”. O item Data Bits é o número de bits de dados que é enviado por vez. Neste software foi utilizado 8 bits como padrão, mas o usuário tem a opção de escolher entre, 5, 6, 7 e 8 bits. É importante destacar que opções abaixo de 8 bits são utilizadas em casos de projetos especiais. O item Stop Bits identifica o momento de finalização de um dado, ou seja, é a forma com que o computador

identifica e diferencia as informações. No final de cada informação transmitida é acrescentado um stop bit que pode variar e o usuário pode optar por escolher entre, 1; 1,5 e 2.

A Figura 30 (2) apresenta os botão Conectar que estabelece a conexão com a porta serial e passa a receber os dados da rede e o botão Desconectar que encerra a conexão e o processo de recebimento dos dados. Este software tem a função de gravar as informações que são recebidas da rede de sensores. Para isso o usuário, primeiro estabelece a conexão com a serial, depois clica no botão Abrir Arquivo na Figura 30 (3) é aberta uma janela para escolher o nome e o local para salvar os dados. Os dados são gravados no formato de texto na extensão .txt, podendo ser posteriormente processados por programas de análise estatística como Excel ou MatLab, por exemplo. A partir do momento da escolha do local do arquivo, o software salva automaticamente os dados da rede a cada 5 minutos. No entanto, para o monitoramento na tela os dados são recebidos a cada 2 segundos. O botão Fechar Arquivo encerra o processo de gravação dos dados e fecha o arquivo gerado.

A Figura 30 (4) mostra o botão Limpar, que tem a função de limpar a tela de recebimento dos dados e o botão Sair, que tem como função encerrar o recebimento dos dados e fechar o software. A Figura 30 (5) mostra um indicador da serial, exibindo a serial ativa no momento da conexão. A Figura 30 (6) mostra o indicador de arquivo, exibindo se há algum arquivo aberto e sua localização no computador.

A Figura 30 (7) mostra a área de recepção dos dados, que chegam num intervalo de tempo de 2 segundos, seguindo um padrão de string (linha de texto) como é apresentado na Figura 31.

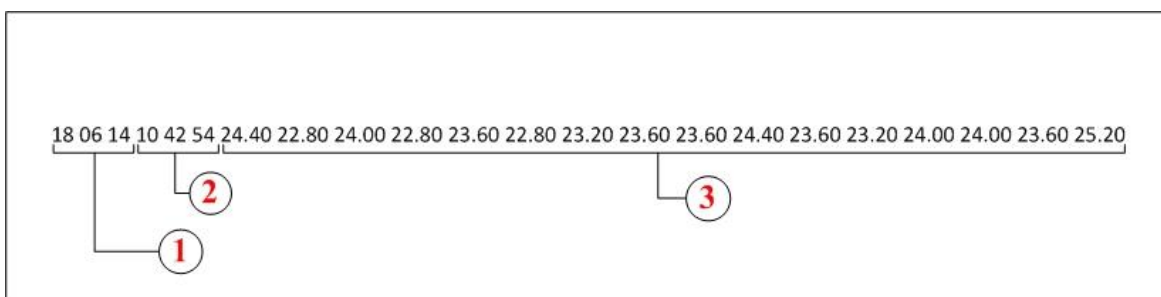


Figura 31: Padrão de informações dos sensores na rede, com informações de data (1), hora (2) e valores de temperatura de 16 sensores (3).

A string se inicia com data e hora atualizada do sistema (1) e (2) e depois com as informações dos 16 sensores de temperatura. As informações são separadas

uma das outras por um espaço em branco e gravadas num arquivo de texto com extensão .txt. Esta extensão permite que os dados serem tratadas através de outros softwares estatísticos.

5.7 Verificação da exatidão dos sensores de temperatura

Foram desenvolvidos dois nós de sensoriamento, sendo que cada um deles é capaz de receber informações de 8 sensores analógicos de temperatura do ar do tipo LM35. Porém, os sensores LM35 possuem um erro que pode variar até $1,5^{\circ}\text{C}$ com relação a medida real. No entanto, este sensor possui precisão, o que possibilita sua utilização em ambientes agrícolas, sendo possível de corrigi-lo através de medidas com o sensor comparado com um instrumento padrão realizando uma correção individual de cada sensor. Diante disso, a temperatura medida de cada sensor foi comparada com a temperatura medida com um outro sensor calibrado e a partir daí foi determinado o erro de cada LM35.

Como instrumento padrão para realizar as correções dos sensores utilizou-se o termihigrômetro modelo HTR-152, como mostra a Figura 32 que utiliza um sensor de temperatura termopar tipo K localizado numa ponta de prova (Figura 32-A). Este equipamento possui uma taxa de amostragem 0,8 segundos, com uma resolução para leitura de temperatura do ar de $0,1^{\circ}\text{C}$.

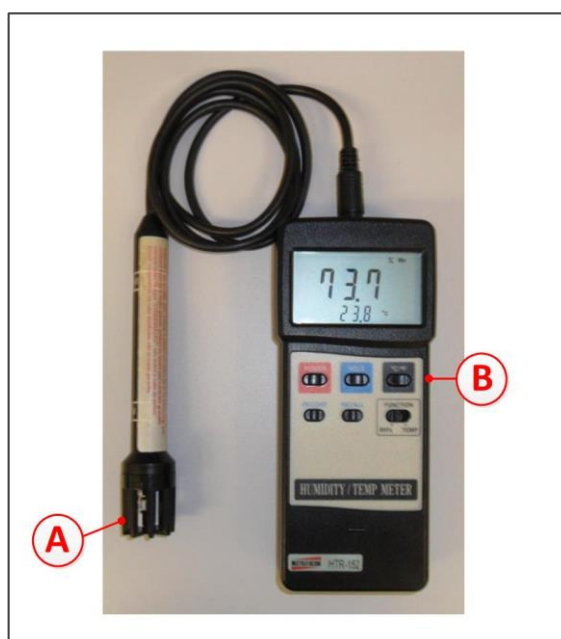


Figura 32: Termohigrômetro modelo HTR-152. Utilizado como padrão de referência na correção dos valores dos sensores de térmicos, este equipamento mede a temperatura (°C) e a umidade relativa (%) simultaneamente.

Foram realizadas duas análises em laboratório com 16 sensores de temperatura modelo LM35. A primeira coletando amostras de temperatura do ar em 30 repetições em dias e horários aleatórios, com duração de coleta de 15 dias. A segunda análise valores de temperatura foram coletados em 10 repetições em medidas contínuas. Ambos os dados foram avaliados estatisticamente com o uso do software Excel®.

A Figura 33 mostra o nó de sensor realizando o processo de correção dos sensores LM35 em laboratório, cada nó é alimentado com uma fonte de 9V. Os sensores foram conectados a placa de circuito utilizando um cabo de três vias. Ambos os nós enviavam informações de temperatura do ar para o coordenador que grava os dados, e medidas térmicas são registradas manualmente utilizando o termohigrômetro HTR-152 para posteriormente serem comparados os valores gerando o fator de correção médio.

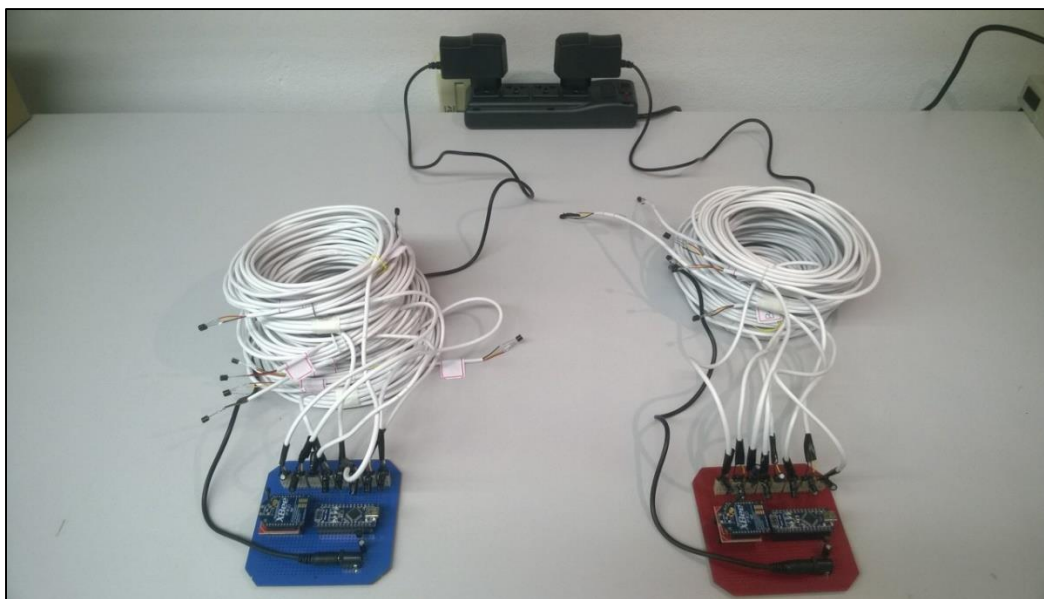


Figura 33: Nó de sensor para monitoramento da temperatura do ar, desenvolvido e sendo testado e corrigido em laboratório.

A metodologia utilizada foi simples, porém eficiente, pois o sensor LM35 apresenta estabilidade operacional e assim, uma vez feita a verificação do seu erro, esse valor se mantém pelo período de operação.

5.6 Detalhes da casa de vegetação utilizada

A aplicação prática da rede de sensores sem fio foi realizada numa casa de vegetação no Campus Rosa Dourada pertencente a Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal (FAEF) localizada em Garça – SP, cujas as coordenadas geográficas são de 22°12'38" de latitude sul e 49°39'22" de longitude oeste e altitude de 683 metros.

A casa de vegetação utilizada foi do tipo teto em arco com 8 metros de largura e 16 metros de comprimento, num total de 128m². A estrutura possuía 2,20 metros de pé direito e posicionada no sentido Leste-Oeste construída com arcos em estrutura metálica e postes de concreto armado, as laterais foram revestidas com uma tela de polietileno de proteção anti-afídeo e a cobertura de polietileno de baixa densidade. O piso interno foi revestido com uma proteção de polietileno de coloração branca e o piso externo de solo sem cobertura vegetal.

A Figura 34 mostra a casa de vegetação utilizada no estudo com os sensores de temperatura instalados em seu interior.



Figura 34: Interior da casa de vegetação utilizada durante os testes de monitoramento térmico usando rede de sensores sem fio.

5.8 Metodologia do monitoramento térmico no interior da casa de vegetação

Após a correção individual de casa sensor, dois nós foram instalados no interior da casa de vegetação descrita acima, monitorando em tempo real as medidas de

15 sensores de temperatura do ar modelo LM35 distribuídos sistematicamente de maneira uniforme no interior da casa de vegetação, numa altura de 1,70 metros com relação ao piso da estrutura.

Os sensores foram distribuídos obedecendo um grid de 4,00 metros para o eixo X e 1,33 metros para o eixo Y. A Figura 35 mostra a distribuição dos sensores de temperatura do ar no interior da casa de vegetação. A Figura 36 mostra os sensores instalados na casa de vegetação na parte superior da estrutura.

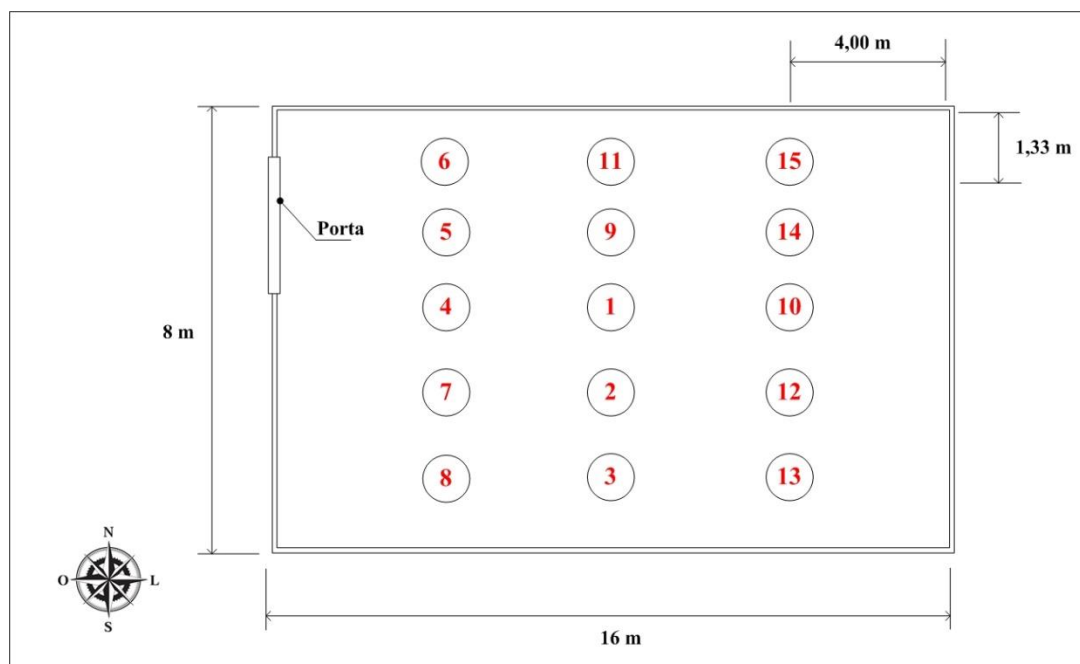


Figura 35: Vista superior da casa de vegetação e a distribuição dos sensores LM35 no seu interior.

Cada sensor possuía um abrigo para protegê-lo da radiação solar direta, o que influencia na medida de temperatura do ar, pois a mesma precisa ser medida em sombra. A Figura 36 mostra o modelo de abrigo construído para o sensor LM35.



Figura 36: Sensor de temperatura do ar modelo LM35 e abrigo construído com a utilização de prato plástico instalado na parte superior da casa de vegetação.

O abrigo foi construído com um prato circular de polietileno na cor branca de 15cm de diâmetro e 3cm de altura, para auxiliar na fixação e evitar a transferência de calor do prato para o sensor foi adicionado uma placa de poliestireno expandido com a mesma dimensão do prato. A distância entre o prato e o sensor após instalado na casa de vegetação foi de 5cm. A Figura 37 mostra as especificações construtivas do abrigo para proteção do sensor LM35 contra radiação solar direta.

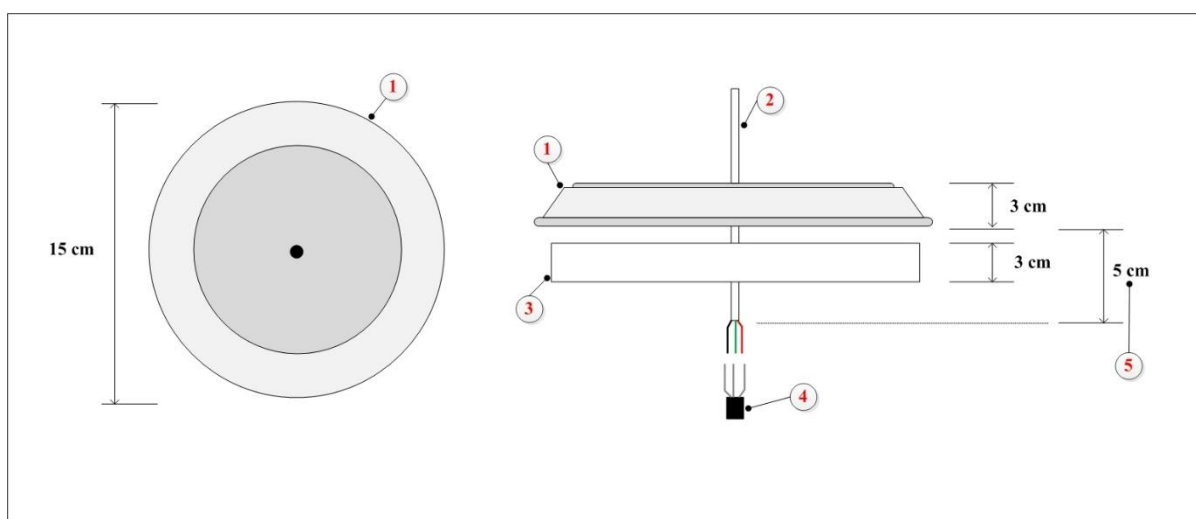


Figura 37: Formato e especificações do abrigo construído para proteger os sensores de temperatura LM35 contra a incidência direta de radiação solar direta, constituído basicamente pelo prato (1) e poliestireno expandido (3).

5.9 Metodologia da análise dos dados térmicos recebidos da casa de vegetação

Foram coletados valores de temperatura do ar no interior da casa de vegetação ao longo de 72 horas, em dias não consecutivos. A análise dos dados foi realizada no dia de maior variação térmica para validar o sistema em uma situação de mais extrema de temperatura.

Os dados foram submetidos a análise estatística básica avaliando, média, máxima, mínima, desvio padrão e coeficiente de variação.

Parte dos dados foram submetidos a análise geoestatística de variância espacial $\gamma(h)$ que permitiu calcular a dependência espacial medida através de um variograma as diferenças entre os valores amostrais que estão distantes em h metros sendo expressa da seguinte forma:

$$\gamma(h) = \left(\frac{1}{2N(h)}\right) \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(xi) - Z(xi + h)]^2 \quad [2]$$

Em que:

$N(h)$: é o número de pares de valores medidos;

$Z(s_i)$, $Z(s_i+h)$: são variáveis separadas por um vetor h ;

h : distância entre os pontos dos valores amostrados.

Os parâmetros avaliados do semivariograma, foram, efeito pepita, patamar e o alcance. Esses parâmetros auxiliaram na análise da dependência espacial calculada pela relação C/C_0+C proposta por Zimback (2001), também conhecida como proporção espacial. Se valores obtidos desta razão for maior ou igual 0,75 possui forte dependência espacial, e entre 0,25 e 0,75 moderada dependência espacial e valores menor ou igual 0,25 como fraca dependência espacial.

Os dados foram interpolados pelo método da krigagem que permite estimar valores de variáveis espaciais utilizando o variograma. Os resultados da interpolação foram visualizados em mapas bidimensionais a distribuição espacial da temperatura do ar em um dia de maior variação e em diferentes horários. Todos os dados obtidos para as análises foram calculados com o auxílio do programa GS+ (Geostatistical for Environmental Sciences) seguindo o modelo proposto por Andriotti (2009).

Os valores de temperatura do ar diário foram submetidos à uma análise para a determinação da Evapotranspiração de Referência (ET_o) utilizando a equação proposta por Hargreaves e Samani (1985), citada por Hargreaves e Allen (2003), realizando

sua variabilidade espacial no interior da casa de vegetação. A ETo pode ser representada pela equação abaixo:

$$ETo = 0,0022 \cdot Ra \cdot (T + 17,8) \cdot (Tmax - Tmin)^{0,5}$$

Onde:

ETo: evapotranspiração de referência (mm.d⁻¹);

Ra: radiação no topo da atmosfera (MJ.m⁻².d⁻¹);

T: temperatura média (°C);

Tmax: temperatura máxima (°C);

Tmin: temperatura mínima (°C).

Tabela 7: Valores da radiação solar no topo da atmosfera (Ra), MJ.m⁻².d⁻¹, para diferentes latitudes sul e meses do ano.

Lat. Sul	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
40°	43,4	38,1	30,9	22,3	15,8	12,8	13,9	19,1	27,1	35,3	41,8	44,6
38°	43,4	38,5	31,7	23,3	16,9	13,9	15,1	20,2	28,0	35,8	41,9	44,5
36°	43,4	38,9	32,4	24,3	18,1	15,1	16,2	21,2	28,8	36,3	42,0	44,4
34°	43,4	39,2	33,0	25,3	19,2	16,2	17,4	22,3	29,6	36,7	42,0	44,3
32°	43,3	39,4	33,7	26,3	20,3	17,4	18,5	23,3	30,4	37,1	42,0	44,1
30°	43,1	39,6	34,3	27,2	21,4	18,5	19,6	24,3	31,1	37,5	42,0	43,9
28°	43,0	39,8	34,8	28,1	22,5	19,7	20,7	25,3	31,8	37,8	41,9	43,6
26°	42,8	39,9	35,3	29,0	23,5	20,8	21,8	26,3	32,5	38,0	41,8	43,3
24°	42,5	40,0	35,8	29,8	24,6	21,9	22,9	27,2	33,1	38,3	41,7	43,0
22°	42,2	40,1	36,2	30,6	25,6	23,0	24,0	28,1	33,7	38,4	41,4	42,6
20°	41,9	40,0	36,6	31,3	26,6	24,1	25,0	28,9	34,2	38,6	41,2	42,1
18°	41,5	40,0	37,0	32,1	27,5	25,1	26,0	29,8	34,7	38,7	40,9	41,7
16°	41,1	39,9	37,2	32,8	28,5	26,2	27,0	30,6	35,2	38,7	40,6	41,2
14°	40,6	39,7	37,5	33,4	29,4	27,2	27,9	31,3	35,6	38,7	40,2	40,6
12°	40,1	39,6	37,7	34,0	30,2	28,1	28,9	32,1	36,0	38,6	39,8	40,0
10°	39,5	39,3	37,8	34,6	31,1	29,1	29,8	32,8	36,3	38,5	39,3	39,4
8°	38,9	39,0	37,9	35,1	31,9	30,0	30,7	33,4	36,6	38,4	38,8	38,7
6°	38,3	38,7	38,0	35,6	32,7	30,9	31,5	34,0	36,8	38,2	38,2	38,0
4°	37,6	38,3	38,0	36,0	33,4	31,8	32,3	34,6	37,0	38,0	37,6	37,2
2°	36,9	37,9	38,0	36,4	34,1	32,6	33,1	35,2	37,1	37,7	37,0	36,4
0°	36,2	37,5	37,9	36,8	34,8	33,4	33,9	35,7	37,2	37,4	36,3	35,6

Fonte: Bernardo; Soares; Mantovani (2006).

No presente trabalho, a casa de vegetação era localizada em 22°12'38" de latitude sul e 49°39'22" de longitude oeste e as medições foram realizadas no mês de Setembro, assim foi adotado o valor 33,70 MJ.m⁻².d⁻¹ para radiação no topo da atmosfera.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo é apresentado os resultados obtidos nesse trabalho, discutindo-os através de análises e uma aplicação prática do sistema de rede de sensores sem fio para o monitoramento térmico no interior de uma casa de vegetação. O trabalho com redes de sensores sem fio permitiu que a temperatura no interior da casa de vegetação fosse medida de forma simultânea e contínua em diversos pontos do seu interior e com isso pudesse fazer uma análise detalhada da sua variabilidade espacial, o que pode influenciar diretamente a produtividade bem com a irrigação no seu interior.

6.1 Análise de exatidão dos sensores usados na rede

A análise de exatidão representa a correção entre o valor da temperatura medida por cada sensor LM35 e o valor real da temperatura. Esse valor de erro foi analisado em laboratório para cada sensor, sendo que os dados das medições de cada sensor foram depois corrigidos matematicamente. Assim, o tratamento das informações foi feito de forma lógica, em termos de software, e não em termos de aferições físicas no sensor, o qual permitiu uma redução de custos e economia de energia elétrica, pois se evitou o uso de circuitos eletrônicos adicionais pra fazer essa correção.

O teste de correção de dados térmicos foi realizado em laboratório e determinado o fator de correção médio, que foi calculado através da diferença entre os valores de cada sensor com o instrumento padrão (termohigrômetro HTR-152). Esta diferença entre o sensor e a medida padrão é o *fator de correção*. No entanto, para determinar o fator de correção médio foram feitas 30 repetições e calculada a média aritmética. A Tabela 8 mostra os valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão, coeficiente de variação e a

diferença entre a média do sensor e a média do HTR-152. A fim de se assegurar uma análise também sobre a estabilidade operacional dos sensores, as medidas foram realizadas em um intervalo de 15 dias, assegurando uma exposição maior a condições naturalmente diferentes de temperatura.

Em cada uma das 30 repetições, realizadas em laboratório, foi medida a temperatura com cada um dos 16 sensores LM35 e também com o HTR-152. Os dados dessas medições formaram um banco de dados que foi posteriormente analisado de forma estatística. No final das 30 repetições, o HTR apresentou um valor médio de $23,82^{\circ}\text{C}$ que foi comparado com os valores médios de cada um dos 16 sensores. A partir daí se pode determinar a diferença ou “erro” médio de cada um dos sensores utilizados na rede. Essa análise também permitiu verificar que cada sensor teve uma média cujo coeficiente de variação foi na faixa de 3,1% a 3,9%, ou seja, todos tiveram coeficientes na mesma ordem de grandeza e assim podemos admitir que cada sensor individualmente tem um comportamento com uma uniformidade que pode ser considerada satisfatória. Analisando os valores de temperatura do ar observa-se que o fator de correção médio é variável entre os sensores, ou seja, cada sensor possui o seu fator de correção quando comparado ao instrumento utilizado como referência. O sensor que mais diferiu com relação ao padrão foi o sensor 6, onde a diferença entre a média do referencial e a média do sensor foi de $-1,52^{\circ}\text{C}$. Isso significa que para esse sensor, o fator de correção foi de 1,52. Ou seja, resumidamente, todas as medições realizadas por esse sensor foram posteriormente acrescida de $1,52^{\circ}\text{C}$. Note que se todos os sensores fossem idênticos e perfeitos, esse fator de correção seria sempre zero, porém, os sensores tem limitações físicas que, apesar de existirem, são perfeitamente gerenciáveis a fim de se obter resultados confiáveis.

Tabela 8: Valores de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) dos sensores utilizados na rede implementada, e seus relativos valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão, coeficiente de variação e diferença entre a referencial e a média do sensor.

Sensores	Média	Máx.	Mín.	σ	CV (%)	Diferença
1	23,64	25,2	21,2	0,74	3,12	0,18
2	22,48	24,4	20,0	0,88	3,91	1,34
3	23,49	25,2	21,2	0,81	3,47	0,32
4	22,68	24,8	20,0	0,86	3,78	1,14
5	23,05	24,8	20,8	0,81	3,50	0,76
6	22,29	24,0	20,0	0,82	3,68	1,52
7	22,97	24,8	20,4	0,87	3,77	0,84
8	23,43	25,6	20,8	0,91	3,87	0,39
9	23,19	25,2	20,8	0,87	3,75	0,63
10	22,59	24,4	20,4	0,88	3,89	1,23
11	22,92	24,8	20,8	0,89	3,87	0,90
12	22,39	24,0	20,4	0,77	3,43	1,43
13	23,12	24,8	20,8	0,84	3,63	0,70
14	23,51	25,6	21,2	0,83	3,54	0,31
15	22,60	24,4	20,4	0,88	3,89	1,22
16	23,72	25,6	21,6	0,89	3,74	0,10

Os valores de temperatura do ar dos sensores foram submetidos à uma análise gráfica comparando com o valor padrão ou referência (termohigrômetro). Essa análise foi feita com todos os sensores a fim de se verificar se em meio as séries de medições realizadas não poderiam ter aparecidos picos isolados de medições. Esses picos poderiam representar erros ocasionados por fatores como ruído elétrico e poderiam prejudicar medidas específicas que ocorressem justamente nesse momento. Como a esperança de ocorrência desses eventos era pequena, os mesmos poderiam estar diluídos dentro de análises estatísticas e assim, a análise ponto a ponto se torna uma ferramenta útil para fazer essa análise, a qual mostrou que o sensor não apresentou esses picos e, portanto, teve um ponto positivo a mais no critério de confiabilidade. A Figura 38 mostra os valores dos sensores 1, 2, 3 e 4 comparado com a referência em 30 repetições.

Nota-se que os valores de temperatura do ar acompanharam a tendência da temperatura de referência isso indica que os sensores estão em bom estado de funcionamento e que podem ser utilizados em outras aplicações, como no monitoramento ambiental.

As Figuras 39, Figura 40 e Figura 41 também apresentam esta tendência, portanto, os sensores 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15 também operam de forma correta nas 30 repetições realizadas.

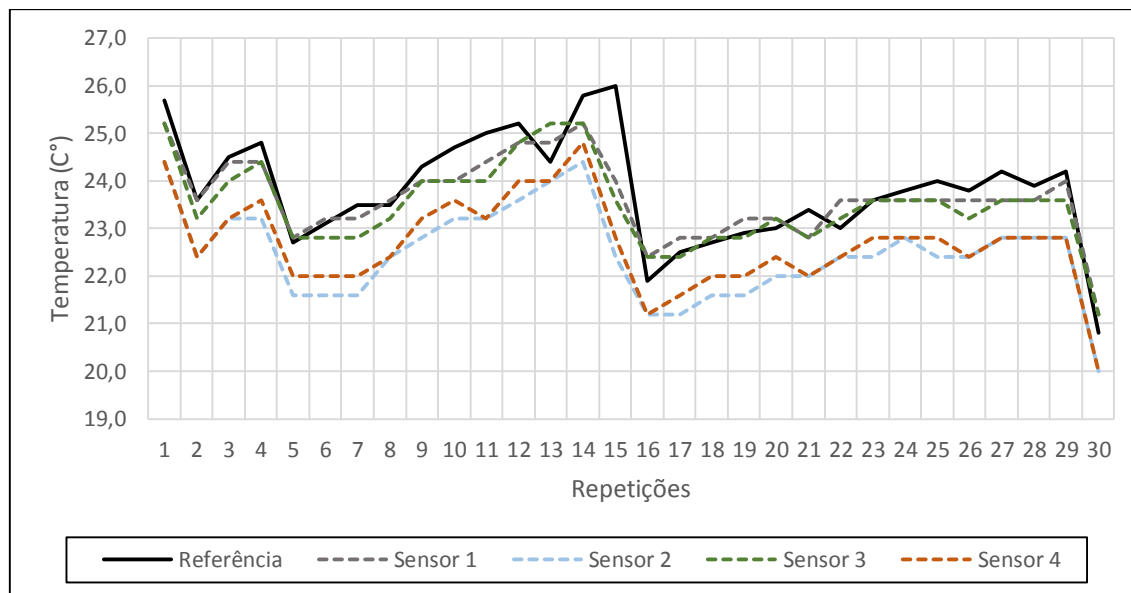


Figura 38: Valores da temperatura do ar, medidas com o Termohigrômetro modelo HTR-152 e os sensores 1, 2, 3 e 4.

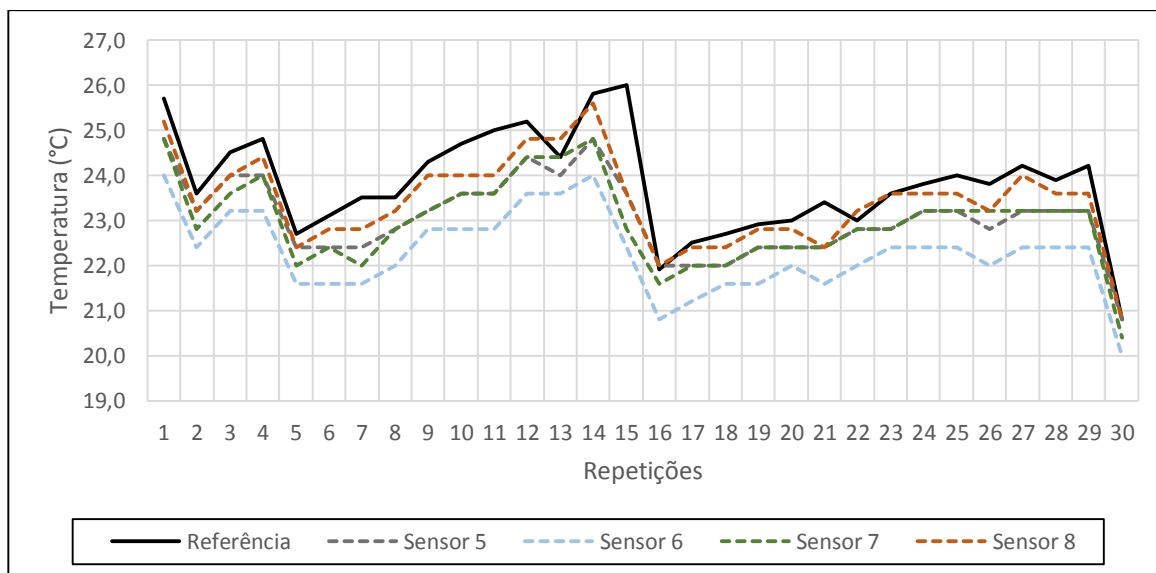


Figura 39: Valores da temperatura do ar, medidas com o Termohigrômetro modelo HTR-152 e os sensores 5, 6, 7 e 8.

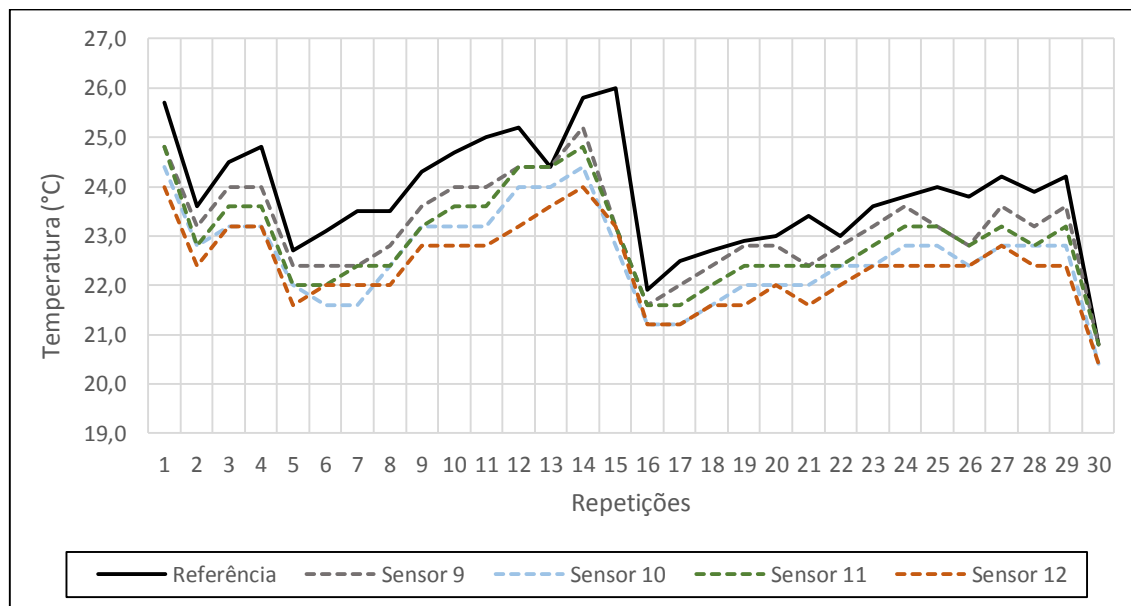


Figura 40: Valores da temperatura do ar, medidas com o Termohigrômetro modelo HTR-152 e os sensores 9, 10, 11 e 12.

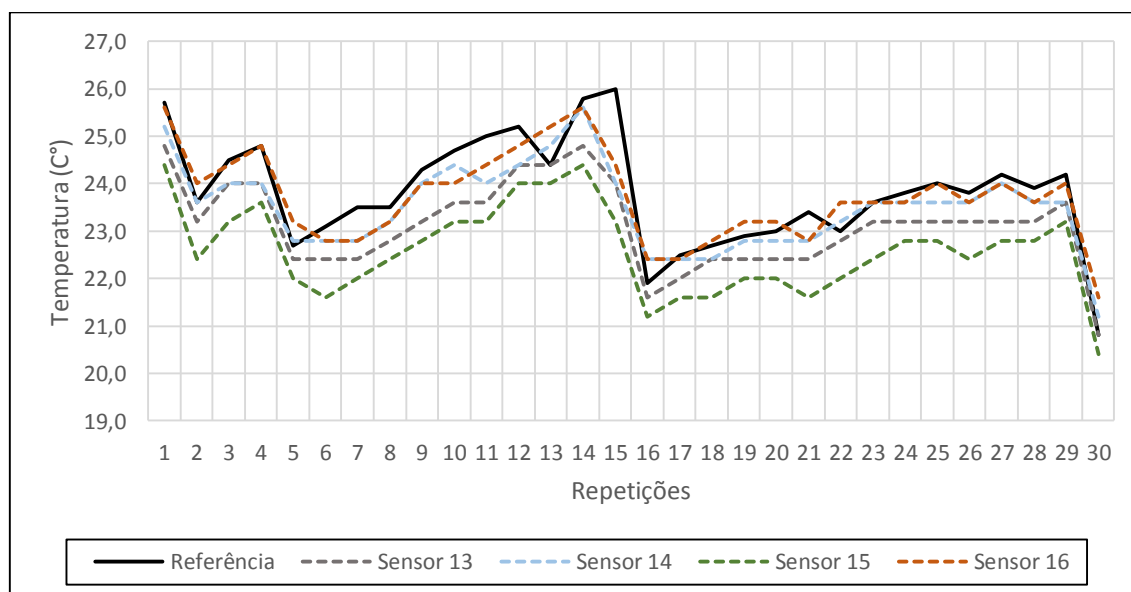


Figura 41: Valores da temperatura do ar no, medidas com o Termohigrômetro modelo HTR-152 e os sensores 13, 14, 15 e 16.

Nesta análise os sensores apresentaram características com valores diferentes, porém todas dentro dos limites que os manuais técnicos do sensor previa. Cada sensor foi individualmente analisado e para cada um foi estabelecido um fator de correção que permitia os ajustes das suas medições. Os sensores apresentaram coeficientes

de variações na mesma ordem de grandeza, apresentando um comportamento uniforme. Assim, através desse experimento, foi provado que é possível se determinar de forma precisa o erro médio dos sensores LM35 e também fazer os possíveis ajustes desses valores o por software, sem a necessidade de mecanismos adicionais de hardware.

6.2 Avaliação do comportamento dos sensores LM35 em medidas térmicas contínuas

Nesta avaliação foram coletados dados e analisando informações de temperatura do ar do sensor LM35 em laboratório num período de 20 segundos no total de 10 amostras e comparando-as com a temperatura de referência (termohigrômetro). O objetivo dessa análise é verificar uma possível variabilidade do erro médio de cada sensor quando as medições são realizadas em pequenos intervalos de tempo.

As Figuras 42, Figura 43, Figura 44 e Figura 45 mostram os valores de temperatura do ar medida com os sensores que foram utilizados na rede implementada nesse trabalho, e também mostra os valores medidos com o termohigrômetro de referência modelo HTR-152.

Avaliando as informações gráficas é possível observar que o sensor 10 foi o que apresentou maior variação ao longo do período analisado. Isso se deve ao fato de que cada sensor possui suas características que variam de sensor para sensor.

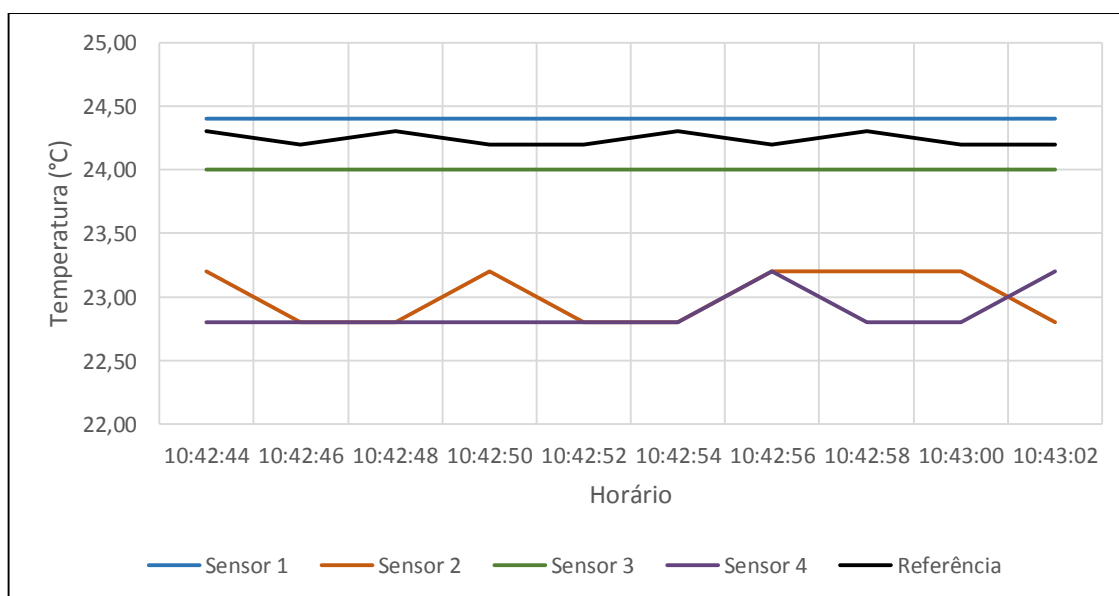


Figura 42: Temperatura do ar em medidas contínuas, medidas com o Termohigrômetro modelo HTR-152 (referência) e os sensores 1, 2, 3 e 4.

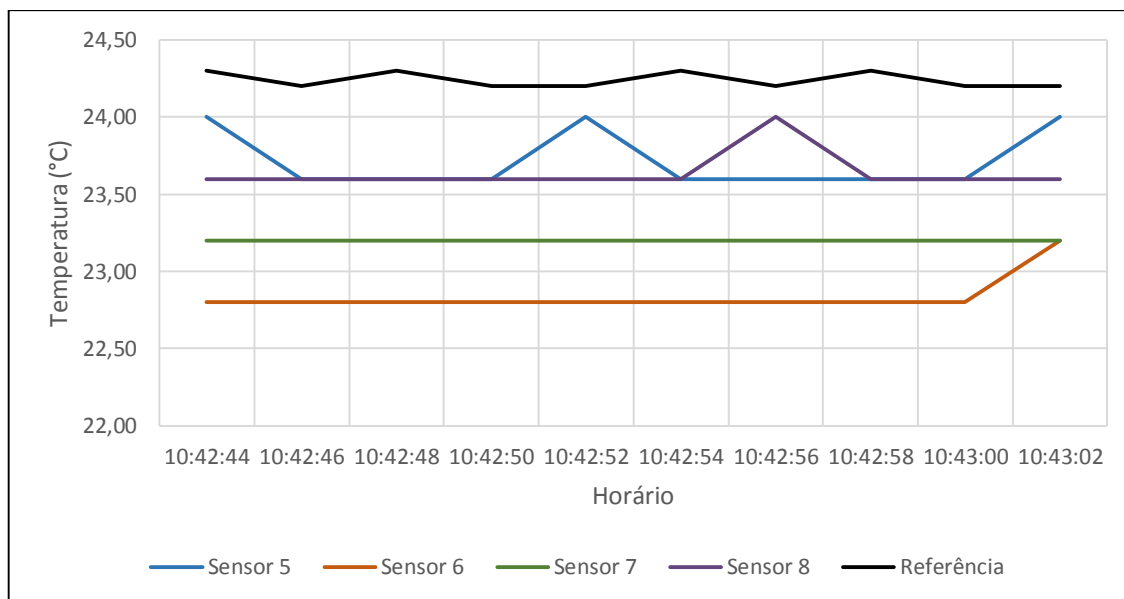


Figura 43: Temperatura do ar em medidas contínuas no interior do laboratório, medidas com o Termohigrômetro modelo HTR-152 (referência) e os sensores 5, 6, 7 e 8.

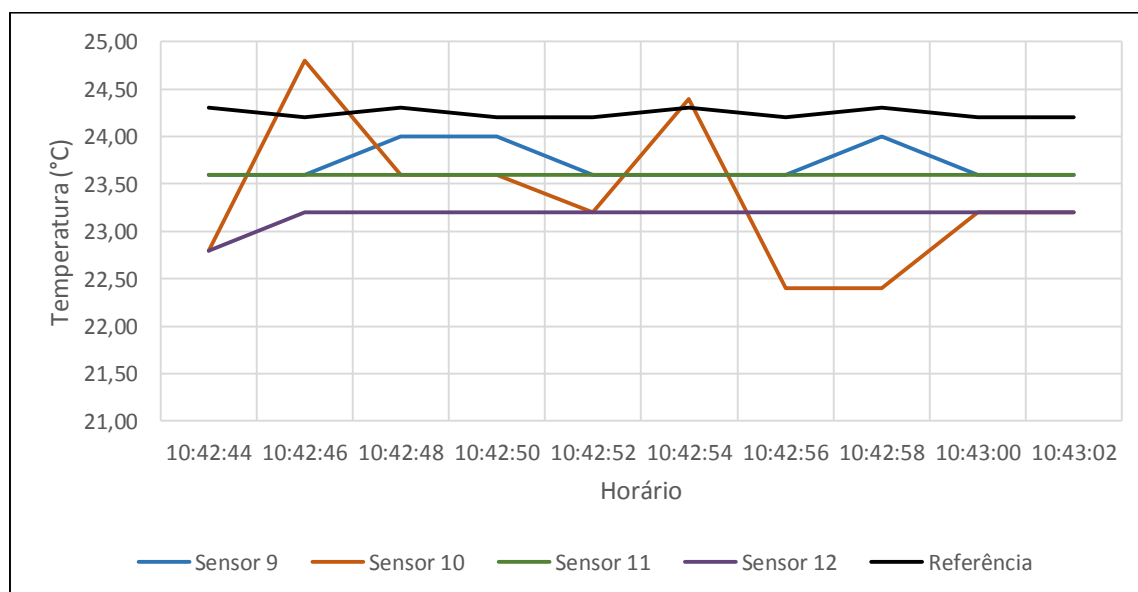


Figura 44: Temperatura do ar em medidas contínuas no interior do laboratório, medidas com o Termohigrômetro modelo HTR-152 (referência) e os sensores 9, 10, 11 e 12.

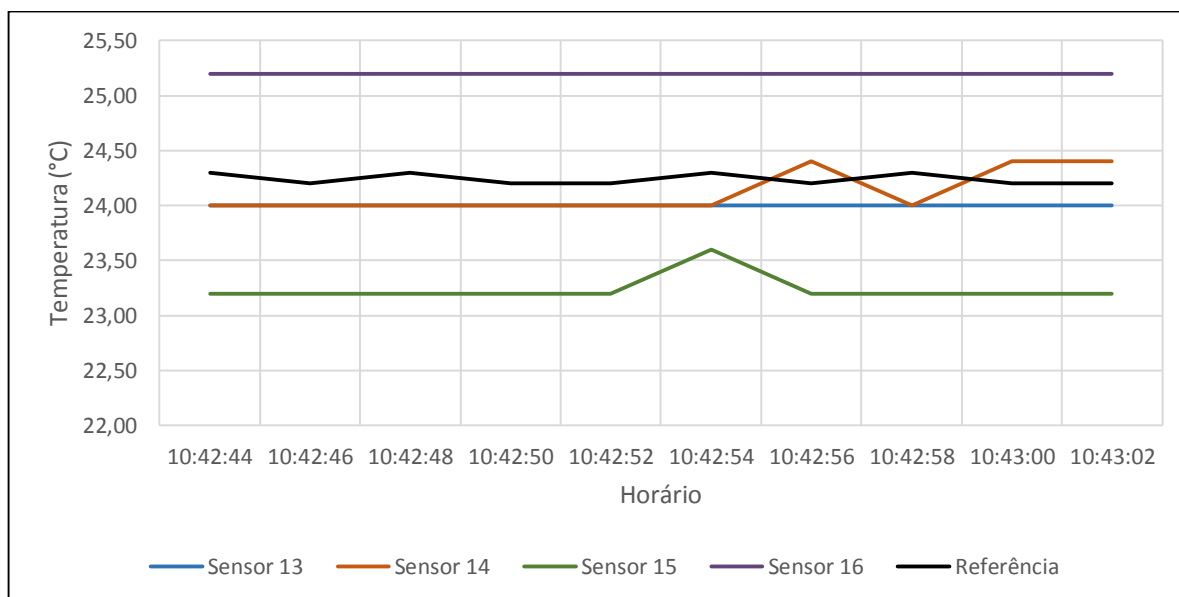


Figura 45: Temperatura do ar em medidas contínuas no interior do laboratório, medidas com o Termohigrômetro modelo HTR-152 (referência) e os sensores 13, 14, 15 e 16.

A Tabela 9 mostra valores de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) para os 16 sensores LM35 coletadas em laboratório em medidas contínuas avaliando, o desvio padrão, o coeficiente de variação, média, máximo e mínimo.

Tabela 9: Temperatura do ar de 16 sensores LM35 coletados em laboratório em medidas contínuas.

Parâmetros	Sensores															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Média	24,4	23,0	24,0	22,9	23,7	22,8	23,2	23,6	23,7	23,4	23,6	23,2	24,0	24,1	23,2	25,2
Máx.	24,4	23,2	24,0	23,2	24,0	23,2	23,2	24,0	24,0	24,8	23,6	23,2	24,0	24,4	23,6	25,2
Mín.	24,4	22,8	24,0	22,8	23,6	22,8	23,2	23,6	23,6	22,4	23,6	22,8	24,0	24,0	23,2	25,2
σ	0,0	0,2	0,0	0,2	0,2	0,1	0,0	0,1	0,2	0,8	0,0	0,1	0,0	0,2	0,1	0,0
CV (%)	0,0	0,9	0,0	0,7	0,8	0,6	0,0	0,5	0,8	3,3	0,0	0,5	0,0	0,8	0,5	0,0

Observa-se na tabela que o sensor LM35 tem um comportamento estável sendo que para 15 dos 16 sensores analisados, as variações de temperatura em torno da média são pequenas, o que permite fazer leituras diretas de temperatura, sem a necessidade de médias. Porém, em casos raros, como no caso do sensor 10, medidas isoladas poderiam induzir a resultados que fossem relativamente bem diferentes do valor esperado. Para esse sensor, com uma média de $23,4^{\circ}\text{C}$ e desvio padrão de 0,8, considerando que esse tipo de erro segue uma distribuição Normal (Gaussiana) 95,44% de

probabilidade de encontramos um valor entre 21,8°C e 25°C, o que representa 3,2°C e que pode ser considerada uma diferença relativamente grande para um valor esperado de 23,4°C. Assim, ao invés de simplesmente aceitar um único valor para cada medição, nesse trabalho foi usado um valor médio, o que tende a atenuar significativamente possíveis erros de medições isoladas.

6.3 Avaliação de uma rede de sensores sem fio no monitoramento térmico numa casa de vegetação utilizando sensores LM35

Foram distribuídos 15 sensores LM35 no interior da casa de vegetação monitorando a temperatura do ar numa altura de 1,70 metro em tempo real. Esta distribuição foi descrita anteriormente na seção Metodologia do monitoramento térmico no interior da casa de vegetação do capítulo 5.8 de Material e Métodos. Para as análises, foram realizadas 10 medições de temperatura a cada 5 minutos e calculada a sua média, num período total de 24 horas no dia 06 de setembro de 2015.

A Tabela 10 mostra os resultados da análise estatística dos valores de temperatura do ar coletadas no interior da casa de vegetação no dia 6 de Setembro. Nota-se que a maior variação térmica ocorreu no sensor 11 no qual está localizado na extremidade norte da casa de vegetação, local onde a radiação solar é mais intensa durante o dia. Zhao et al. (2011) mostram que o microclima no interior de uma casa de vegetação é dinâmico, podendo variar muito conforme o tipo de estrutura, altura do pé direito, tipo de cultura, época do ano, características climáticas do local, entre outras.

Tabela 10: Análise estatística de valores de temperatura do ar monitorados no interior de uma casa de vegetação.

Sensores	Média	Máx.	Mín.	σ	CV (%)
1	22,86	36,76	14,85	6,73	29,42
2	22,67	36,14	14,85	6,59	29,08
3	22,47	34,99	14,76	6,38	28,42
4	22,95	37,85	14,74	7,03	30,64
5	22,98	38,00	14,76	6,91	30,07
6	22,51	36,05	14,90	6,34	28,14
7	22,54	36,97	14,53	6,67	29,58
8	22,45	36,03	12,79	6,72	29,94
9	18,57	29,77	12,17	5,41	29,14
10	19,16	31,23	12,66	5,59	29,19
11	18,67	31,01	12,10	5,48	29,34
12	18,93	32,52	12,06	5,97	31,51
13	18,15	26,36	12,30	4,65	25,65
14	17,96	31,51	11,17	5,81	32,33
15	19,72	32,25	12,93	5,65	28,66

Nas Figuras 46, Figura 47 e Figura 48 mostram o comportamento térmico dos sensores no interior da casa de vegetação durante um período de 72 horas, avaliadas nos dias 27 e 28 de agosto e dia 06 de setembro de 2015. Esses dias foram selecionados pelo fato de terem apresentado uma variação relativamente grande da temperatura do ar externo a casa de vegetação e assim se tornam interessantes para ver o comportamento da casa em um ambiente menos homogêneo.

Observa-se que a temperatura do ar no interior da casa de vegetação obteve uma tendência em todos os sensores isso indica que estão operando de forma normal, mostrando que não possuem danos físicos.

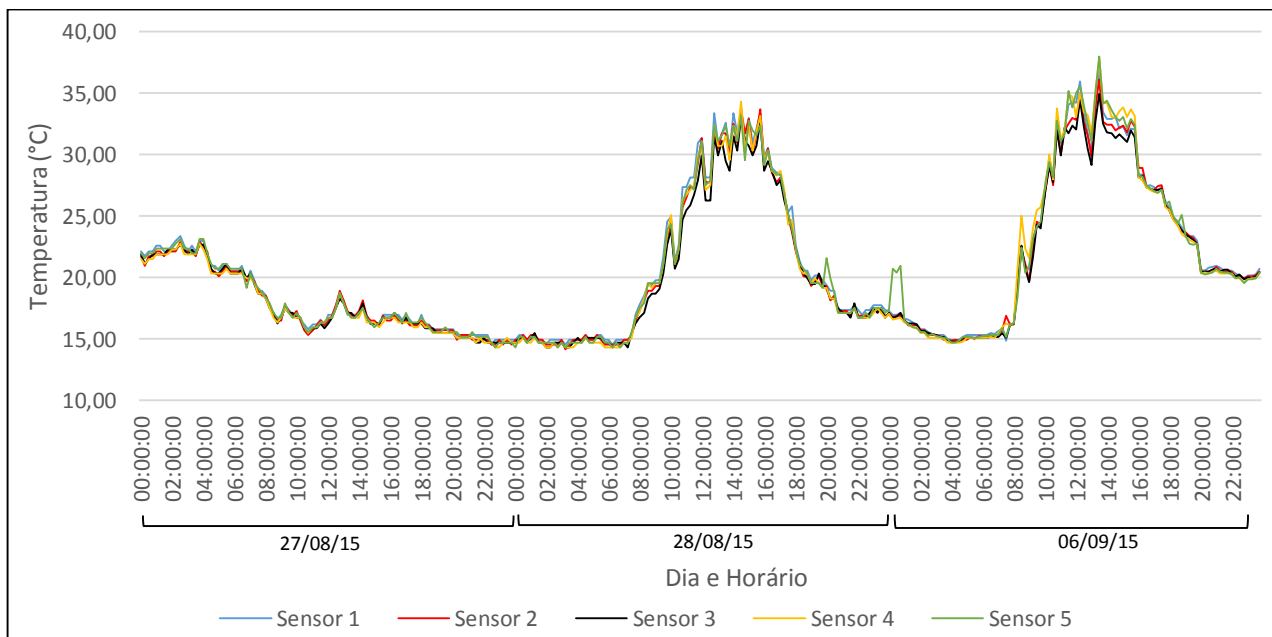


Figura 46: Comportamento da temperatura do ar dos sensores 1, 2, 3, 4 e 5, durante três dias não consecutivos no interior de uma casa de vegetação.

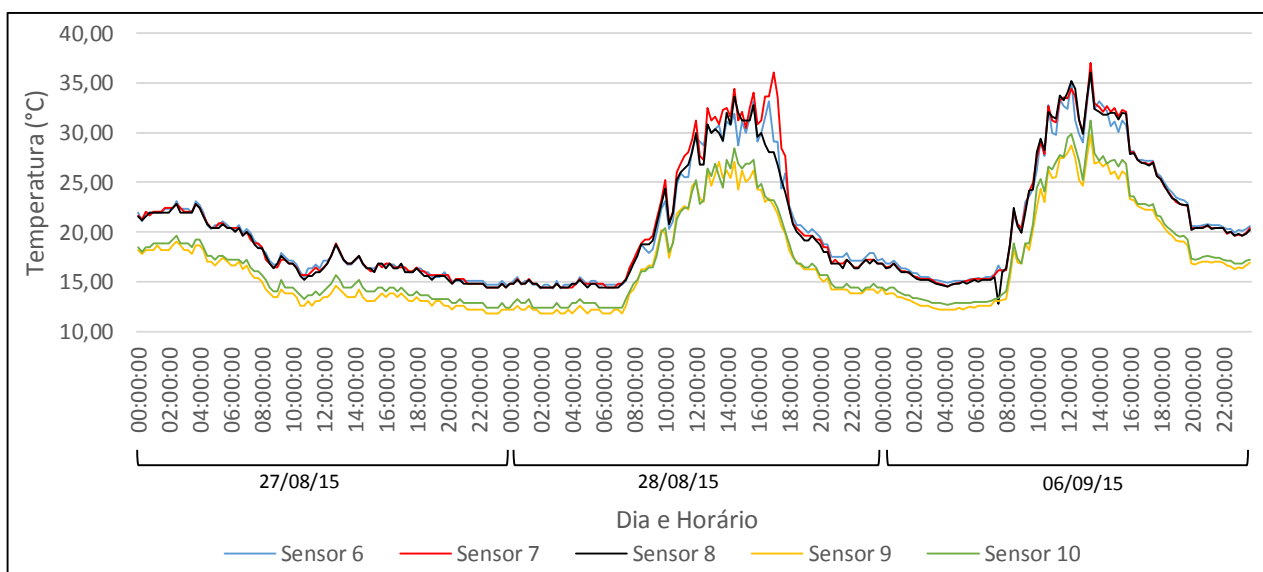


Figura 47: Comportamento da temperatura do ar dos sensores 6, 7, 8, 9 e 10, durante três dias não consecutivos no interior de uma casa de vegetação.

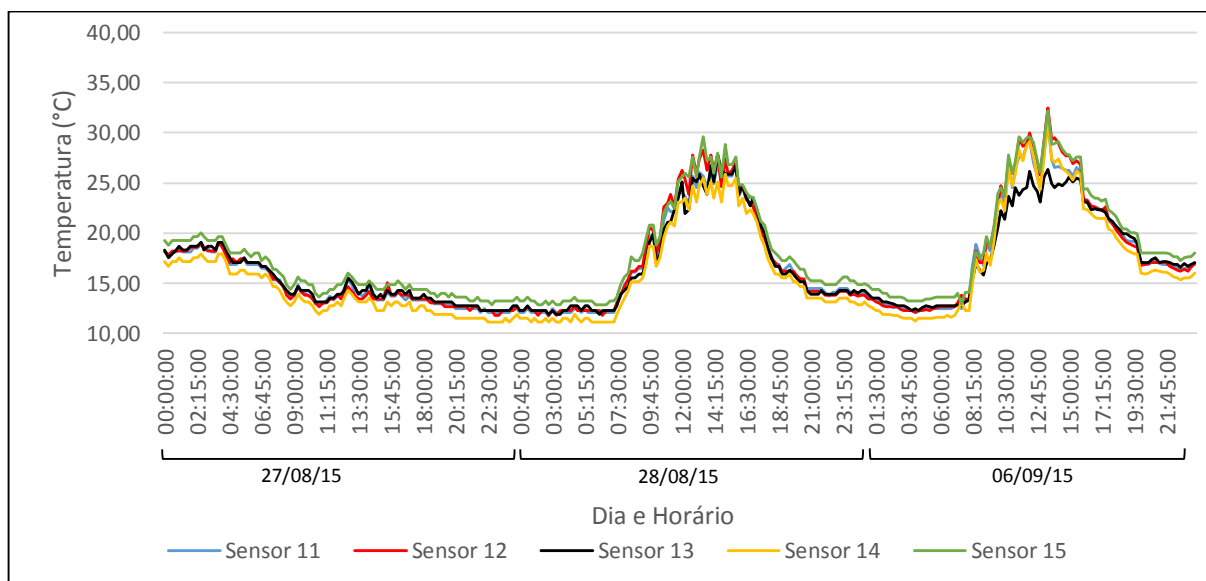


Figura 48: Comportamento da temperatura do ar dos sensores 11, 12, 13, 14 e 15, durante três dias não consecutivos no interior de uma casa de vegetação.

Analisando a Figura 46, Figura 47 e Figura 48 é possível observar que a temperatura do ar nas primeiras 24 horas foi mais amena e uniforme, porém, no período das 24 às 48 horas e 48 às 72 horas obteve um pico de temperatura a partir das 7:30 horas e começando a ter uma queda após às 15:00 horas.

Analisando os dados foi possível observar que o dia de maior variação foi relativo ao período de 48 às 72 horas, o que corresponde ao dia 06 de setembro de 2015. Com o objetivo de realizar uma análise mais detalhada deste período, foram elaborados gráficos do comportamento térmico dos 15 sensores de temperatura ao longo de 24 horas no período de maior variação, como mostrado nas Figura 49, Figura 50 e Figura 51.

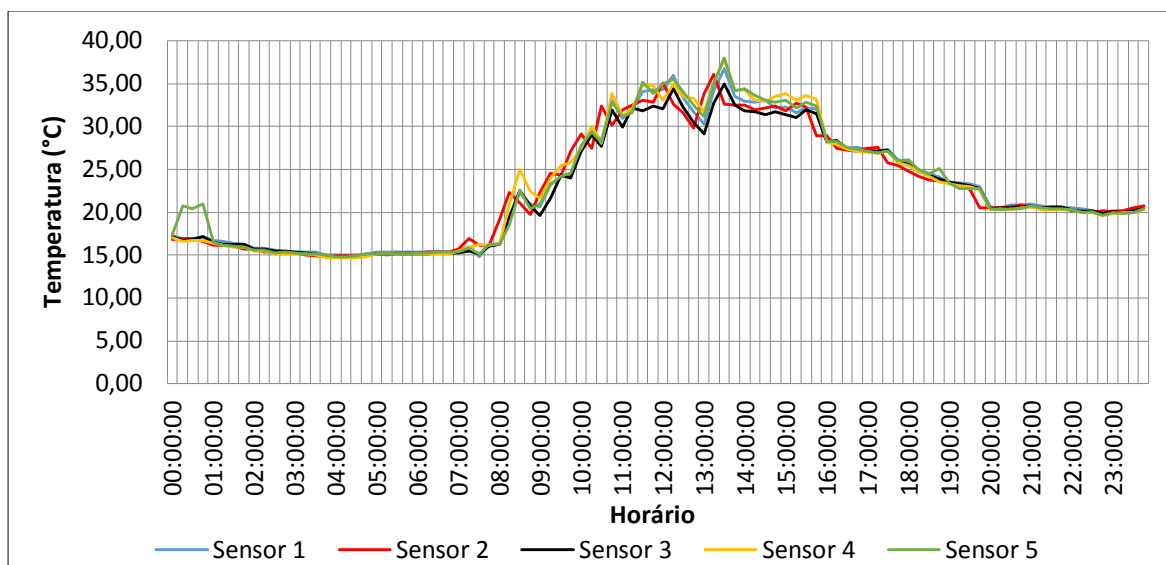


Figura 49: Amplitude térmica dos sensores 1, 2, 3, 4 e 5 no dia 06 de Setembro no interior de uma casa de vegetação.

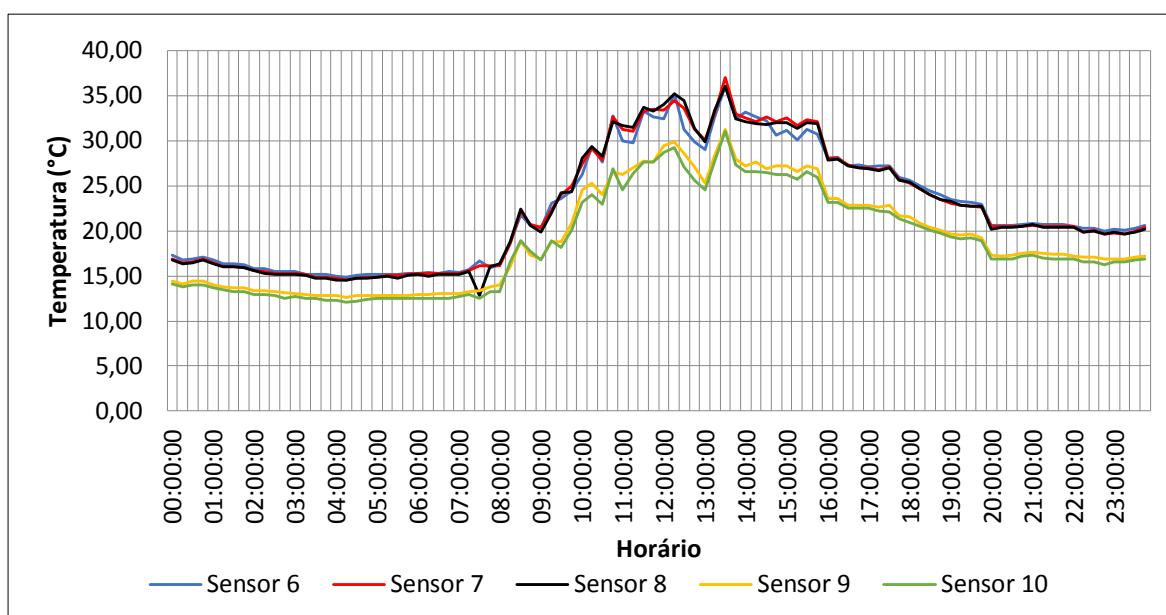


Figura 50: Amplitude térmica dos sensores 6, 7, 8, 9 e 10 no dia 06 de Setembro no interior de uma casa de vegetação.

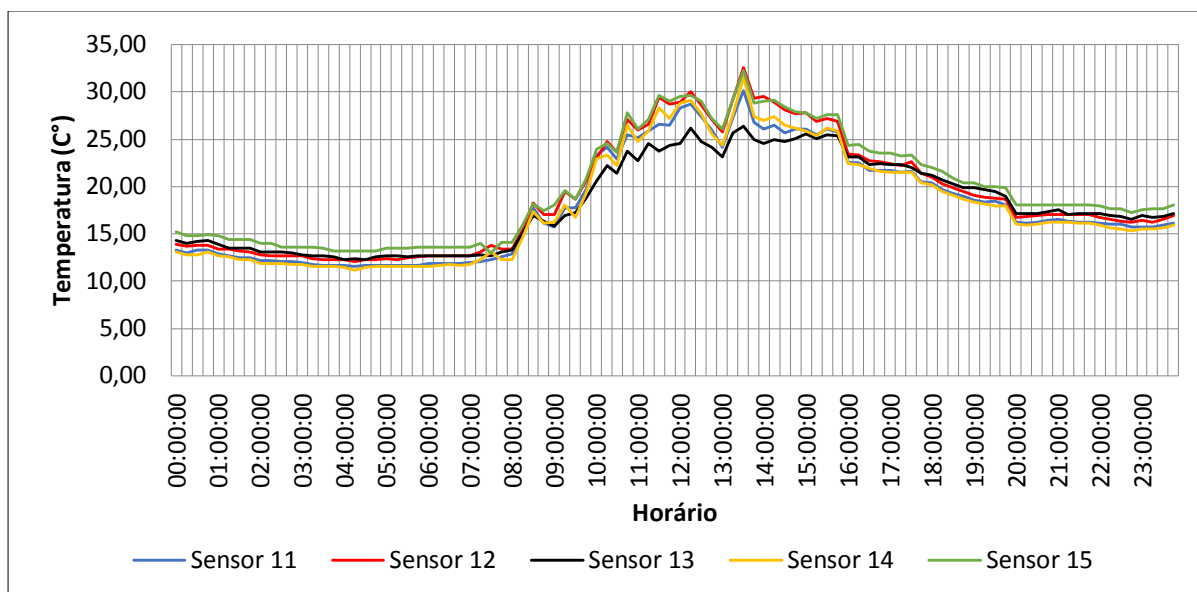


Figura 51: Amplitude térmica dos sensores 11, 12, 13, 14 e 15 no dia 06 de Setembro no interior de uma casa de vegetação.

Kittas e Bartzanas (2007) mostram que o clima no interior de casas de vegetação pode variar em função do local, do clima e do período do dia. Neste trabalho foi possível observar que a temperatura do ar varia consideravelmente ao longo de 24 horas. É possível perceber que este comportamento é visto em todos os sensores, portanto, a temperatura segue uma tendência em todos os pontos da estufa. O fato da temperatura do ar nos gráficos seguir uma tendência não significa que ela seja uniforme. Num trabalho realizado por Braga e Klar (2003) mostram que variáveis ambientais, tais como, temperatura, umidade relativa, radiação solar, etc., podem assumir diferentes valores em pontos distintos no interior de uma casa de vegetação e essa variação pode influenciar diretamente o desenvolvimento vegetal.

6.4 Análise da resolução temporal das medições térmicas na casa de vegetação

Esta seção apresenta um estudo sobre a resolução temporal das medições térmicas na casa de vegetação. Ou seja, a mesma mostra a investigação sobre o intervalo de tempo mínimo entre duas medições consecutivas. Teoricamente, o ideal seria a realização de medições contínuas de temperatura o que permitiria conhecer de forma extremamente precisa a variação de temperatura em cada ponto da casa de vegetação. Isso representaria um tempo zero entre duas medições, porém, ao longo do tempo, isso iria gerar

uma quantidade extremamente grande de dados que poderiam acabar dificultando sua análise prática e, além disso, empiricamente podemos deduzir que a temperatura no interior da casa de vegetação exige um tempo mínimo para sofrer variações que possam ser consideradas minimamente significativas. Assim, nesse estudo, realizamos medições a cada 15 minutos a análise consiste em subtrair o valor de temperatura do ar de um determinado instante com o valor da temperatura do ar medida no instante de 15 minutos anteriores. O resultado é a diferença absoluta entre as temperaturas com o objetivo de analisar se em 15 minutos a temperatura sofre variações significativas. A ideia é que isso sirva como um referencial a partir do qual se possa estabelecer um intervalo de tempo entre as medições seguindo um padrão técnico científico.

A Tabela 11 mostra os valores estatísticos da variação da temperatura do ar dos 15 sensores instalados na casa de vegetação, com medições realizadas durante 24 horas. A medição foi realizada no dia 6 de setembro de 2015, quando a temperatura ambiente teve um mínimo de 9,20°C e um máximo de 36,48°C. Na Tabela 11, para cada sensor foram registradas 96 medições de temperatura e calculada a diferença entre cada duas medições consecutivas, o que, por sua vez, gerou um outra base de dados exclusiva com as diferenças, cujos dados estatísticos estão na Tabela 11. As diferenças foram tratadas com seu valor em módulo.

Tabela 11: Diferença entre medições consecutivas, em intervalos de 15 minutos, da temperatura do ar (°C) com 15 sensores LM35 no interior da casa de vegetação.

Sensores	Média	Máximo	σ	CV (%)
1	0,72	4,76	1,05	145,41
2	0,74	4,84	1,05	141,83
3	0,73	4,22	0,99	135,96
4	0,79	5,78	1,21	153,80
5	0,86	4,67	1,16	135,87
6	0,79	5,16	1,12	142,57
7	0,70	4,84	1,04	149,32
8	0,76	4,07	1,08	141,59
9	0,58	3,30	0,81	139,34
10	0,66	4,00	0,95	144,68
11	0,66	3,50	0,91	138,66
12	0,49	2,51	0,60	124,00
13	0,71	4,25	1,02	143,94
14	0,61	4,10	0,91	148,22
15	0,59	3,66	0,88	148,19

Pela Tabela 11 é possível observar que o sensor 4 obteve o maior desvio padrão e coeficiente de variação. Isso pode ser explicado pelo fato do sensor 4 estar próximo a porta de entrada da casa de vegetação e com a movimentação de pessoas no interior da estrutura no abrir e fechar da porta, pode provocar uma variação térmica significativa. Fato já comprovado por estudos realizados por Bojacá et al. (2009) onde a temperatura do ar no interior de casas de vegetação podem variar em função da circulação de pessoas em seu interior e de abertura de cortinas e portas.

Podemos observar na tabela que a variação média é relativamente pequena, sendo sempre inferior a $0,9^{\circ}\text{C}$, porém, o desvio padrão é proporcionalmente grande em casos extremos chegaram a ser registradas variações superiores a 5°C em um intervalo de 15 minutos, o que representa um fato que deve ser considerado para o desenvolvimento de atividades dentro da casa de vegetação. Diante disso, é importante verificar com que frequência ocorrem essas variações extremas e, assim, foram feitos gráficos de mostram cada uma das 96 variações medidas para cada um dos 15 sensores.

As Figuras 52 a 56, mostram a variação contínua de temperatura do ar individual de cada sensor ao longo de 24 horas. Esses gráficos permitem que seja realizada uma análise específica de cada sensor em função do tempo, o que possibilita uma análise espaço temporal mais precisa.

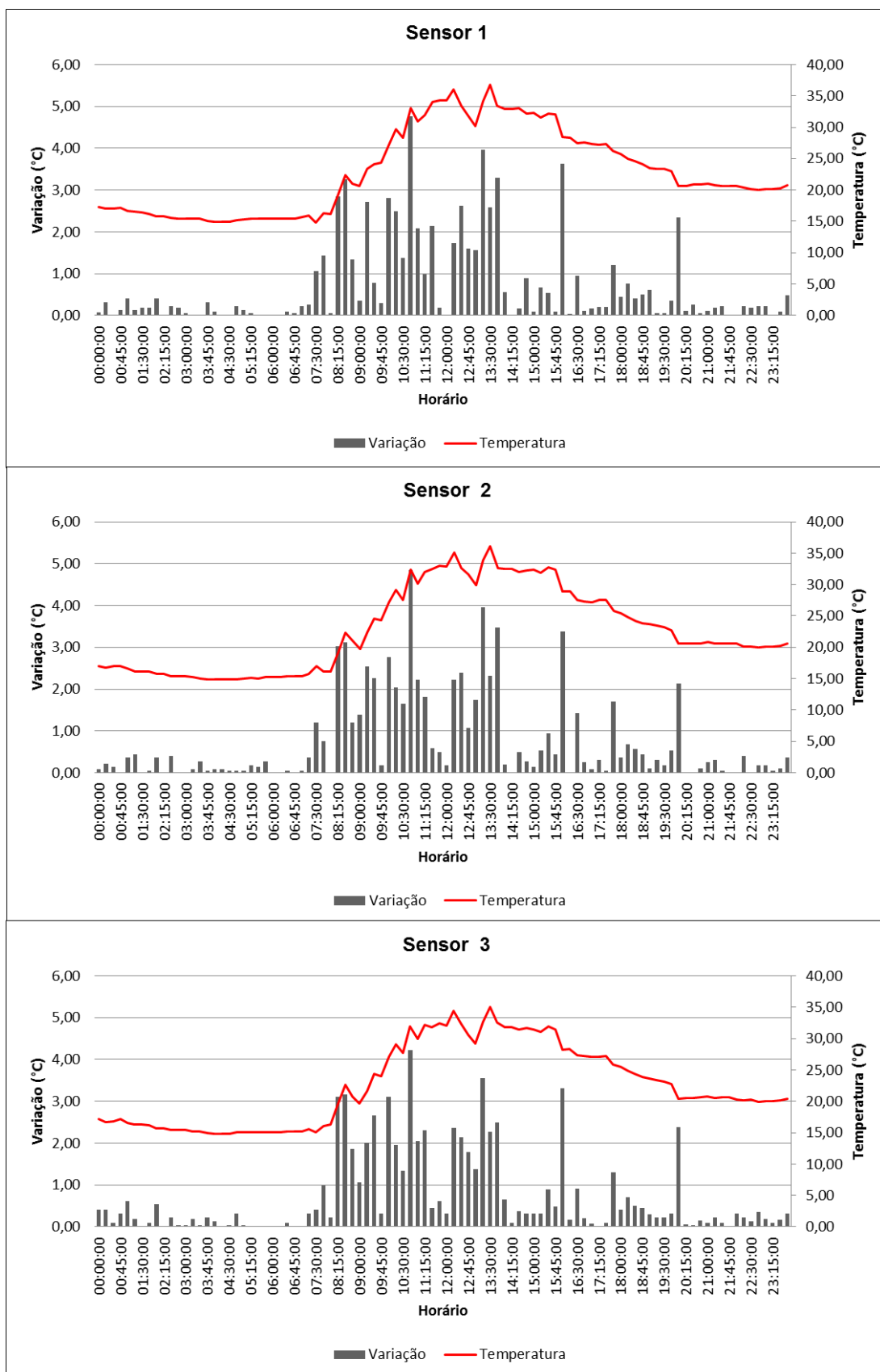


Figura 52: Diferença em módulo das medições consecutivas em intervalos de 15 minutos (barras) e variação contínua da temperatura registrada pelos sensores (linha) de números 1, 2 e 3 dentro da casa de vegetação.

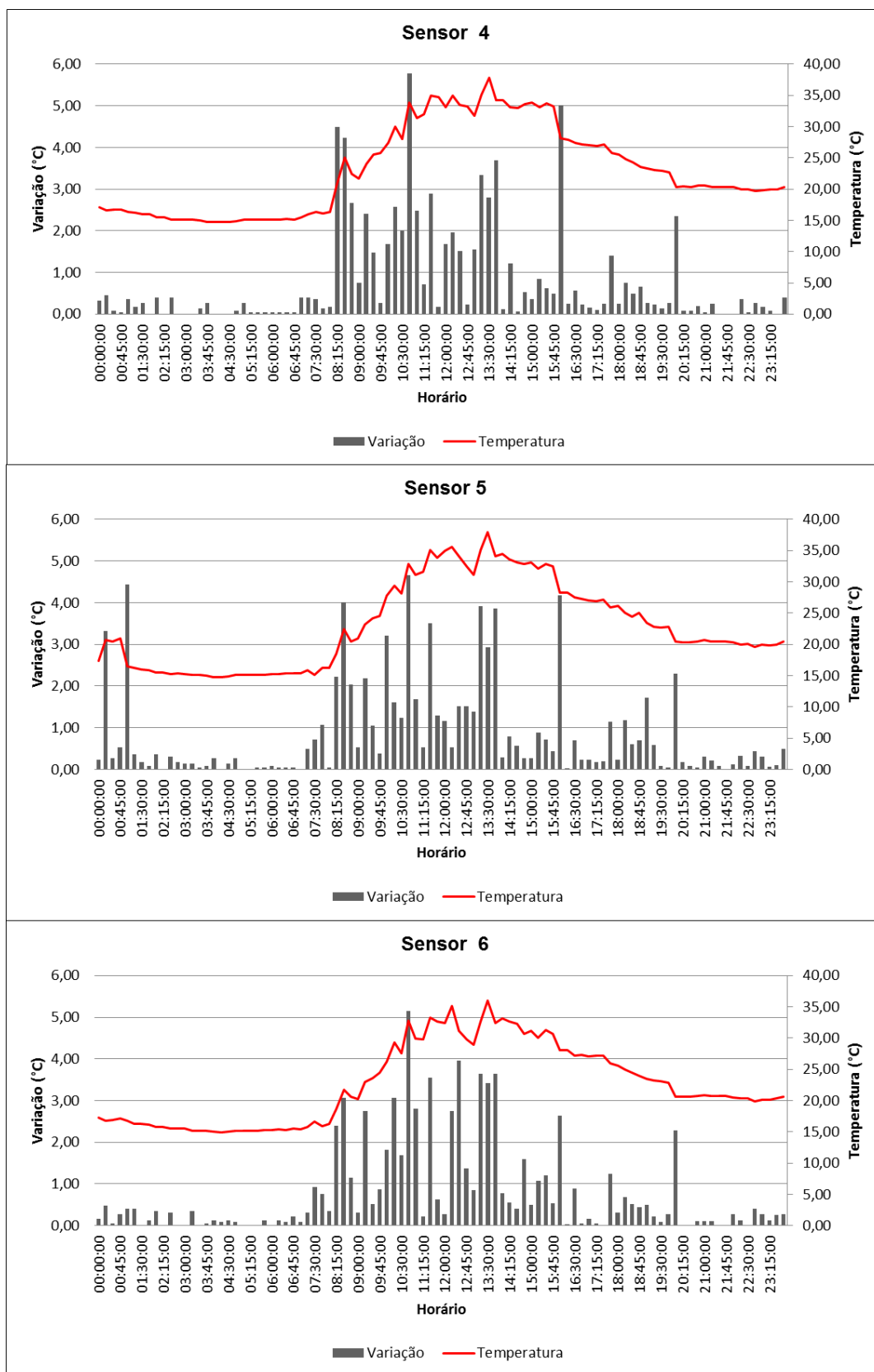


Figura 53: Diferença em módulo das medições consecutivas em intervalos de 15 minutos (barras) e variação contínua da temperatura registrada pelos sensores (linha) de números 4, 5 e 6 dentro da casa de vegetação.

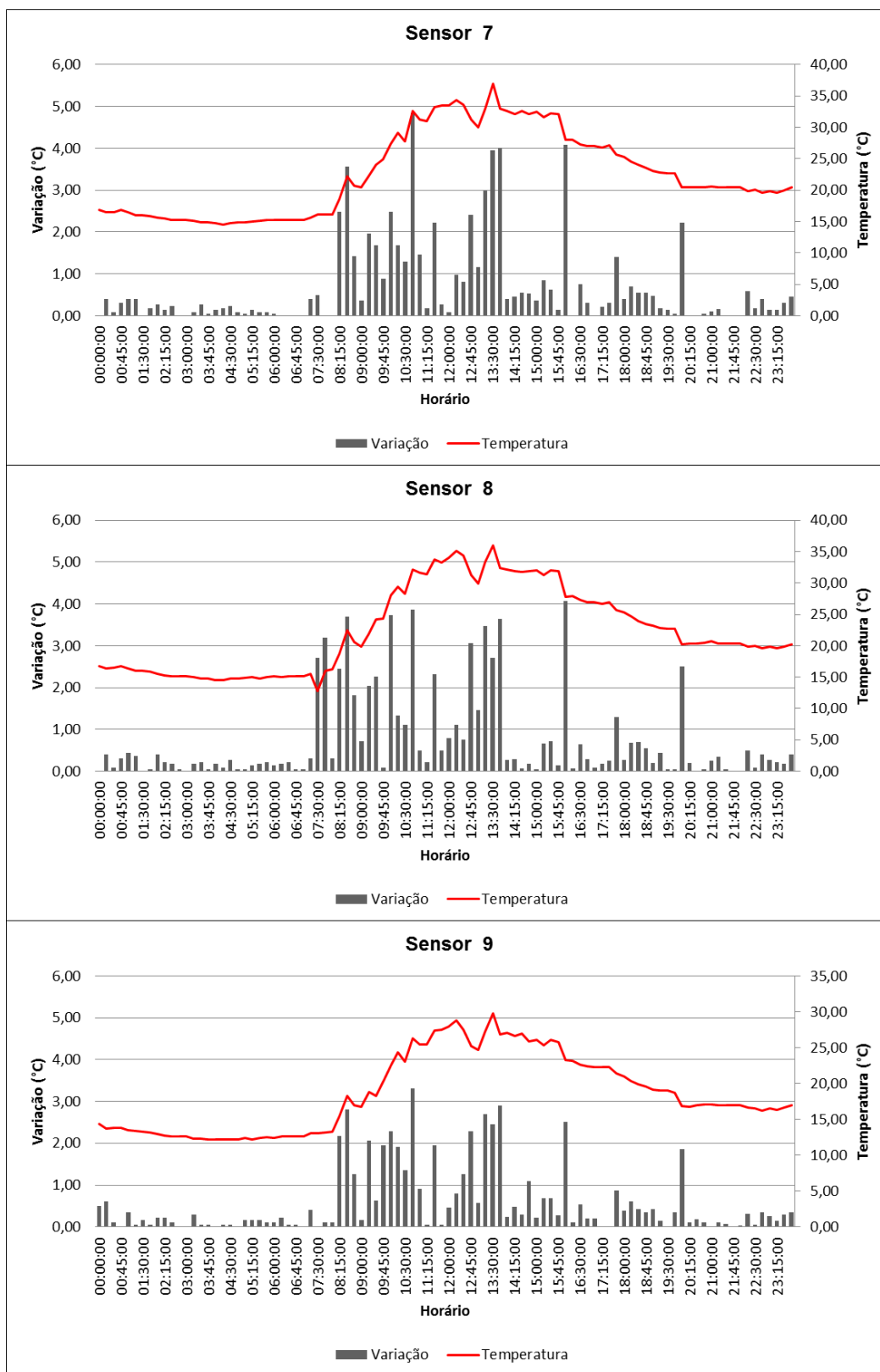


Figura 54: Diferença em módulo das medições consecutivas em intervalos de 15 minutos (barras) e variação contínua da temperatura registrada pelos sensores (linha) de números 7, 8 e 9 dentro da casa de vegetação.

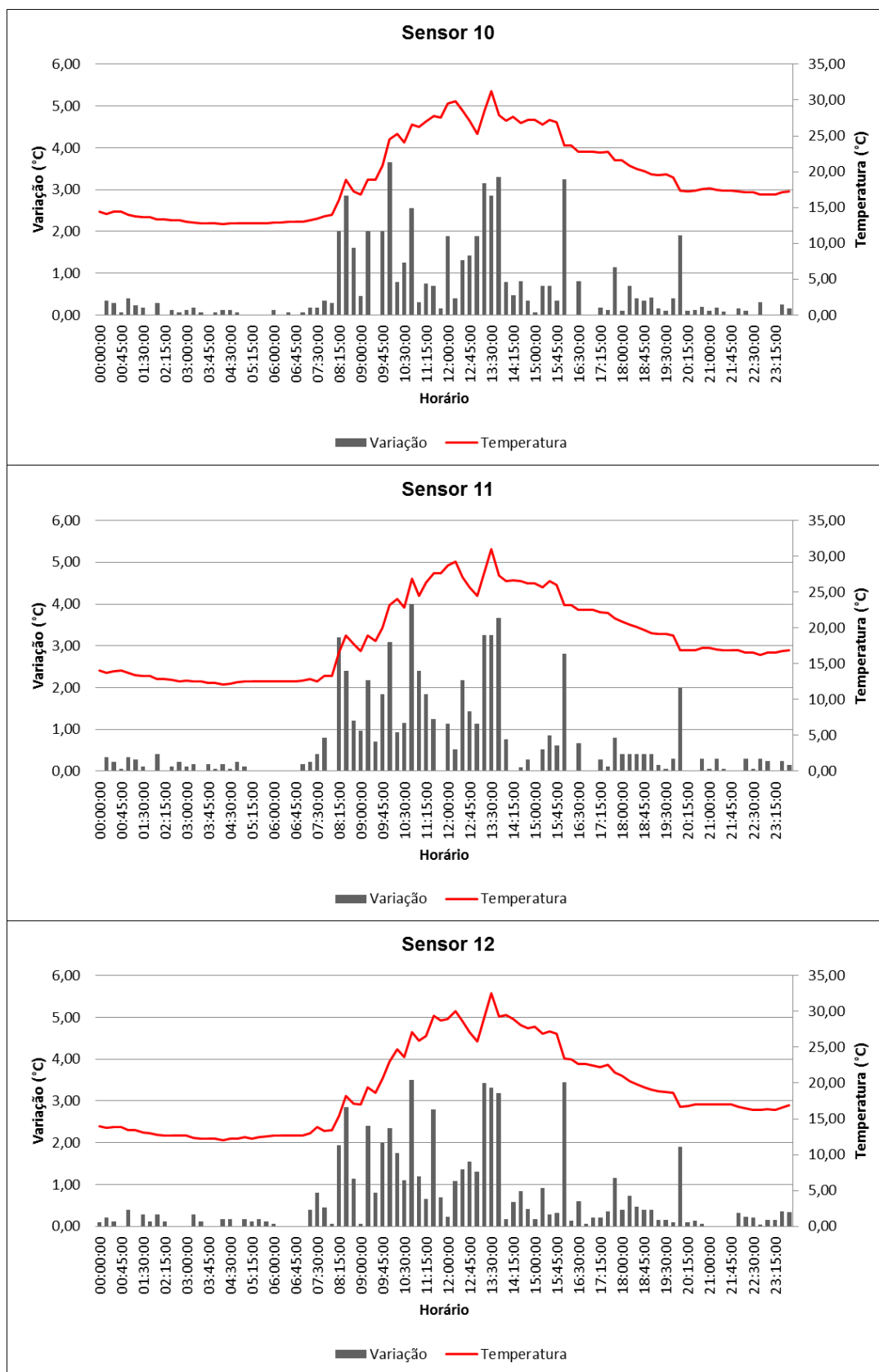


Figura 55: Diferença em módulo das medições consecutivas em intervalos de 15 minutos (barras) e variação contínua da temperatura registrada pelos sensores (linha) de números 10, 11 e 12 dentro da casa de vegetação.

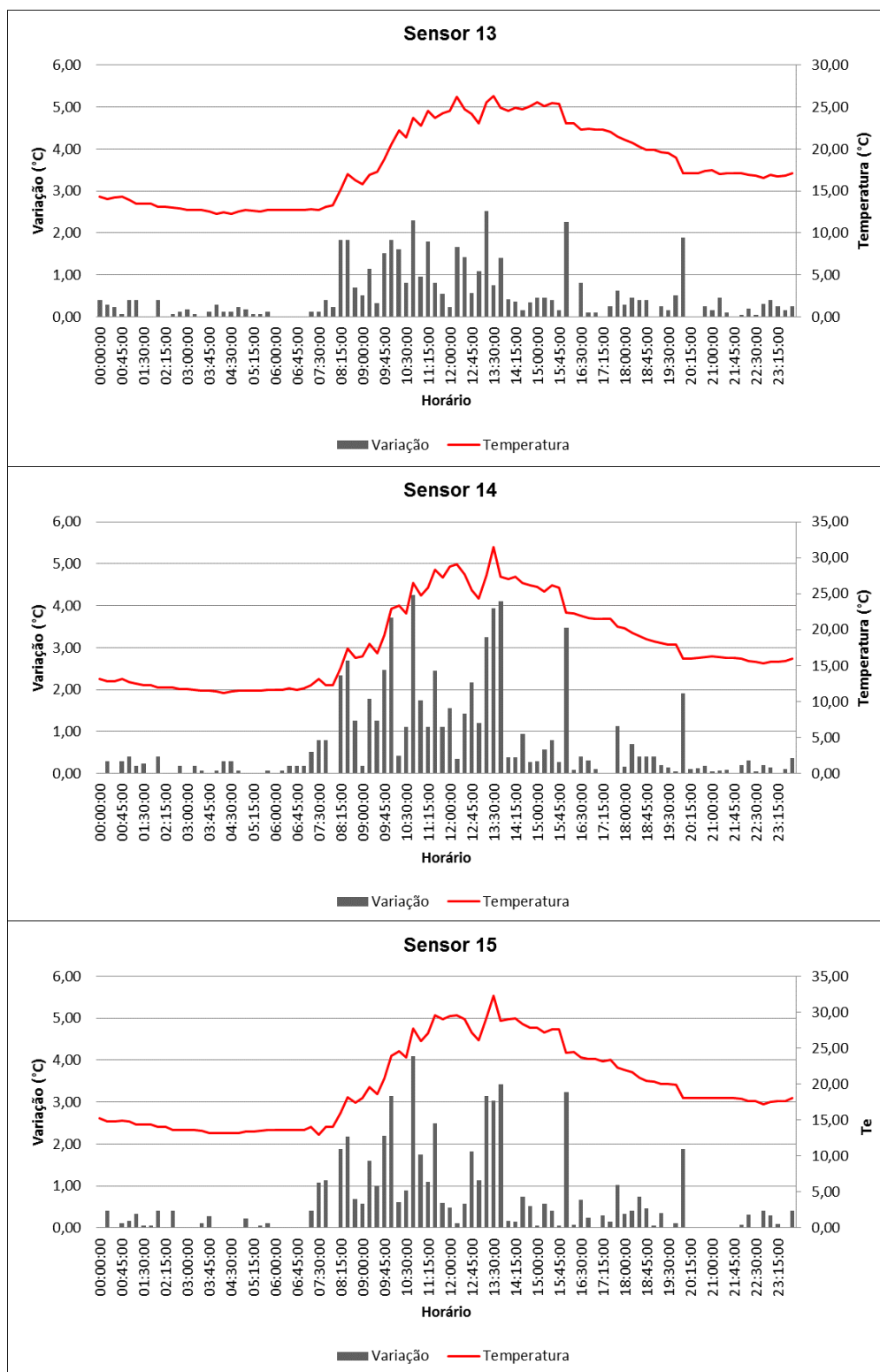


Figura 56: Variação térmica (°C) e temperatura do ar (°C) no interior da casa de vegetação dos sensores 13, 14 e 15. Diferença em módulo das medições consecutivas em intervalos de 15 minutos (barras) e variação contínua da temperatura registrada pelos sensores (linha) de números 13, 14 e 15 dentro da casa de vegetação.

Nas figuras anteriores nota-se que existe uma coerência direta entre o módulo das diferenças mostrados em barras e a variação contínua da temperatura mostrada na forma de linha, sendo que os picos positivos de variações mais intensos ocorrem entre o meio da manhã e o meio da tarde, conforme seria esperado devido a influência da incidência solar. Os dados de temperatura do dia 6 de setembro de 2015 foram especialmente selecionados para essa análise, pois registraram uma significativa variação temporal da temperatura ambiente, variando de 9,20°C a 36,48°C, assim também era esperado uma variação espacial significativa no interior da casa de vegetação, o que foi comprovado através da análise acima, através da qual que a variação temporal em um intervalo de 15 minutos, nas condições físicas da análise acima, chegou a ser superior a 5°C. Porém, apesar de alguns altos extremos, os dados acima mostram que 77% das diferenças registradas foram inferiores a 1°C. Esses dados servem como um referencial de comportamento da variabilidade térmica dentro da casa de vegetação, o que pode nortear a configuração de futuros sistemas de medições térmicas nesse ambiente e também servir como um referencial para ações de agrícolas dentro da casa de vegetação como no trabalho realizado por Erazo et al. (2015).

6.5 Análise da Variabilidade espacial da temperatura do ar no interior de uma casa de vegetação

Esta seção apresenta uma análise geoestatística da variação temporal da temperatura do ar na casa de vegetação, cujos dados foram obtidos com a rede de sensores sem fio desenvolvida no presente trabalho. Para essa análise geoestatística foram selecionados 8 horários diferentes que são às 00:00 hora, 03:00 horas, 06:00 horas, 09:00 horas, 12:00 horas; 15:00 horas; 18:00 horas e 21:00 horas em 15 pontos distribuídos no interior da casa de vegetação, conforme a distribuição mostrada na Figura 35. Esses horários são referentes aos dados coletados no dia 6 de setembro de 2015 que foi usado na análise anterior e que apresentou grande variação da temperatura. Embora tivessem sido coletados dados ao longo de todo o dia, os horários acima foram escolhidos para que a análise fosse a cada intervalo de 3 horas, o que inclui o meio do período da manhã e meio da tarde.

A Tabela 12 mostra os valores dos parâmetros do variograma de distribuição espacial da temperatura do ar ajustado aos modelos Gaussiano e Exponencial em diferentes horários de avaliação.

Tabela 12: Resultados dos parâmetros do variograma da distribuição espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação para os modelos Gaussiano e Exponencial nos horários das 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 horas.

Horário	Modelo do variograma	Variância (Co)	Patamar (Co+C)	Alcance (m)	C/Co+C
0:00h	Gaussiano	0,14	3,3	3,65	0,96
3:00h	Gaussiano	0,001	2,2	2,48	0,99
6:00h	Gaussiano	0,001	2,71	3,17	0,99
9:00h	Gaussiano	0,32	3,70	2,69	0,91
12:00h	Gaussiano	0,01	7,51	1,60	0,99
15:00h	Gaussiano	0,01	8,96	2,59	0,99
18:00h	Gaussiano	0,01	5,85	2,76	0,99
21:00h	Gaussiano	0,001	2,70	3,17	0,99

As Figuras 57, Figura 58, Figura 59 e Figura 60 mostram os gráficos do variograma dos horários das 00:00 hora, 03:00 horas, 06:00 horas, 09:00 horas, 12:00 horas; 15:00 horas; 18:00 horas e 21:00 horas.

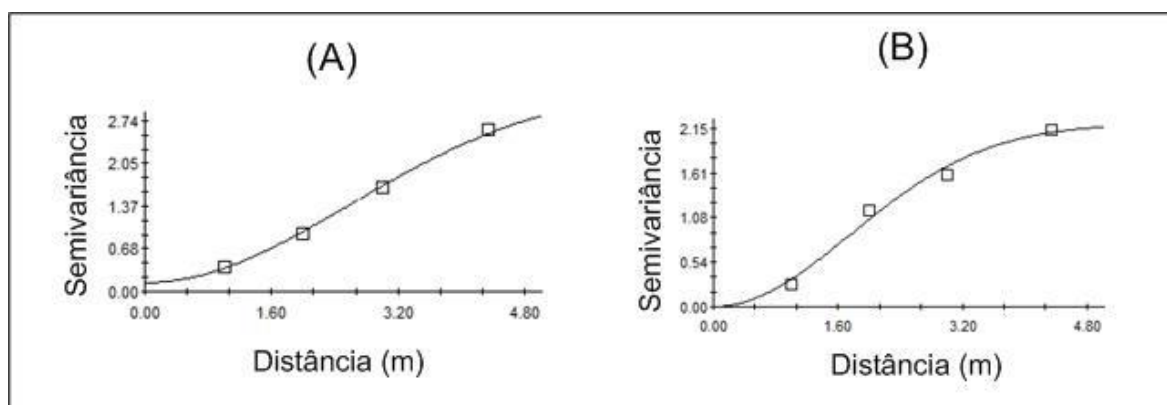


Figura 57: Variograma da variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação no horário das 0:00h (A) e 3:00hs (B).

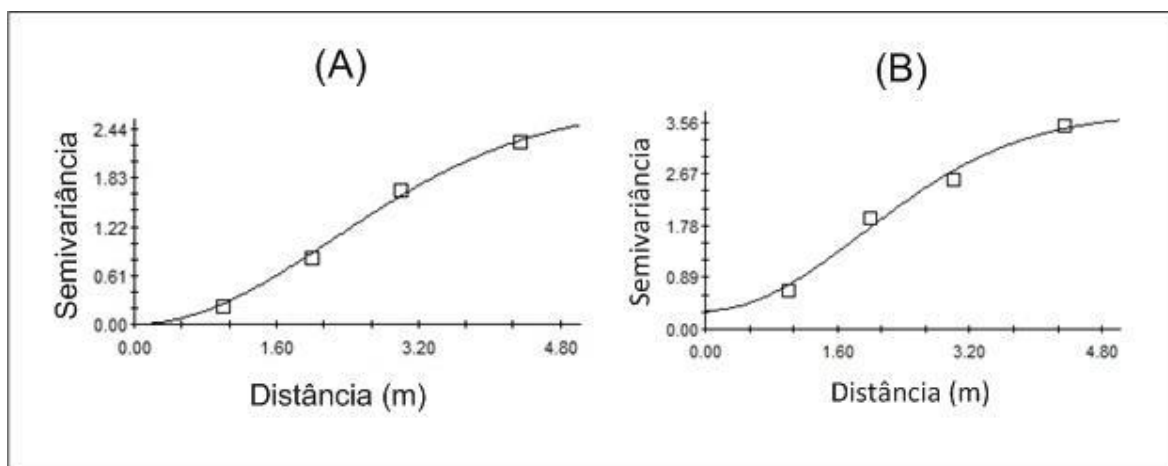


Figura 58: Variograma da variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação no horário das 6:00h (A) e 9:00hs (B).

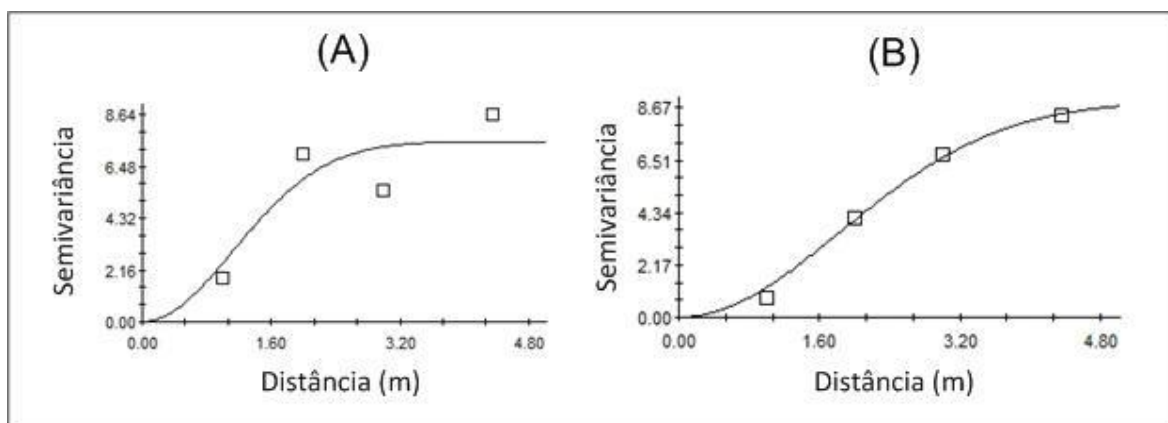


Figura 59: Variograma da variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação no horário das 12:00h (A) e 15:00hs (B).

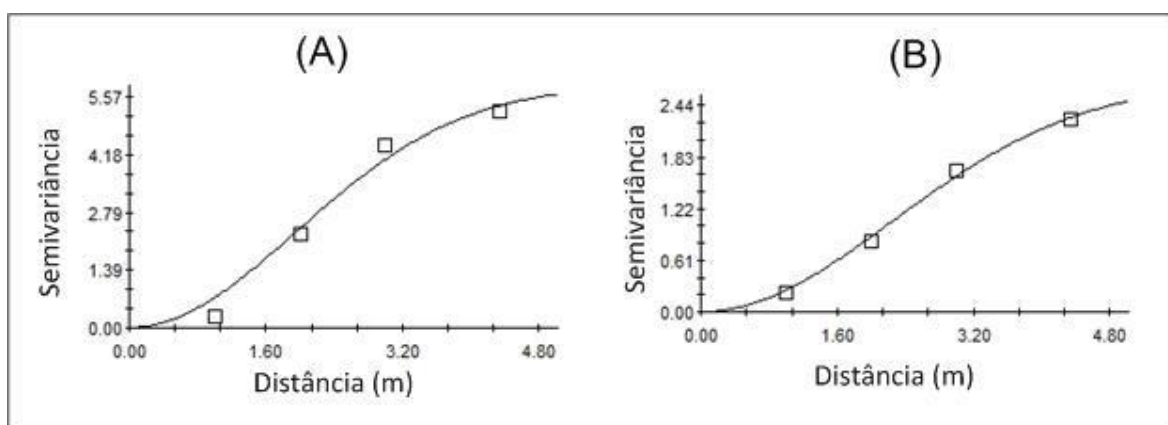


Figura 60: Variograma da variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação no horário das 18:00h (A) e 21:00hs (B).

Nesta avaliação o modelo de variograma que melhor se ajustou foi o tipo Gaussiano

A análise da dependência espacial da temperatura do ar é determinada pelos variogramas e apresentados na Figura 57, Figura 58, Figura 59 e Figura 60. O alcance do variograma mostra a distância na qual as amostras passam a ser independentes. A importância disso se deve ao fato de se entender o comportamento da variável estudada no ambiente (ANDRIOTTI, 2009). Neste sentido, observa-se que o alcance apresentado na Tabela 12 não obteve grandes variações nos horários avaliados, revelando que a temperatura do ar teve um comportamento semelhante nos pontos amostrados durante os horários avaliados.

De acordo com a classificação de Zimback (2001) os valores da proporção espacial ($C/Co+C$) apresentaram para todos os horários forte dependência espacial, comprovando que as informações coletadas possuem dependência, ou seja, os dados possuem um vínculo o que permite tal avaliação.

As Figura 61, Figura 62, Figura 63 e Figura 64 mostram os mapas de variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação nos horários das 00:00 hora, 03:00 horas, 06:00 horas, 09:00 horas, 12:00 horas; 15:00 horas; 18:00 horas e 21:00 horas.

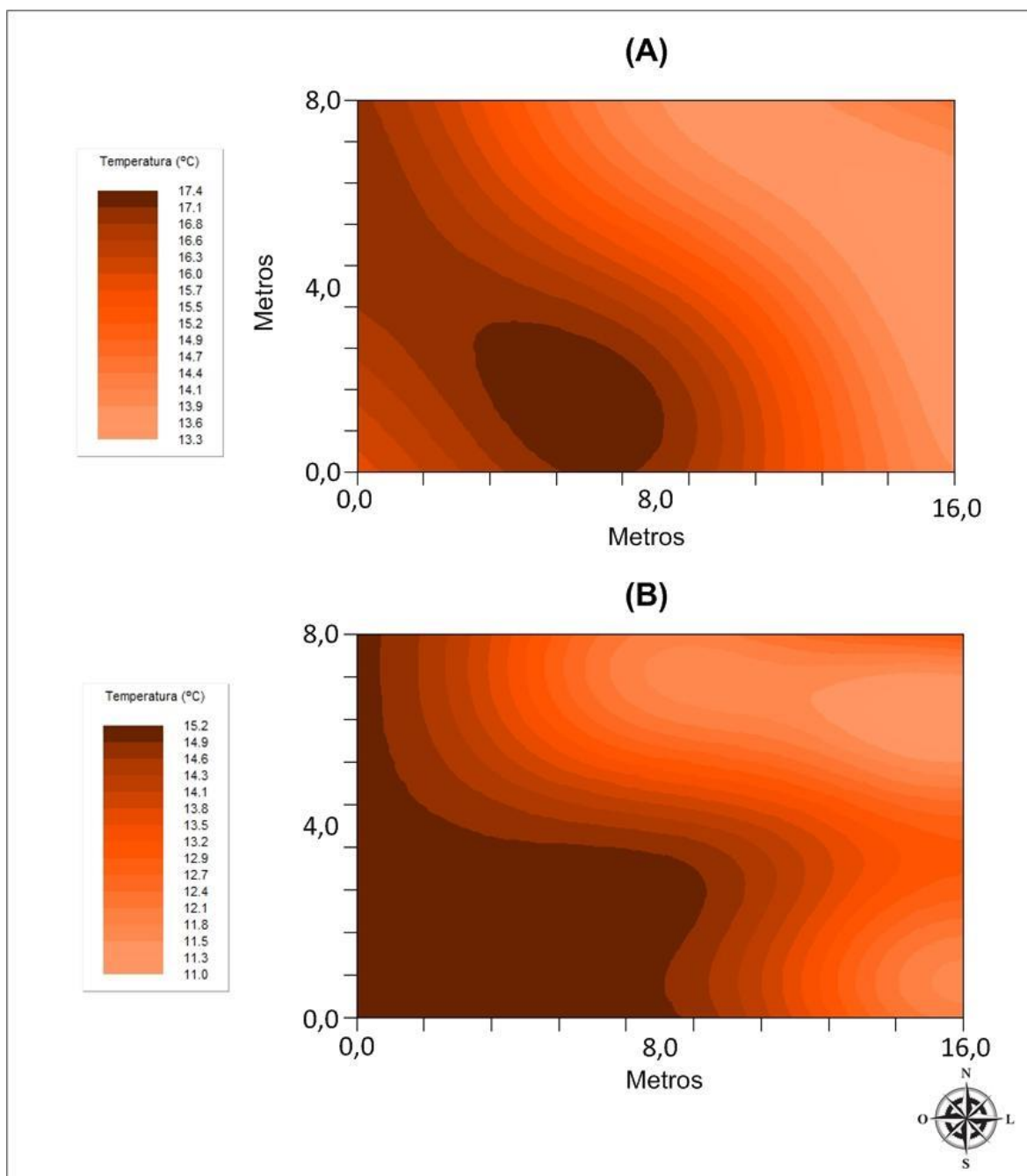


Figura 61: Variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação no horário das 0:00h (A) e 3:00hs (B).

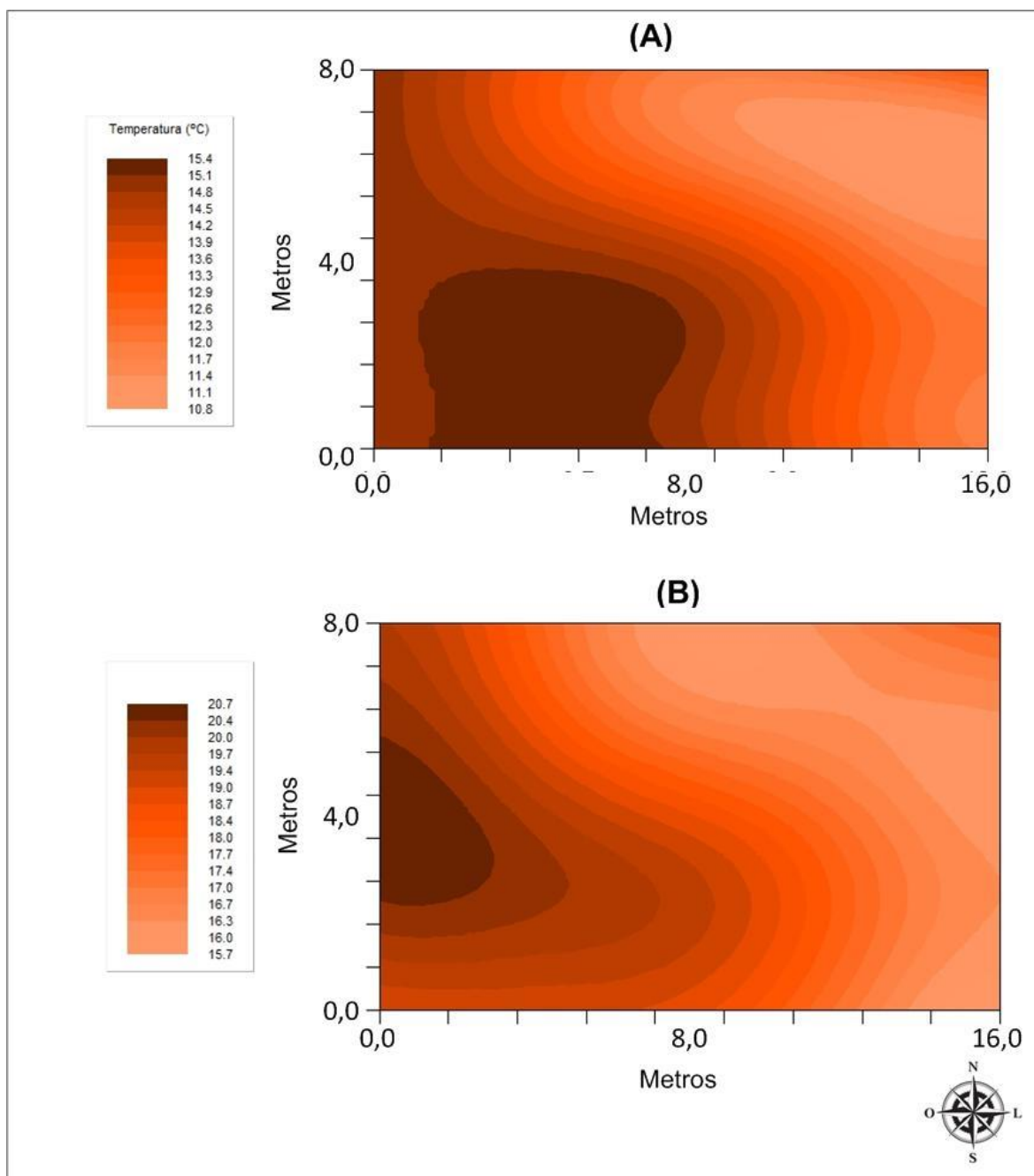


Figura 62: Variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação no horário das 6:00h (A) e 9:00hs (B).

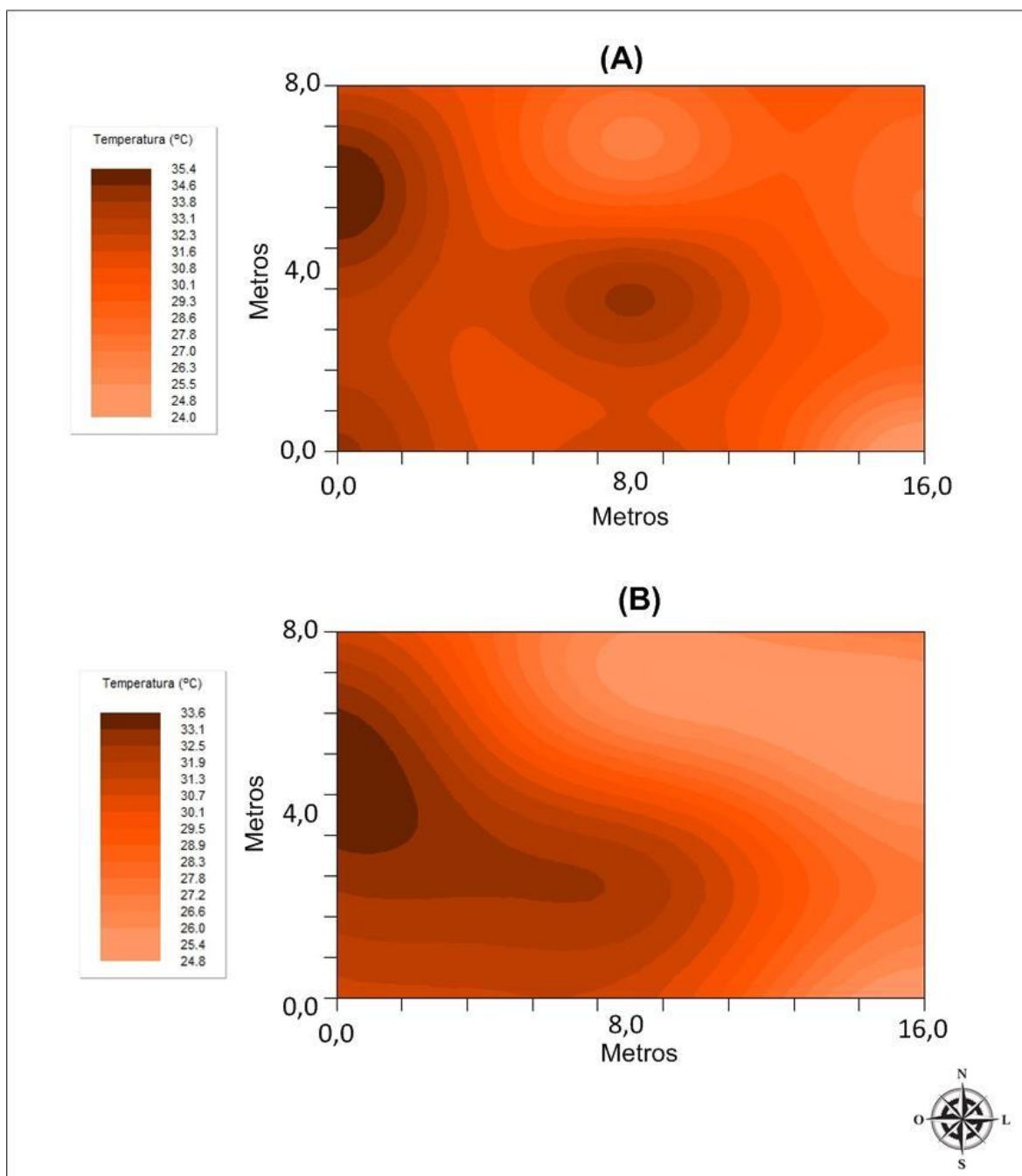


Figura 63: Variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação no horário das 12:00h (A) e 15:00hs (B).

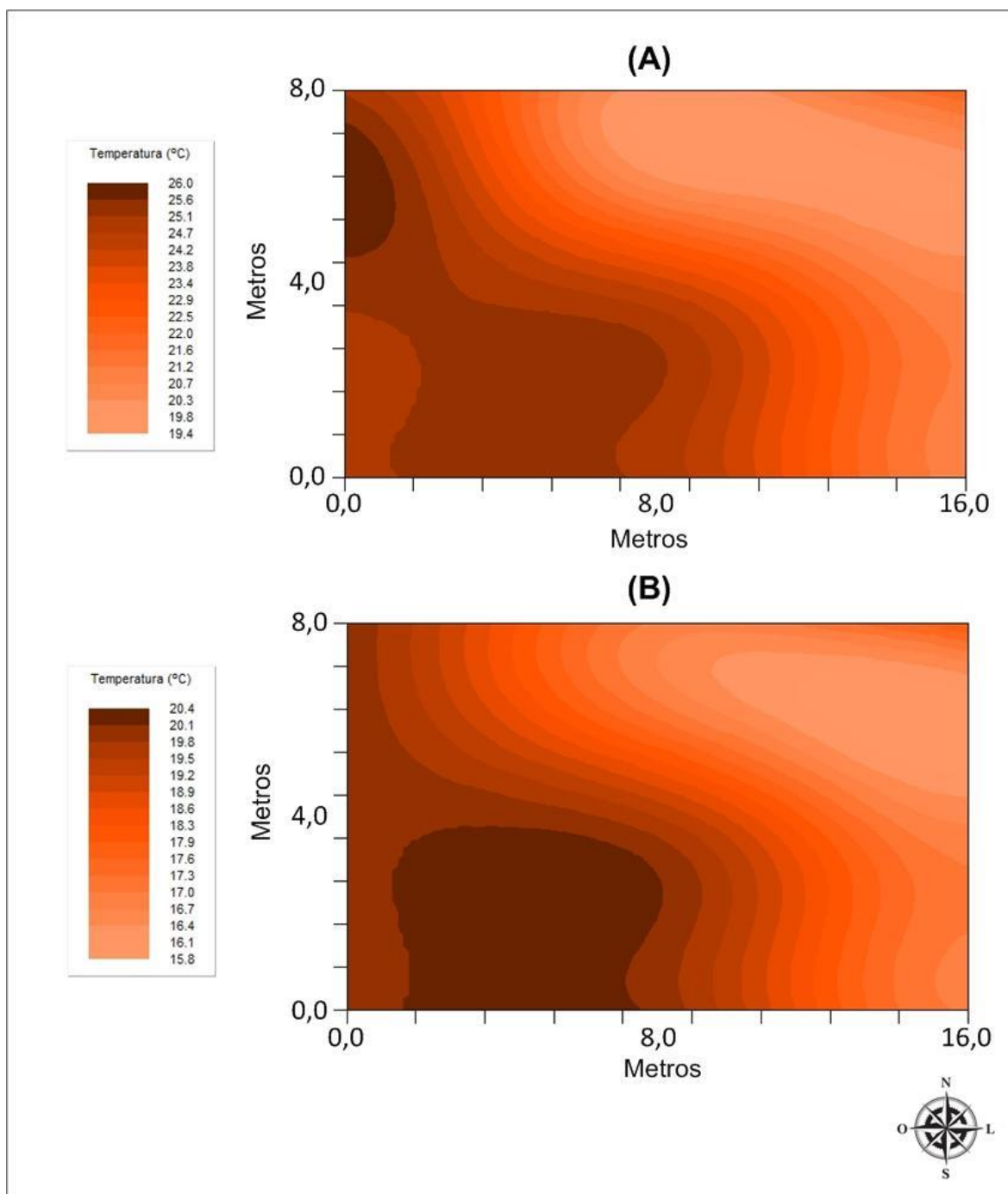


Figura 64: Variabilidade espacial da temperatura do ar no interior da casa de vegetação no horário das 18:00h (A) e 21:00hs (B).

Analisando os dados é possível perceber as maiores temperaturas ocorreram nos horários das 12:00 e 15:00 horas. A temperatura do ar foi maior na região nordeste da casa de vegetação. Isso pode ser explicado devido a dinâmica da corrente de ar e a trajetória do sol no interior da casa de vegetação, provocada por uma outra casa de vegetação vizinha no sentido leste à 3 metros da estrutura estudada. Promovendo zonas onde

a temperatura do ar é maior, fato também relatado pelo trabalho realizado por Tanny et al. (2009).

6.6 Variabilidade espacial da evapotranspiração de referência utilizando o método de Hargreaves e Samani no interior de uma casa de vegetação

Esta seção apresenta os resultados do cálculo da Evapotranspiração de referência (ET_o) utilizando a equação de Hargreaves-Samani, que leva em consideração a radiação solar no topo da atmosfera e o valor da temperatura do ar médio, mínimo e máximo. Os cálculos foram executados com os dados de temperatura no interior da casa de vegetação obtidos com a rede de sensores sem fio desenvolvida no presente trabalho.

A Tabela 13 mostra a análise estatística dos valores da média, máximo, mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação da Evapotranspiração de referência.

Tabela 13: Valores de média, máximo, mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação para medidas de Evapotranspiração de referência (ET_o), em mm.d⁻¹, no interior de uma casa de vegetação levando em consideração 15 pontos de amostragem térmica.

Parâmetros	Et _o (mm.d ⁻¹)
Média	14,52
Máximo	16,51
Mínimo	10,79
σ	1,63
CV (%)	11,22

Observa-se que a Evapotranspiração de referência variou de 4,3 a 6,6 mm.d⁻¹, isso equivale à uma diferença de 2,3 mm, ou seja, se estas duas áreas fossem irrigadas de forma proporcional estaria aplicando água de uma forma mais eficiente, quando comparado a maneira tradicional de irrigar.

A Tabela 14 mostra os parâmetros do variograma da distribuição espacial da Evapotranspiração de referência (ET_o) no interior da casa de vegetação para o dia de maior variação térmica.

Tabela 14: Resultados dos parâmetros do variograma da distribuição espacial da evapotranspiração de referência (ET_o) para o dia de maior variação térmica no interior da casa de vegetação para o modelo Gaussiano.

Modelo do variograma	Variância (C _o)	Patamar (C _o +C)	Alcance (m)	C/C _o +C
Exponencial	0,85	3,71	8,36	0,77

De acordo com a classificação de Zimback (2001) os valores da proporção espacial (C/C_o+C) para a ET_o foi de 0,77, ou seja, forte dependência espacial, sendo assim, os dados estão espacialmente vinculados o que permite tal análise.

Avaliando o modelo do variograma, o que mais se ajustou aos dados foi o tipo Gaussiano. A análise da dependência espacial da temperatura do ar é determinada pelo variograma e apresentado na Figura 65.

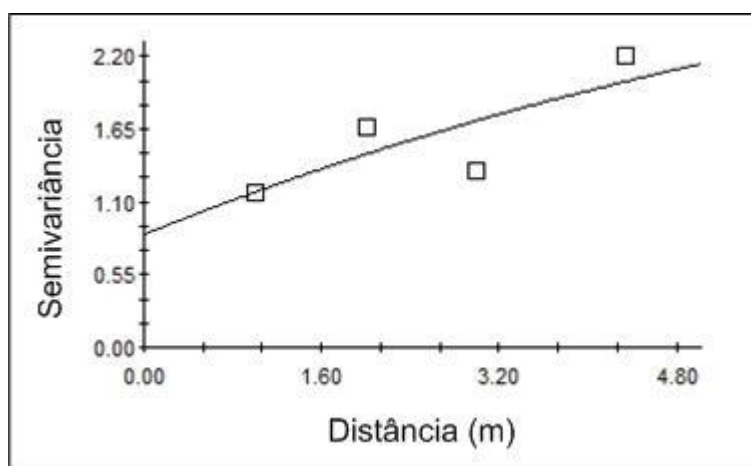


Figura 65: Variograma da variabilidade espacial da evapotranspiração potencial no interior da casa de vegetação.

A Figura 66 mostra o mapa de variabilidade espacial da Evapotranspiração de referência (ET_o) em mm.d⁻¹ no interior da casa de vegetação durante o dia de maior variação térmica, ou seja, no dia 6 de setembro de 2015.

Analisando o mapa de variabilidade é possível perceber que a maior variação da ET_o foi na região nordeste da casa de vegetação, o mesmo que ocorreu com valores de temperatura do ar. Este fato pode ser explicado pelo alto valor da temperatura do ar nesta região da estrutura devido a dinâmica da corrente de ar no seu interior, causando zonas de calor, aumentando a perda de água pelo ambiente e pelas plantas nesta região da

casa de vegetação o que também foi constatado em trabalhos realizados por Maggi et al. (2009); Braga e Klar (2003).

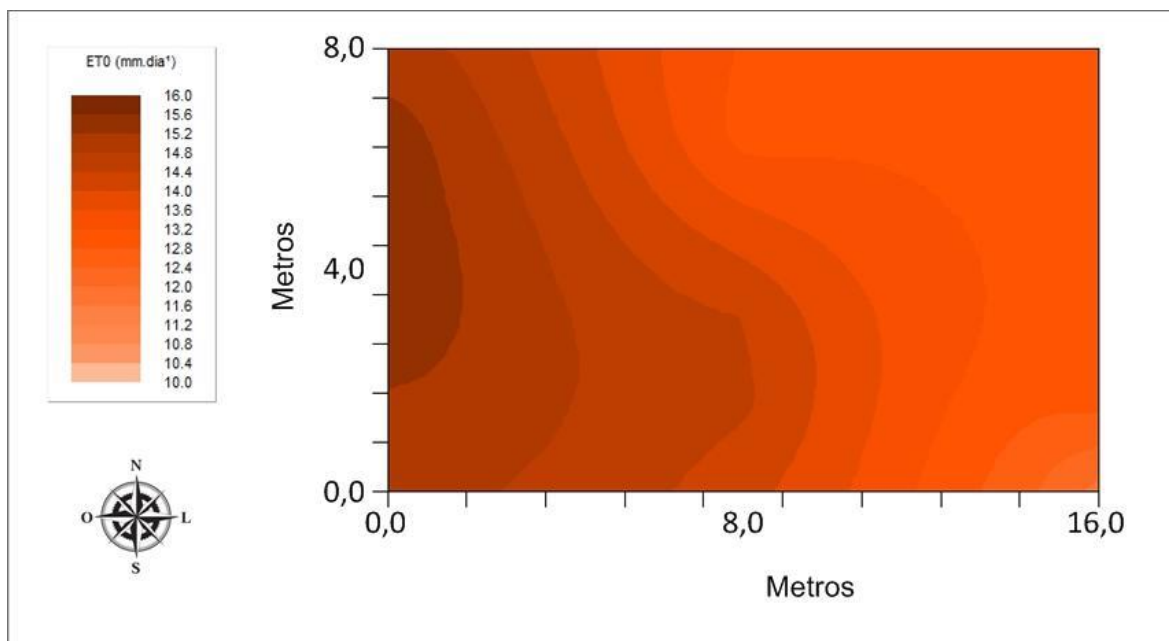


Figura 66: Variabilidade espacial da evapotranspiração potencial (ET₀) no interior da casa de vegetação para o dia 06 de Setembro.

A evapotranspiração é uma variável de grande importância no manejo da irrigação, visto que representa a perda de água pela cultura e pelo ambiente. O presente estudo corrobora com o trabalho desenvolvido por Klar et al. (2006) que mostram que valores de evapotranspiração de referência podem variar no interior de casas de vegetação com diferentes orientações, ou seja, construídas tanto no sentido leste-oeste quanto no sentido norte-sul, concluíram que a forma de construção e o período do dia influenciam diretamente a perda de água pelas plantas.

Cardoso e Klar (2011) mostraram que a variação da evapotranspiração da cultura no interior da casa de vegetação influenciou a produção da cultura do alface, e que nas regiões onde a temperatura do ar foi mais amena, a produtividade da cultura foi maior, pois a mesma sofreu um menor estresse hídrico.

A determinação da perda de água pelas culturas utilizando equações empíricas para determinação da evapotranspiração permite repor a água de forma correta evitando o desperdício e o gasto com energia elétrica (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006; HELLÍN et al., 2015).

Este trabalho permite a determinação da evapotranspiração potencial em diferentes pontos no interior de uma casa de vegetação, trabalho também estudado por Hellín et al. (2015); Lima; Silva; Ribeiro Neto (2010); Zhang et al. (2013). No entanto, poderá ser facilmente adaptado para o monitoramento de ambientes externos e de áreas maiores, ampliando a funcionalidade da ferramenta desenvolvida. O trabalho desenvolvido serve como uma alternativa prática que pode auxiliar o agricultor no quanto e quando irrigar, quesitos essenciais no manejo da irrigação.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com a análise dos resultados obtidos no trabalho e a aplicação prática do sistema desenvolvido, conclui-se que:

- O módulo de rádio XBee, utilizado no desenvolvimento da rede de sensor sem fio, mostrou-se uma tecnologia promissora em aplicações agrícolas. O modelo utilizado possui um alcance teórico de 1,6Km, que é um valor significativo em diversos usos na agricultura. O alcance numa rede de sensores aumenta com a distribuição dos nós da rede que funcionam como repetidores, roteando o sinal até chegar ao coordenador. No entanto, o módulo pode ser facilmente substituído por um de alcance maior, sem alteração do projeto eletrônico, pois os modelos de XBee possuem a mesma disposição dos pinos.
- O Arduino Nano, utilizado como processador no nó de sensoriamento atendeu o objetivo proposto, apresentando ser uma placa de baixo custo, com preço internacional na ordem de U\$ 6,00 a U\$ 15,00, e de fácil programação. Além disso, a placa possui plataforma livre possibilitando a mudança do código fonte pelo usuário sem nenhum tipo de custo adicional.
- O hardware do nó de sensoriamento sem fio desenvolvido para o monitoramento térmico em casas de vegetação apresentou fácil montagem, utilizando poucos componentes eletrônicos e facilmente encontrados no mercado nacional, o que permite um baixo custo de manutenção e desenvolvimento, sendo uma opção tecnológica para o pequeno produtor agrícola.

- O software de aquisição de dados de redes de sensores sem fio atingiu o objetivo proposto, sendo uma ferramenta simples e de fácil manuseio, permitindo seu uso no monitoramento da temperatura em ambientes agrícolas.
- O uso da rede de sensores sem fio mostrou-se uma importante ferramenta no monitoramento de parâmetros físicos à distância e em tempo real. O emprego desta tecnologia facilita a aquisição de dados e o controle de processos agrícolas, revelando também o seu uso em técnicas de agricultura de precisão.
- A aplicação da rede de sensores sem fio no monitoramento da temperatura do ar no interior da casa de vegetação atingiu o objetivo proposto, incluindo a mobilidade por se tratar de um sistema sem fio, ou seja, pode ser trocado de lugar facilmente, dentro do raio de alcance dos transmissores da rede.
- O comportamento da temperatura do ar no interior da casa de vegetação foi variável, evidenciando que o microclima neste ambiente é dinâmico, podendo modificar conforme a localização do sensor e hora do dia. As maiores variações térmicas ocorreram no período que varia das 8:00 às 14:00 horas. Foram registrados casos extremos de variações na ordem de 5°C, em intervalos de tempo de 15 minutos na casa o que evidencia momentos de estresse térmico no ambiente. Também em um determinado momento a casa de vegetação, entre diferentes pontos de medições, chegou a registrar diferenças na ordem de até 7°C.
- A determinação da evapotranspiração de referência utilizando valores de temperatura do ar mostrou-se uma forma fácil e prática de resolução. O comportamento deste parâmetro no interior da casa de vegetação, assim como nos valores térmicos, foi variável assumindo um valor maior na região sudoeste da estrutura.
- A utilização da geoestatística na avaliação da distribuição espacial da temperatura do ar e da evapotranspiração potencial em casas de vegetação foi satisfatória. Com o uso desta análise foi possível avaliar os padrões de distribuição das variáveis, tornando coerente o processo de interpretação e avaliação dos resultados.
- Analisando os resultados é possível observar que o presente trabalho permite uma continuidade de estudos, envolvendo a utilização de sistemas de controle através do uso de rede de sensores sem fio. Além disso, este trabalho possibilita a utilização de um sistema com banco de dados armazenando as informações coletadas e, um sistema de monitoramento via internet, no qual o usuário tem acesso aos dados de qualquer ponto do planeta.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, E. C. S. **Avaliação de parâmetros de desempenho de rede de sensores sem fio em casa de vegetação para cultivo hidropônico de morangos**. 2011. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/ Máquinas Agrícolas) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. 3.ed. São Leopoldo, RS: Unisinos, 2009. 165p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 625 p.

BOJACÁ, C. R.; GIL, R.; COOMAN, A. Use of geostatistical and crop growth modelling to assess the variability of greenhouse tomato yield caused by spatial temperature variations. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.65, n.2, p.219-227, 2009.

BRAGA, M. B.; KLAR, A. E. Plastic tunnel orientation and irrigation management of pepper (*Capsicum annuum*, L.). **Irriga**, v.8, n.1, p.69-77, 2003.

ÇAKIR U.; SAHIN E. Using solar greenhouses in cold climates and evaluating optimum type according to sizing, position and location: A case study, **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 117, p. 245-257, 2015.

CANCELA, J.; FANDIÑO, M.; REY, B.J; MARTÍNEZ, E.M. Automatic irrigation system based on dual crop coefficient, soil and plant water status for *Vitis vinifera* (cv Godello and cv Mencía), **Agricultural Water Management**, v. 151, p.52-63, 2015.

CARDOSO, G. G. G.; KLAR, A. E. Variabilidade espacial na produção da alface em ambiente protegido. **Irriga**, v.16, n.4, p. 382-384, 2011.

CARRASCOSA F. J. M.; SANTANO D. V.; MEROÑO, J.E.; DE LA ORDEN M. S.; FERRER A. G. Open source hardware to monitor environmental parameters in precision agriculture, **Biosystems Engineering**, v. 137, p. 73-83, 2015.

CASAS O.; LÓPEZ, M.; QUÍLEZ M.; FARRE X. M.; HORNERO G.; ROVIRA C.; PINILLA M. R.; RAMOS P. M.; BORGES B.; MARQUES H.; GIRÃO P. S. Wireless sensor network for smart composting monitoring and control, **Measurement**, v. 47, n.1, p. 483-495, 2014.

COATES, R. W.; DELWICHE, M. J.; BROAD, A.; HOLLER, M. Wireless sensor network with irrigation valve control, **Computer and electronics in agriculture**, v.96, n.1, p.13-22, 2013.

DARGIE, W.; POELLABAUER, C. **Fundamentals of wireless sensor networks: Theory and practice**. Chichester: John Wiley & Sons, 2010. 303p.

DONG, X.; VURAN, M. C.; IRMAK. S. Autonomous precision agriculture through integration of wireless underground sensor networks with center pivot irrigation systems, **Ad Hoc Networks**, v.11, n.1, p.1975-1987, 2013.

ERAZO, M.; RIVAS, D.; PEREZ, M.; GALARZA, O.; BAUTISTA, V.; HUERTA, M.; ROJO, J.L. Design and implementation of a wireless sensor network for rose greenhouses monitoring. In: AUTOMATION, ROBOTICS AND APPLICATIONS (ICARA), 6, 2015, Queenstown, New Zealand, . **Abstracts books...** IEEE: International Conference, 2015. p.256-261.

FALUDI, R. **Building wireless sensor networks: A practical guide to the ZigBee mesh networking protocol**. Sebastopol: O'Reilly, 2010, 321p.

FRADEN, J. **Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications**. 4. ed. New York: Springer, 2010. 653 p.

GOMES, T.; BRITO, J.; ABREU, H.; GOMES, H.; CABRAL, J. GreenMon: An efficient wireless sensor network monitoring solution for greenhouses. In: INDUSTRIAL TECHNOLOGY (ICIT), 2015, Seville, Spain. **Abstracts books...** IEEE: International Conference, 2015. p.2192-2197.

GOUMOPOULOS, C.; O'FLYNN, B.; KAMEAS, A.; Automated zone-specific irrigation with wireless sensor/actuator network and adaptable decision support, **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 105, p.20-33, 2014.

HARGREAVES, G. H.; ALLEN, R. G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation, **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.129, p.53-63, 2003.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature, **Applied Engineering in Agriculture**, v.1, n.2, p.96-99, 1985.

HELLÍN H. N.; SÁNCHEZ R. T.; VALLES, F. S.; PÉREZ C. A.; RIQUELME, J. A. L.; MIGUEL, R. DOMINGO. A wireless sensors architecture for efficient irrigation water management, **Agricultural Water Management**, v.151, n.1, p. 64-74, 2015.

KARL, H.; WILLIG, A. **Protocols and architectures for wireless sensor network**. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 481 p.

KITTAS, C.; BARTZANAS, T. Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations. **Building and Environment**, v.42, n.10, p.3774-3784, 2007.

KLAR, A. E.; JADOSKI, C. J.; MAGGI, M. F.; RAMIRO, J.; SANTOS, A. B. A. Distribuição da energia no interior de uma estufa plástica no período do inverno. **Irriga**, v.11, n.2, p.257-265, 2006.

KOLOKOTSA, D.; SARIDAKIS, G.; DALAMAGKIDIS, K.; DOLIANITS, S.; KALIAKATSOS, I. Development of an intelligent indoor environment and energy management system for greenhouses. **Energy Conversion and Management**, v.51, n.1, p.155-168, 2010.

LATHI, B. P. **Sinais e sistemas lineares**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 835 p.

LI, D. **Computer and computing technologies in agriculture**. New York: Springer, 2008. 637p.

LI, Z.; WANG, N.; FRANZEN, A.; TAHER, P.; GODSEY, C.; ZHANG, H.; LI, X. Practical deployment of an in-field soil property wireless sensor network, **Computer standards & interfaces**, v.36, n.1, p.278-287, 2014.

LIMA, G. H. E. L.; SILVA, L. C.; RIBEIRO NETO, P. F. WSN as a tool for supporting agriculture in the precision irrigation. In: International Conference on Networking and Services. INTERNACIONAL CONFERENCE ON NETWORKING AND SERVICES, 6., 2010, Cancun. **Abstracts books...** Rolla: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. p. 137-142.

MAJONE, B.; VIANI, F.; FILIPPI, E.; BELLIN, A.; MASSA, A.; TOLLER, G.; ROBOL, F.; SALUCCI, M. Wireless sensor network deployment for monitoring soil moisture dynamics at the field scale, **Procedia environmental sciences**, v.19, n.1, p. 426-435, 2013.

MARGOLIS, M. **Arduino cookbook**: Recipes to begin, expand, and enhance your projects. Sebastopol: O'Reilly, 2011, 658p.

MORAIS, R.; FERNANDES, M. A.; MATOS, S. G.; SERÔDIO, C.; FERREIRA, P. J. S. G.; REIS, M. J. C. S. A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture, **Computers and Electronics in Agriculture**, v.62, n.1, p.94-106, 2008.

MAGGI, M. F.; LIMA, A. S.; JADOSKI, C.; WAGNER, M. V.; RIBEIRO, F. L.; KLAR, A. E. Horizontal spacialization of evaporation in protected environment in Botucatu - SP. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v.2, n.1, p.44-50, 2009.

NAYAK, A.; STOJMENOVIC, I.; **Wireless sensor and actuator networks**: algorithms and protocols for scalable coordination and data communication. Chennai: Wiley, 2010, 319p.

NIKOLIDAKIS S. A.; KANDRIS D.; VERGADOS D. D.; DOULIGERIS C. Energy efficient automated control of irrigation in agriculture by using wireless sensor networks, **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 113, n.1, p. 154-163, 2015.

NUNES, E. F. **Desenvolvimento de sistema de monitoramento de produção avícola utilizando rede de sensores sem fio**. 2008. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Agrícola/ Máquinas Agrícolas) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

NUNES, E. F.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Avaliação da propagação de sinais de radiofrequência para tecnologia Zigbee em granja de frango de corte, Campina Grande, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.1, p.102-107, 2011.

PACHECO, D. G. F.; MARTÍNEZ, J. M. M.; JIMÉNEZ, M.; PAGÁN, F. J.; CANALES, A. R. SCADA platform for regulated deficit irrigation management of almond trees. **Journal irrigation and drainage engineering**, v. 140, n.1, p.1-9, 2014.

RAGHAVENDRA, C. S.; SIVALINGAM, K. M.; ZNATI, T. **Wireless sensor network**. New York, NY: Springer, 2004, 426p.

RAHALI, A.; ALAMI, H.; HILALI, A. Monitoring and remote control of a greenhouse climate parameters. **Journal of automation and control engineering**, v.3, n.5, p. 425-427, 2015.

REHMAN, A. U.; ABBASI, A. Z.; ISLAM, N.; SHAIKH, Z. A. A review of wireless sensor and networks applications in agriculture, **Computer Standards & Interfaces**, v. 36, n.1, p. 263-270, 2014.

SINCLAIR, I. **Sensors and transducers**. 3. ed. Woborn: Newnes, 2001. 306 p.

SOLOMAN, S. **Sensors handbook**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2010. 1097p.

SRBINOVSKA M.; GAVROVSKI C.; DIMCEV V.; KRKOLEVA A.; BOROZAN V. Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks, **Journal of Cleaner Production**, v. 88, n.1, p.297-307, 2015.

SUPREM, A.; MAHALIK, N.; KIM, K. A review on application of technology systems, standards and interfaces for agriculture and food sector. **Computer Standards & Interfaces**, v. 35, n.1, p. 355-364, 2013.

TANNY, J.; COHEN, S.; GRAVA, A.; NAOR, A.; LUKYANOV, V. The effect of shading screens on microclimate of apple orchards. **Acta Horticulturae**, v.807, n.1, p.103-108, 2009.

UMAR, A. **Mobile computing and wireless communications: applications, networks, platforms, architectures, and security**. Pennsylvania: NGE Solutions, 2004, 712p.

VETELINO, J.; REGHU, A. **Introduction to sensors**. Boca Raton: CRC Press, 2011. 171p.

WANG, J.; DAMEVSKI K.; CHEN H. Sensor data modeling and validating for wireless soil sensor network, **Computers and Electronics in Agriculture**, v.112, n.1, p.75-82, 2015.

ZHANG, M.; LI, M.; WANG, W.; LIU, C.; GAO, H. Temporal and spatial variability of soil moisture based on WSN. **Mathematical and Computer Modelling**, v.58, n.1, p.826-833, 2013.

ZHAO, C. J.; LI, M.; YANG, X. T.; SUN, C. H.; QIAN, J. P.; JI, Z. T. A data-driven model simulating primary infection probabilities of cucumber downy mildew for use in early warning systems in solar greenhouses. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.76, n.2, p.306-315, 2011.

ZHENG, J.; JAMALIPOUR, A. **Wireless sensor network: A networking perspective**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009. 471p.

ZHUIYKOV, S. Solid-state sensors monitoring parameters of water quality for the next generation of wireless sensor networks, **Sensors and Actuators**, v.161, n.1, p. 1-20, 2012.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. Botucatu: Faculdade de Ciência Agronômica/UNESP, 2001. 114p. Tese Livre-Docência.