

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ/CAMPUS DE CASCAVEL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**SISTEMA AUTOMATIZADO DE AQUISIÇÃO, EM TEMPO REAL, DE UMIDADE E
TEMPERATURA DO SOLO NA IRRIGAÇÃO**

ANIBAL MANTOVANI DINIZ

CASCAVEL – Paraná – Brasil

MARÇO 2017

ANIBAL MANTOVANI DINIZ

**SISTEMA AUTOMATIZADO DE AQUISIÇÃO, EM TEMPO REAL, DE UMIDADE E
TEMPERATURA DO SOLO NA IRRIGAÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Antônio Vilas Boas

CASCADEL – Paraná – Brasil

MARÇO 2017

D61s Diniz, Anibal Mantovani.
 Sistema automatizado de aquisição, em tempo real, de umidade e
 temperatura do solo na irrigação / Anibal Mantovani Diniz. — Cascavel:
 UNIOESTE, 2017.
 xiii, 60p., anexo: il. color., figs., tabs.

 Orientador: Prof. Dr. Márcio Antônio Vilas Boas

 Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná,
 Campus de Cascavel, 2017
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de
 Ciências Exatas e Tecnológicas.

 Bibliografia

 1. Automação - Irrigação. 2. Arduino(Controlador programável).
 3. Sensor de solo. 4. Rede mesh. I. Vilas Boas, Márcio Antônio. II.
 Universidade Estadual do Oeste do Paraná. III. Título.

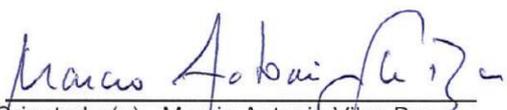
CDD 20.ed. 631.587

¹ As revisões de português, de inglês e de normas de monografia do PGEAGRI foram feitas pelo Prof. Dr. José Carlos da Costa em 20/04/2017.

ANIBAL MANTOVANI DINIZ

Sistema Automatizado de Aquisição de Dados de Umidade e Temperatura do Solo em Sistemas de Irrigação

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, linha de pesquisa Recursos Hídricos, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:


Orientador(a) - Marcio Antonio Vilas Boas

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)


Jair Antonio Cruz Siqueira

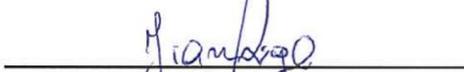
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)


Silvio César Sampaio

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)


Evando Carlos Pessini

Universidade Tecnológica Federal do Paraná


Jiam Pires Frigo

Universidade Federal da Integração Latino-Americana (Unila)

Cascavel, 8 de março de 2017

BIOGRAFIA

Anibal Mantovani Diniz é brasileiro, nascido em 16 de setembro de 1962 na cidade de Goioerê, Paraná. cursou o segundo grau no Colégio Wilson Joffre em Cascavel - PR com a habilitação de Desenhista de Arquitetura, possui graduação em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia de Joinville (1985), graduação em Informática pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (1997), mestrado em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Santa Catarina (2002) e desde 2013 realiza estudos de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, na Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Atualmente é professor assistente da Universidade Estadual do Oeste do Paraná e Diretor do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CCET), da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, já em seu segundo mandato; atua no curso de Ciência da Computação no *campus* de Cascavel como professor e também foi coordenador do curso por dois mandatos. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Metodologia e Técnicas da Computação. Atuando, principalmente, nos seguintes temas: sistema digitais, sistemas automatizados, sistemas distribuídos e irrigação.

“Homens razoáveis se adaptam ao mundo.
Homens não razoáveis adaptam o mundo a si.
Por isso, todo progresso depende destes últimos”.

George Bernard Shaw

Dedico para toda a minha família, que amo, que
respeito e sinto orgulho.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial, a minha esposa Arlete Martins Diniz e aos meus filhos Alan e Amanda, sempre presentes em minha vida, confiando na minha capacidade em vencer estes desafios pessoais e profissionais e apostando em um futuro melhor. Vivemos a vida que merecemos, com muito respeito, muita compreensão e amor, este equilíbrio me permite ser quem sou; aos meus pais Assis Dias Diniz e Alaíde Mantovani Diniz, exemplos de honestidade, bondade e apoio em toda esta jornada; aos meus irmãos: Arnaldo, Antonio e Alessandro; à minha sogra Olivia Muran, pela sua inquietude e energia que causam inveja e nos empurra à frente; a todos os outros familiares que igualmente, diretamente ou indiretamente me fazem uma pessoa feliz e querido.

Ao professor Dr. Márcio Antônio Vilas Boas, meu orientador e amigo, sempre com muitas ideias novas, criativo, parceiro e um lutador pela universidade e pelas pessoas que a compõem, sempre serei grato pela oportunidade que me ofereceu através deste trabalho e pelo exemplo de professor que continuamente se reinventa e se doa.

Ao meu grande amigo e irmão Carlos José Maria Olguin, pelo companheirismo, pelo convívio diário, pelo apoio oferecido sempre e confidências que só os grandes amigos fazem.

À banca avaliadora, pela leitura e contribuições para melhoria do trabalho, sua atenção e disponibilidade neste momento, banca composta pelos professores Dr. Silvio César Sampaio, Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira, Dr. Jiam Pires Frigo e Dr. Evando Carlos Pessini, que são grandes professores e pesquisadores, além de amigos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola - PGEAGRI, seus funcionários e coordenação, pela oportunidade e suporte durante todo o curso.

À UNIOESTE, instituição da qual faço parte e que possibilitou todas as condições para minha capacitação.

A todos os professores do PGEAGRI, especialmente àqueles que ministraram aula para mim, Eloy Lemos de Mello, Márcio Antônio Vilas Boas, Benedito Martins Gomes, Mariângela Alice Pieruccini, Luciana Pagliosa Carvalho Guedes, Silvia Renata Machado Coelho, Divair Christ, Eduardo Godoy de Souza e Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa, quer seja como aluno ouvinte ou especial, nos primeiros passos dados para ingressar no Programa, ou como aluno regular do Programa, pelo aprendizado recebido.

A todos aqueles amigos e colegas de turma que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho de suma importância para minha vida profissional e pessoal, em especial, a todos aqueles que participaram das infindáveis listas de exercícios.

Às minhas colegas de trabalho Cléya Aparecida Henz e Neiva Lucia Schvan Machado, pelo apoio dado a mim e ao CCET durante esta fase da minha vida, pois sempre fazem muito além das suas funções e obrigações dos cargos.

SISTEMA AUTOMATIZADO DE AQUISIÇÃO, EM TEMPO REAL, DE UMIDADE E TEMPERATURA DO SOLO NA IRRIGAÇÃO

RESUMO

A agricultura moderna está baseada na aplicação de técnicas, metodologias e equipamentos que otimizem os seus processos, aumentando, assim, a produção agrícola, reduzindo custos e interferindo menos na natureza. Uma área importante de pesquisa na Engenharia Agrícola é o desenvolvimento e a utilização de equipamentos e sensores eletrônicos para apoiar o aumento da produtividade agrícola. Este trabalho apresentou uma contribuição para a Irrigação através do desenvolvimento e uso de *software* e *hardware* livre para medições diretas das grandezas de umidade e temperatura no solo durante todo o ciclo da planta, permitindo assim que sistemas otimizem a utilização da água no processo. Na proposta do sistema foram utilizados quatro sensores de umidade, um resistivo e três capacitivos. A pesquisa foi realizada em laboratório e o solo utilizado no experimento foi coletado no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná. O solo foi caracterizado como Latossolo Vermelho Distroférico típico e textura muito argilosa (66%). O solo foi desterrado e seco em estufa, depois dividido em 20 recipientes com adição de volumes de água conhecidos em cada um deles. Foi desenvolvida uma rede de nós sensores do tipo *Mesh* para ler e transmitir os dados lidos para um *Gateway* único. O nó sensor foi projetado e construído com um Arduino Nano, rádio NRF24L01, sensores capacitivos do tipo SHT20 e DHT22 além do FC-28 que é resistivo. O sistema também contou com um *Real Time Clock* DS1302, três células fotovoltaicas e circuito carregador de bateria. O circuito do *Gateway* que conecta o sistema à *internet* foi construído com uma Arduino Uno. Para armazenar os dados e disponibilizá-los utilizou-se o *software* Domoticz em um servidor conectado à *internet*. Os dados foram obtidos a partir dos sensores colocados nos recipientes e um dos resultados foi a modelagem cúbica da relação entre cada um dos sensores, o TDR e o método da estufa. Os valores do Coeficiente de Determinação estatística obtidos indicam que os modelos que melhor explicam a relação entre os valores obtidos pelo método da estufa são o da TDR e do sensor resistivo, apesar de que os outros sensores também apresentaram um bom coeficiente de determinação. O consumo da placa do nó sensor é de 168 mW e a distância testada entre os dispositivos até 100 m demonstrou que não houve perdas do pacote de dados. O custo obtido de um nó foi de R\$ 251,00 e do *Gateway* de R\$ 115,00. O custo de um TDR novo, no Brasil, do modelo utilizado neste experimento é de R\$ 176.000,00. Logo, a análise dos dados apresentada mostrou a viabilidade de se utilizar os sensores propostos em rede e resultou em um modelo a ser aplicado para cada dispositivo a um custo viável ao produtor rural.

Palavras-chave: eficiência, automação, Arduino, sensor de solo, rede *mesh*.

AUTOMATED SYSTEM ACQUISITION IN REAL TIME, TEMPERATURE AND MOISTURE IN IRRIGATION

ABSTRACT

The modern agriculture is based on the application of techniques, methodologies and equipment that optimize their processes, thus increasing agricultural production, reducing costs and interfering less in nature. An important area of research in Agricultural Engineering is the development and use of equipment and sensors electronic to support increased agricultural productivity. This work presented a contribution to irrigation through the development and use of free software and hardware for direct measurements of soil moisture and temperature values during the plant cycle, thus allowing optimize the use of water in the process. In the system proposal, four moisture sensors were used, one resistive and three capacitive. The research was carried out in the laboratory and the soil used in the experiment was collected at the Experimental Nucleus of Agricultural Engineering of the State University of the West of Paraná. The soil was characterized as typical Distroferric Red Latosol and very clayey texture (66%). The soil was discarded and oven dried, then divided into 20 containers with addition of known water volumes in each. A network of Mesh-type sensors was developed to read and transmit data read to a single Gateway. The sensor node was designed and built with an Arduino Nano, NRF24L01 radio, capacitive sensors of type SHT20 and DHT22 in addition to FC-28 that is resistive. The system also featured a Real Time Clock DS1302, three photovoltaic cells and battery charger circuit. The *Gateway* circuit that connects the system to the internet was built with an Arduino Uno. *Domoticz software* was used to store the data and make it available on a server connected to the Internet. The data were obtained from the sensors placed in the containers and one of the results was the cubic modeling of the relationship between each of the sensors, the TDR and the greenhouse method. The values of the coefficient of statistical determination obtained show that the models that best explain the relation between the values obtained by the greenhouse method are the TDR and the resistive sensor, although the other sensors also presented a good coefficient of determination. The consumption of the sensor node board is 168 mW and the distance tested between devices up to 100 m showed that there was no loss of the data packet. The cost obtained from a node was R\$ 251.00 and the Gateway R\$ 115.00. The cost of a new TDR in Brazil of the model used in the experiment is R\$ 176,000.00. Therefore, the analysis of the data presented showed the feasibility of using the sensors proposed in the network and resulted in a model to be applied for each device at a viable cost to the rural producer.

Keywords: efficiency, automation, Arduino, soil sensor, mesh network.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	4
2.1 Geral	4
2.2 Específicos	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 O solo e curva característica de retenção de água	5
3.2 O tensiômetro	8
3.2.1 Tensiometria no manejo da irrigação.....	10
3.3 Semeadura da lavoura em condições favoráveis de umidade e temperatura do solo	11
3.4 Automação por microcontroladores	12
3.5 Microcontrolador.....	12
3.6 Sensores	13
3.7 Sensor resistivo	16
3.8 Rádio de comunicação	17
3.9 Rede de sensores sem fio (RSSF)	19
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	21
4.1 Local da pesquisa	21
4.2 Etapas do experimento.....	22
4.3 O solo utilizado	23
4.4 Concepção do <i>hardware</i>	25
4.5 Concepção do <i>software</i>	26
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1 O projeto e montagem do nó sensor	27
5.2 O projeto e montagem do <i>Gateway</i>	30
5.3 O <i>software</i>	31
5.4 <i>Time domain reflectometry</i> - TDR.....	35
5.5 O experimento.....	36
5.6 Dados obtido pelos sensores de umidade	39
5.7 Consumo de energia do nó sensor.....	41
5.8 Comportamento da rede <i>mesh</i>	42

5.9	Custo do produto implementado.....	43
6	CONCLUSÕES	44
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
	REFERÊNCIAS	46
	APÊNDICES.....	50
	APÊNDICE A VALORES DA CONSTANTE DIELÉTRICA (KA) E DA UMIDADE (U) NA TDR NOS 20 RECIPIENTES.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Características físico-químicas do solo da área experimental no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola, Cascavel – PR, 2011.....	25
Tabela 2	Número de pacotes enviados pelo nó e recebidos pelo <i>Gateway</i>	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Valores de umidade volumétrica e potencial matricial obtidos com a câmara de pressão de Richards e com o papel-filtro.....	6
Figura 2	Diagrama em blocos do circuito integrado DS18B20 – sensor de temperatura..	14
Figura 3	Diagrama de funcionamento do sensor de pressão da série MPX5500.	15
Figura 4	Sensor de pressão MPX5500DP.	15
Figura 5	Sensor de umidade e temperatura.....	16
Figura 6	Sensor de umidade resistivo.....	16
Figura 7	Modulação com sinal modulante binário tipo ASK, FSK e PSK.	17
Figura 8	Diagrama de blocos do transceptor CC1000.	18
Figura 9	Sistema de comunicação digital com Arduino.....	18
Figura 10	Diagrama dos elementos que compõe a rede de sensores sem fio.	19
Figura 11	Esquema de transmissão e retransmissão <i>Multi-hop</i> entre os nós sensores.	20
Figura 12	Localização da retirada das amostras de solo.	21
Figura 13	Laboratório de Eletrônica Digital – Unioeste, <i>campus</i> de Cascavel.	22
Figura 14	Solo no local de coleta da área do Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola.	24
Figura 15	Circuito do nó (protótipo).	28
Figura 16	Carregador de bateria que utiliza células solares.	28
Figura 17	Protótipo do nó sensor, montado com os sensores.	29
Figura 18	Sensor DHT22 modificado: a) original; b) sem invólucro; c) semiesfera de ABS; d) resultado final com o sensor dentro do invólucro e com uma tela aplicada....	29
Figura 19	Montagem do <i>Gateway</i>	30
Figura 20	Diagrama de ligação do rádio NRF24L01 com a placa do microcontrolador.	30
Figura 21	Diagrama de comunicação para o sistema de leitura.....	31
Figura 22	Diagrama de máquina de estado do nó sensor.....	32
Figura 23	Janela a ser visualizada pelo usuário em um <i>Desktop</i>	33
Figura 24	Janela a ser visualizada pelo usuário em um <i>Iphone</i>	34
Figura 25	Campos com dados da tabela <i>DeviceStatus</i>	34
Figura 26	Campos com dados da tabela <i>Temperature</i>	35
Figura 27	Gráfico de visualização da variação de temperatura em três sensores diferentes.	35
Figura 28	TDR da marca Trase ® modelo 6050X1.....	36
Figura 29	Saída serial dos dados lidos no nó sensor.....	38
Figura 30	Arquivo de leitura do TDR.....	39

Figura 31 Gráficos de linha ajustados pelo modelo de regressão cúbica entre as leituras de umidade dos sensores e o padrão da estufa.	40
---	----

1 INTRODUÇÃO

É grande a preocupação mundial com a produção de alimentos. A necessidade de preservação dos recursos disponíveis exige produzir maior quantidade com qualidade e eficiência, empregando-se adequadamente os recursos naturais, solo, água e energia. A conscientização de todos de que a água de qualidade para consumo e irrigação é um recurso finito e que seu uso deverá ser feito de maneira racional, a fim de evitar desperdícios e contaminação de mananciais, é importante e urgente.

A pouca qualificação de muitos agricultores e a falta de acesso às informações técnicas sobre a quantidade de água e o período correto necessário para atender ao ciclo de crescimento das plantas faz com que muitos agricultores desperdicem água. A formação desse conceito de desperdício tem origem no fato de que a maioria dos produtores, principalmente no nordeste brasileiro, praticavam uma agricultura dependente de chuvas e a produção era exclusivamente para sua subsistência.

Segundo Araújo et al. (2011), essas mesmas pessoas são possuidoras de áreas irrigadas, nas quais desenvolvem culturas que têm um padrão que é o exigido pelos mercados interno e externo. Para manter esse padrão e obter a máxima resposta da cultura, com relação à produtividade e à conservação do meio ambiente, é necessário um mínimo de conhecimento do sistema água-solo-planta-atmosfera e equipamentos que permitam maior eficiência na produção. É fator preponderante garantir a quantidade correta de água no solo para o plantio e sua manutenção durante todo o ciclo de produção.

Uma vez que a irrigação é a principal atividade humana consumidora de água, considerando-se o aumento dos custos com energia e a concorrência pelos recursos hídricos e energéticos entre os setores industrial, urbano e agrícola, torna-se necessário definir quando e quanto irrigar, visando atender às necessidades hídricas das plantas de maneira racional. Assim, o manejo da irrigação deve proporcionar à cultura, condições de disponibilidade hídrica, que permitam externar o seu potencial genético de produtividade; logo, é extremamente importante identificar o momento oportuno de aplicação da água (quando irrigar) e quantificar o quanto aplicar (quanto irrigar), não permitindo condições em que as plantas sofram por estresse ou excesso hídrico.

Segundo Andrade e Brito (2006), o interesse pela irrigação, no Brasil, emerge nas mais variadas condições de clima, solo, cultura e economia. Não existe um sistema ou método de irrigação ideal, capaz de atender satisfatoriamente a todas essas condições e aos interesses envolvidos. Em consequência, deve-se selecionar o sistema de irrigação

mais adequado para certa condição e para atender aos objetivos desejados. O processo de seleção requer análise detalhada das condições apresentadas (cultura, solo e topografia), em função das exigências de cada sistema de irrigação, de forma a permitir a identificação das melhores alternativas.

As formas conhecidas de aplicação da água no solo para a irrigação das culturas são quatro: superfície, aspersão, localizada e subirrigação. Para cada um desses métodos, há dois ou mais sistemas de irrigação, que podem ser empregados. A razão pela qual há muitos tipos de sistemas de irrigação é a grande variação de solo, clima, culturas, disponibilidade de energia e condições socioeconômicas para as quais o sistema de irrigação deve ser adaptado (ANDRADE; BRITO, 2006).

Segundo Frizzone (2016), os sistemas de irrigação podem ser classificados em: irrigação por superfície, em que a distribuição da água se dá por gravidade pela superfície do solo; irrigação por aspersão, em que jatos de água lançados ao ar caem sobre a cultura na forma de chuva; irrigação localizada, em que a água é, em geral, aplicada em apenas uma fração do sistema radicular das plantas, empregando-se emissores pontuais (gotejadores), lineares (tubo poroso ou "tripa") ou superficiais (microaspersores); Subirrigação, o lençol freático é mantido a certa profundidade, capaz de permitir um fluxo de água adequado à zona radicular da cultura. Geralmente, está associado a um sistema de drenagem subsuperficial. Havendo condições satisfatórias, pode-se constituir no método de menor custo.

De acordo com Martin, Gilley e Skaggs (1991), a irrigação por aspersão foi reconhecida como um método de irrigação eficiente, pois atinge valores de eficiência de aplicação que variam entre 55 e 90%. Scaloppi (1986) afirmou que parte da água lançada sob pressão no ar, pelos aspersores, evapora-se antes de atingir a superfície do solo ou plantas. O aumento das perdas está associado à elevação da temperatura, da velocidade do vento, fragmentação do jato, assim como à redução da umidade relativa do ar. O autor ainda cita que os critérios para determinação da quantidade de água a ser aplicada, devem ser baseados na distribuição espacial da água na área a ser irrigada e na relação entre a quantidade de água requerida e a quantidade média coletada. Uma forma eficaz de constatar a quantidade de água disponível para a planta é coletar a umidade do solo na profundidade das raízes, de acordo com a cultura, por meio de sensores apropriados e sistemas que distribuam uniformemente a água necessária.

Segundo Frizzone(2017), há diversos métodos para a determinação do conteúdo de água do solo. Esses métodos vêm evoluindo ao longo do tempo, adequando-se aos avanços da tecnologia. Para se obter informações detalhadas sobre vários desses métodos, pode-se consultar os textos escritos por Carvalho e Oliveira (2012) e Andrade Júnior, Silva e Coelho (2013). De forma geral, os métodos podem ser agrupados em duas categorias: métodos diretos (ou gravimétricos) e métodos indiretos. Entre os métodos diretos, também

denominados gravimétricos, estão o método de secagem em estufa de circulação forçada (padrão), o de secagem em forno micro-ondas e o das pesagens. Os métodos indiretos baseiam-se em medidas da resistência do solo à passagem de uma corrente elétrica, da constante dielétrica do solo, da tensão da água no solo e da moderação de neutros.

Para assegurar o padrão de distribuição de água dos equipamentos, através do coeficiente de uniformidade, é essencial o desenvolvimento de pesquisas para a criação de novos sistemas, novos métodos de avaliação, aperfeiçoamento e controle de qualidade dos equipamentos em uso. A relação entre a água distribuída e a água que efetivamente a planta necessita, em cada ciclo, deverá ser próxima da unidade. Uma grande quantidade de variáveis influenciará essa medida, de acordo com o método utilizado: insolação, efeito do vento, tipo de solo, topografia, clima, sensibilidade da cultura ao molhamento e outras. Logo, a complexidade de análise requer dados coletados em um tempo mínimo que garanta eficiência no sistema para a tomada de decisão.

O evidente e rápido avanço tecnológico, apresentado na concepção dos modernos recursos de *hardware* empregados nos sistemas de processamento digital de informação, tem se tornado um fator preponderante na tomada de decisão, quanto ao emprego desses sistemas para a execução das mais variadas tarefas de nosso cotidiano. A agricultura é uma das áreas de atividade que já vem se beneficiando dessas tecnologias. O controle automatizado, os processos de comunicação via rádio, bem como diversos outros meios têm influenciado na resposta rápida e eficaz para melhorar a qualidade da produção, diminuir o custo dos alimentos e, também, diminuir os prejuízos à natureza.

Na área de irrigação têm surgido diversas propostas para aquisição de dados oriundos de sensores espalhados no campo e em laboratório, simulando as suas condições. Normalmente os dados são coletados por meio de fios e placas para conversão de sinais analógicos em digitais que são transmitidos a uma estação que os processa e os registra em um sistema apropriado. Normalmente esses sistemas são caros e utilizam *software* e *hardware* proprietários, fabricados pelas grandes empresas multinacionais. Um grande desafio é produzir para a área de irrigação equipamentos e *softwares* para aquisição de dados a baixo custo e que utilizem recursos tecnológicos de última geração.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Desenvolver *hardware* e *software* para um sistema de coleta de dados automatizado, nas variáveis umidade e temperatura do solo, utilizando tecnologias livres para aplicação em sistemas de irrigação.

2.2 Específicos

Projetar *hardware* e *software* embarcado, de baixo custo, com tecnologias livres para um sistema de aquisição de dados com sensores de umidade e temperatura do solo.

Utilizar rede *Mesh* sem fio que garanta que sensores remotos possam se comunicar com unidade *Host*, possibilitando o seu monitoramento a distâncias maiores que o alcance dos rádios até o *Host*.

Avaliar e utilizar sensores de umidade e temperatura de baixo custo em alternativa ao uso de equipamentos *Time Domain Reflectometry* (TDR).

Disponibilizar *software* para que, em tempo real, dados dos ensaios de medida de umidade e temperatura do solo, em laboratório e/ou no campo, possam ser acessados através de navegadores em computadores e em dispositivos móveis, através da rede mundial de computadores (*Internet*).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O solo e curva característica de retenção de água

A determinação da quantidade de água ou umidade dos solos é fundamental para os principais estudos de processos físicos, químicos e biológicos que neles ocorrem. Principalmente os que afetam direta ou indiretamente o aumento da produtividade agrícola.

As técnicas de medida da umidade do solo são classificadas como diretas ou indiretas. Os métodos diretos envolvem alguma forma de remoção ou separação da água da matriz do solo com a medida direta da água removida, o que pode ser obtido por aquecimento ou pela utilização de solvente ou reação química. Os métodos indiretos determinam alguma propriedade física ou química relacionada à umidade do solo, como constante dielétrica (ou permissividade dielétrica), condutividade elétrica, capacidade térmica, conteúdo de hidrogênio ou susceptibilidade magnética (TOPP; FERRÉ, 2002).

A ideia de quantificar a capacidade de retenção de água no solo é do início do século XX (ALWAY; MCDOLE, 1917 *apud* REICHARDT, 1988). As principais contribuições nesse sentido, são as de Veihmeyer e Hendrickson que, a partir de estudos de 1931 e 1949, introduziram definitivamente os conceitos de capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Como resultado dessa contribuição surge a Curva Característica do Solo que é o nome dado ao resultado gráfico da variação do conteúdo de água do solo em função do potencial mátrico.

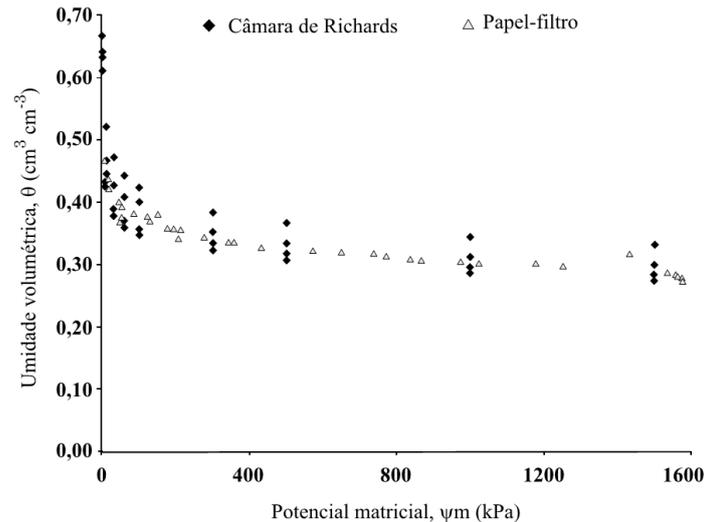


Figura 1 Valores de umidade volumétrica e potencial matricial obtidos com a câmara de pressão de Richards e com o papel-filtro.

Fonte: Lucas et al.(2011).

Lucas et al. (2011) apresentam essa curva em experimento realizado para obtenção da umidade volumétrica e potencial matricial de um Latossolo distroférico vermelho típico, utilizando o método do papel-filtro (Figura 1).

Com o desenvolvimento da matemática computacional, a curva característica é mais comumente associada a uma equação e, para isso, o modelo mais utilizado é aquele proposto por van Genuchten (1980), que permite o ajuste de uma equação para a faixa de tensão que vai de 0 a 1500 kPa.

Queiroz (2007) apresenta uma relação entre a estimativa da umidade no solo e o potencial mátrico, além de trazer definições para faixas de umidade do solo conhecidas e estudadas na área de irrigação.

Uma grande vantagem da curva característica de um solo é que, uma vez conhecida, pode-se, a partir dela, estimar a umidade (θ) conhecendo o potencial mátrico (Ψ) ou vice-versa. Essa peculiaridade permite utilizar o tensiômetro para o manejo da irrigação, pois, ele é um instrumento para medida do potencial mátrico e uma vez conhecido esse potencial, pode-se através da curva característica, conhecer a umidade do solo.

No intervalo de 0 a 1500 kPa está contida toda a água de interesse para a agricultura, em especial para o manejo da irrigação. Nesse intervalo, destacam-se cinco pontos de umidade importantes:

a) Umidade de saturação (θ_s) – valor associado à tensão de 0 kPa, é o volume máximo de água possível de ser armazenado no solo, ou seja, não há espaço para o ar no solo, os poros são preenchidos com água.

b) Umidade atual (θ_a) – é a umidade do solo no momento da medição. Esse valor é utilizado na irrigação para verificar a variação do conteúdo de água do solo e quando θ_a foi igual a θ_{cr} (umidade crítica) a irrigação deve ser iniciada.

c) Umidade crítica (θ_{cr}) - representa o esgotamento máximo da água no solo para que não haja danos à cultura. É com base nesse valor que se define o momento da irrigação e a quantidade de água a ser aplicada.

d) Umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) – descreve a condição de movimento da água livre no solo sob a ação da gravidade, com sentido vertical para baixo e intensidade muito lenta ou nula, o que equivale a dizer, segundo Carvalho, Sampaio e Silva (1996), que não há variação da umidade (θ) com o tempo (T), ou seja, $\partial\theta/\partial T = 0$. É aceito que os poros do solo são divididos em macroporos, mesoporos e microporos e que são os microporos os responsáveis pela retenção (armazenamento) da água no solo. É aceito também que a tensão de 60 cm.c.a. (aproximadamente 6 kPa) separa os mesoporos dos microporos, sendo a umidade volumétrica de um solo, a esta tensão, associada ao volume de microporos. Portanto, a tensão de 6 kPa pode ser um bom indicativo da condição de capacidade de campo de qualquer solo.

e) Umidade no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) – está associada à tensão de 1500 kPa e representa o teor de água do solo abaixo do qual a planta sofre uma murcha, não recuperando a turgescência das folhas, quando colocada em ambiente de atmosfera saturada de umidade.

Outra metodologia importante para a determinação da quantidade de água no solo é a obtenção desse valor através da relação entre a medição das massas e o volume dos componentes do solo: sólidos, ar e água.

Sabe-se que a massa total de uma amostra de solo m é dada pela soma das massas dos seus componentes: massa dos sólidos m_s , massa da água m_a e massa do ar m_{ar} . Como a densidade do ar é muito menor que a dos demais componentes do solo (aproximadamente 1000 vezes menor que a da água), a sua massa é normalmente desprezada.

A massa m de uma amostra é obtida em laboratório através da sua pesagem. Para obtenção da massa dos sólidos m_s retira-se a água da amostra, colocando-a, por convenção, numa estufa entre 105 °C e 110 °C, até a sua massa não diminuir mais (na prática: 24 a 48 h). A diferença entre m e m_s é a massa da água m_a .

A umidade gravimétrica U de uma amostra de solo é a relação entre a massa da água e a dos sólidos nela contidos, logo:

$$U = \frac{m_a}{m_s} \quad (1)$$

ou, ainda, que:

$$U = \frac{m}{m_s} - 1 \quad (2)$$

Sabe-se também que a umidade volumétrica do solo θ é a relação entre o volume de água numa amostra do solo V_a , e o volume total da amostra V :

$$\theta = \frac{V_a}{V} \quad (3)$$

Deduz-se, ainda, que a relação entre a umidade volumétrica θ e a gravimétrica U é dada pela equação:

$$\theta = U \frac{\rho}{\rho_a} \quad (4)$$

em que ρ_a é a densidade da água: 1000 kg.m^{-3} e

$$\rho = \frac{m_s}{V} \quad (5)$$

3.2 O tensiômetro

O tensiômetro é estudado desde a introdução do conceito de potencial matricial do solo, apresentado por Buckingham em 1907. De acordo com trabalhos de diversos autores, constata-se que, embora modificações tenham sido feitas no sentido de aumentar a confiabilidade de suas respostas, simplificar as observações e facilitar a instalação e o manejo, as características externas do tensiômetro pouco mudaram ao longo do tempo.

O tensiômetro é construído a partir de um tubo, geralmente de PVC, uma cápsula de cerâmica porosa, rolha de borracha e um elemento sensível, indicador da tensão existente dentro dele. Seu princípio de funcionamento é bastante simples: o tubo cheio de água e hermeticamente fechado é ligado, na ponta, a um manômetro. Quando a cápsula porosa estiver em contato com o solo não-saturado, succiona a água provocando uma queda de pressão ou tensão no sistema. Essa tensão pode ser medida pelo vacuômetro², obtendo-se, dessa forma, o potencial matricial da água no solo e, indiretamente, o teor de água.

Esse instrumento é bastante utilizado para a determinação do momento oportuno de irrigação, por ser um aparelho simples e de fácil utilização, apresenta baixo custo, não requer calibração ou qualquer fonte de potência e fornece leituras instantâneas, desde que devidamente instalados e manejados (FARIA; COSTA, 1987; ASSIS JUNIOR; REICHARDT, 1997). Atualmente, tanto o mercado nacional quanto o internacional, fornecem diferentes modelos e marcas de tensiômetros.

² Instrumento próprio para medir pressões menores que a pressão atmosférica, pressões negativas.

Existem muitos modelos de manômetros empregados na fabricação de tensiômetros. Thiel et al. (1963) construíram um transdutor de pressão para medir pressões hidrostáticas em meio poroso.

Marthaler et al. (1983) construíram e utilizaram um sistema tensiômetro/transdutor, o qual consiste de um transdutor de pressão conectado ao tensiômetro através de uma agulha de seringa, tendo um registrador digital. A agulha, quando introduzida através de uma tampa de borracha, presente na extremidade superior do tensiômetro, conecta uma pequena câmara deixada abaixo da tampa de borracha ao elemento sensor do transdutor. A pressão no interior da câmara equilibra-se com a pressão da água no interior do tensiômetro, a qual é mostrada em um registrador digital. Para os autores, o uso desse tipo de transdutor permite uma manutenção mais rápida e mais fácil do instrumento do que quando se usa manômetro de mercúrio, além de diminuir a influência da temperatura e a chance de danos mecânicos. O aparelho desenvolvido por Marthaler et al. (1983) é conhecido, no Brasil, por tensímetro digital de punção ou simplesmente tensímetro.

Villa Nova et al. (1992) compararam o tensiômetro de câmara de ar com manômetro de mercúrio em dois tipos de solos, no laboratório, e observaram equivalência entre os resultados dos dois tipos de tensiômetros. Teixeira e Coelho (2005) desenvolveram e calibraram um tensiômetro eletrônico de leitura automática, utilizando transdutores de pressão. Diferentemente do aparelho de Marthaler et al. (1983), que consiste de uma unidade de leitura portátil acoplável ao tensiômetro, Teixeira e Coelho (2005) propuseram a utilização de um sistema de medição da tensão para cada tensiômetro, o que permite a aquisição de dados oriundos de vários pontos ao mesmo tempo e com a vantagem de se poder fazê-lo via acesso remoto.

Por se tratar de um equipamento composto de uma câmara hermeticamente fechada que contém água e ar, as medidas do potencial são influenciadas pela temperatura ao longo do dia. Muitos são os trabalhos que mostram que há considerável variação da tensão em função da temperatura, entre eles: Nyhan e Drennon (1990), Hubbell e Sisson (1998).

Para tensiômetros de leitura manual, recomenda-se que as leituras sejam feitas, preferencialmente, pela manhã ou sempre no mesmo horário. Mas, com o advento da automação da aquisição de dados de tensiômetros no campo em tempo real, pode se fazer, também, um monitoramento da temperatura (HUBBELL; SISSON, 1998; TEIXEIRA; COELHO, 2005).

Outra limitação atribuída ao tensiômetro é o limite de leitura, principalmente para solos argilosos. Bernardo (1995) recomenda valores de tensão para a faixa de trabalho do tensiômetro de 0 a 75 kPa e cita que, nesse patamar, o tensiômetro cobre 70% da água disponível em solos arenosos e 40% em solos argilosos. Esses valores correspondem à faixa ótima para desenvolvimento da maioria das culturas, cobrindo de 25% a 75% da água disponível no solo, dependendo da sua textura e estrutura.

Admite-se que o tensiômetro funcione cheio de água, sem a presença de bolhas de ar de câmara gasosa no alto do tubo, mas, segundo Calbo e Silva (2003), as obstruções nos capilares da cerâmica ou a entrada de ar dentro do tensiômetro através da rolha têm limitado a sua utilização às tensões entre 0 e 100 kPa.

Outro problema também observado é a formação de bolhas de ar devido à evaporação da água no interior do tensiômetro com a diminuição da pressão interna. Reichardt e Timm (2004) recomendam a utilização de água desaerada para o enchimento dos tensiômetros e a fluxagem periódica dos mesmos.

A utilização de água desaerada no campo é, praticamente, impossível. Na prática pode-se utilizar qualquer água, desde que esteja limpa e livre de partículas em suspensão. Uma boa recomendação é a utilização de água potável. Camargo, Crohman e Camargo (1982), quando trabalharam com o tensiômetro de leitura direta, verificaram que o emprego de água fervida pode ser considerado desnecessário. Segundo os autores, a água comum de torneira pode ser usada sem problemas.

Outro cuidado a ser tomado, é com relação à área de contato da cápsula com o solo. O tamanho da cápsula tem influência direta. O aumento no tamanho da cápsula reduz a variabilidade nos valores de potencial, por isso, deve-se usar cápsulas maiores, segundo Hendrickx; Nieber e Siccani (1994). A que apresentou a menor variabilidade foi a de 88,3 cm² de superfície.

3.2.1 Tensiometria no manejo da irrigação

O uso da água, geralmente, é feito por critérios baseados em medidas no solo, na planta e na atmosfera. As medidas no solo se fundamentam na determinação direta ou indireta do teor de água presente no substrato, enquanto os baseados em medidas na planta são estabelecidos no monitoramento do potencial hídrico, na resistência estomática, na temperatura da folha por meio de termômetro infravermelho e outros. Os critérios fundados em medidas climáticas variam desde simples medidas de evaporação de água em tanque, como o Classe "A", até complexas equações para estimativa da evapotranspiração.

Uma das críticas ao uso de tensiômetros, elencada por Marouelli, Lopes e Silva (2005), é que o uso da tensiometria, para fins de manejo de água, envolve custos com a aquisição de sensores de umidade e uso de mão-de-obra para a sua leitura, além da adoção de frequência de rega variável, o que desagrada à maioria dos agricultores.

Miranda, Gonçalves e Carvalho (2001) descrevem o tensiômetro como instrumento para a determinação da umidade do solo e afirmam que esse equipamento, associado à curva de retenção, é fundamental no manejo de irrigação. Também Bernardo, Soares e Mantovani (2006) mencionam o tensiômetro como instrumento para a medida da umidade

do solo e relatam que ele possui precisão suficiente para ser utilizado para automação da irrigação.

Figueredo et al. (1998) adotaram tensiômetros para o manejo da irrigação, instalados nas profundidades de 0,10, 0,20, 0,30 e 0,40 m. O momento da irrigação foi determinado pelo primeiro tensiômetro, localizado a 0,10 m, e a quantidade de água aplicada foi determinada pela indicação de tensão de todos os tensiômetros até a profundidade de 0,40 m.

3.3 Semeadura da lavoura em condições favoráveis de umidade e temperatura do solo

Segundo Amaral e Santos (1983), a temperatura, a água e o oxigênio são os três requisitos essenciais para que ocorra a germinação em sementes. As temperaturas mais favoráveis para a germinação, em condições de laboratório, são conhecidas para a maioria das espécies de importância agrícola.

Para Stansel (1975), a temperatura é o fator de maior influência na germinação de sementes e desenvolvimento de plantas de arroz. Nesse sentido, Pedroso (1980) relatou que a faixa ideal para que uma semente de arroz germine em menor período de tempo encontra-se entre 30 a 35°C.

Raney e Mihara (1967) observaram que temperaturas inferiores a 20 °C retardam a germinação e as superiores a 43 °C podem ser letais a plantas jovens. Da mesma forma, Owen (1971) relatou que a germinação de sementes de arroz pode ser lenta sob baixas temperaturas, no entanto, altas temperaturas também são prejudiciais.

A absorção de água, a emergência e o desenvolvimento das estruturas embrionárias das sementes são interdependentes e reagem no mesmo sentido ao déficit hídrico. Para esses casos, a redução no potencial hídrico promove dificuldades na evolução dos processos de germinação (SILVA; MARCOS FILHO, 1990).

Amaral e Santos (1983) concluem que: as plântulas de arroz emergiram em menor número e mais lentamente sob condições de escassez de umidade do solo (8% de U_g); quando a umidade do solo foi mantida em torno da capacidade de campo (15,5% de U_g), ou superior, aumentaram a velocidade de emergência, a população inicial e o peso da matéria seca, por plântula, aos vinte e oito dias após a semeadura; a emergência de plântulas ocorreu mais rapidamente quando o solo foi mantido às temperaturas de 37 °C e 30 °C; a 16 °C a emergência foi reduzida e retardada.

A observação dos valores de umidade e a temperatura do solo por esses autores indicam uma contribuição importante com a tomada de decisão do produtor ao planejar o início do ciclo de uma nova cultura.

O tensiômetro, então, enquanto equipamento de monitoramento manual, apesar de se constatar sua eficiência, não seria um equipamento de fácil manipulação em lavouras de grande porte, pois, depende de muita manutenção e a coleta de dados de inúmeros equipamentos utilizaria grandes recursos de mão de obra e tempo na lavoura. Sendo assim, a automação em grande escala pressupõe a utilização de outros equipamentos disponíveis, como os microcontroladores e sensores eletrônicos.

3.4 Automação por microcontroladores

Automação de processos industriais, agrícolas ou comerciais podem empregar recursos de circuitos digitais discretos ou então microprocessados: os circuitos digitais discretos são construídos basicamente com a teoria aplicada da álgebra de Boole, através das portas lógicas, ou seja, um projeto de automação pode ser escrito em um conjunto sequencial de eventos que geram sempre as mesmas saídas, a partir da excitação das mesmas entradas; os circuitos digitais microprocessados têm uma característica diferente, internamente são projetados com blocos de circuitos discretos que executam atividades genéricas cuja funcionalidade é encontrada em um conjunto de código binário de entrada, armazenado internamente em um chip de memória, chamado de programa. O programa pode ser trocado, trazendo a grande vantagem de alterar completamente a funcionalidade do circuito sem alterá-lo.

Atualmente, os circuitos digitais microprocessados são encontrados em todos os equipamentos à nossa volta, são tecnologias que estão no dia a dia do homem contemporâneo. Celulares possuem até cinco desses componentes.

3.5 Microcontrolador

É importante ressaltar as diferenças e vantagens entre um microcontrolador e um microprocessador. Um microcontrolador possui um microprocessador internamente. O microprocessador é um processador miniaturizado em numa única pastilha de silício. É a unidade central de processamento de um computador.

Para que um microprocessador possa ser usado, outros componentes devem ser acoplados a ele, tais como memórias e componentes para receber e enviar dados. Essa é a grande diferença para o microcontrolador. O microcontrolador foi projetado para conter memória interna, A/D's (conversor analógico/digital), portas de entrada e saída e oscilador, dentre outros em um único chip, necessitando de poucos componentes externos em suas aplicações, uma vez que a maioria dos periféricos necessários já estão contidos nele.

Os microcontroladores apresentam algumas vantagens como: por serem extremamente pequenos, reduzem drasticamente o número de componentes eletrônicos, reduzindo muito o tamanho da placa eletrônica; por serem circuitos integrados, muitas vezes, os microcontroladores podem substituir parte ou até mesmo circuitos inteiros que, em geral, demandam tempo, espaço físico e elevado custo quando comparados aos microcontroladores; são flexíveis, pois permitem uma alteração do código de programa (memória tipo *Flash*), sem necessitar de mudança física quanto à placa do circuito. Os microcontroladores podem ser programados em linguagem, pascal, C, *basic* e os programas são gravados na memória desses dispositivos. Para tal procedimento, utiliza-se um *hardware* especial acoplado a um microcomputador para a gravação dos programas. Os microcontroladores são utilizados em praticamente todos os dispositivos eletrônicos digitais como: teclado de computador, televisão, celular, relógio de pulso, rádio relógio, máquina de lavar, forno de micro-ondas, entre outros (NASCIMENTO, 2008).

3.6 Sensores

São dispositivos eletroeletrônicos que têm a propriedade de transformar em sinal elétrico uma grandeza física ou química que está relacionada a uma ou mais propriedades do material de que é feito o sensor.

Existem diversos tipos de sensores, destacando-se entre eles os fotodiodos (conversão de luz em sinal elétrico), os microfones (conversão de ondas sonoras em sinais elétricos) e os termistores (conversão de variação de temperatura em sinal elétrico). No mercado, encontramos disponíveis diversos sensores entre eles o DS18B20 (sensor de temperatura) o MPX5500DP (transdutor de pressão), o SHT2x e o DHTx que são séries de sensores digitais capacitivos para a medição de umidade e temperatura.

Segundo a MAXIM INTEGRATED (2016), o sensor de temperatura digital DS18B20 é capaz de medir em graus *Celsius*, com resolução de 9 a 12 bits (configurável) e possui uma função de alarme programável em memória não volátil para valores abaixo ou acima das temperaturas desejadas. A comunicação é feita por *1-Wire*, ou seja, precisa apenas de 1 pino do microcontrolador para transferir os dados. Pode operar entre - 55 °C até + 125 °C e com precisão de ± 0.5 °C se estiver operando dentro da faixa de - °C até + 85 °C. Cada DS18B20 possui um número serial único de 64-bit, o que permite que vários DS18B20 funcionem no mesmo barramento *1-Wire*, possibilitando a conexão de vários sensores a um microcontrolador. Uma característica adicional é que o DS18B20 pode derivar energia diretamente da linha de dados ("poder parasita"), eliminando a necessidade de uma fonte de alimentação externa. A Figura 2 apresenta o diagrama em blocos dos componentes internos desse sensor.

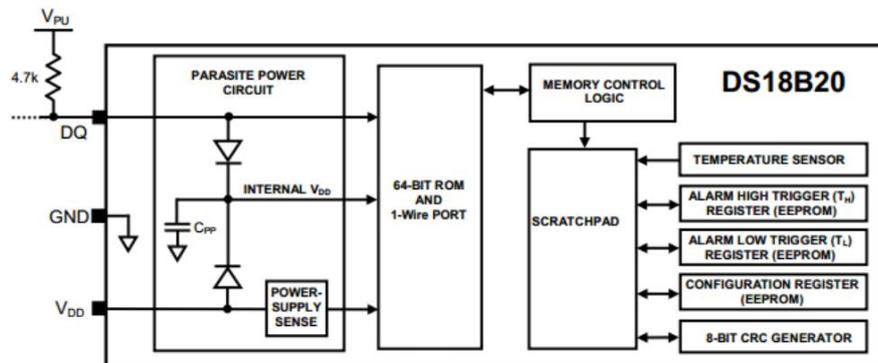


Figura 2 Diagrama em blocos do circuito integrado DS18B20 – sensor de temperatura.

Fonte: Datasheet Maxim Integrated (2016).

Segundo a Motorola (2017), o sensor MPX5500DP é um transdutor piezoresistivo da série MPX5500, é o estado da arte em silício monolítico de um sensor de pressão. Foi concebido para uma ampla gama de aplicações, mas particularmente as que utilizam um microcontrolador ou microprocessador com entradas A/D. Está patenteado, um único elemento de transdutor combina técnicas avançadas de microusinagem, de película fina metalizada e processamento bipolar para fornecer um elevado nível de precisão no sinal de saída analógico que é proporcional à pressão aplicada. Na Figura 3, é apresentado o diagrama de blocos e, na Figura 4, a fotografia do componente fabricado.

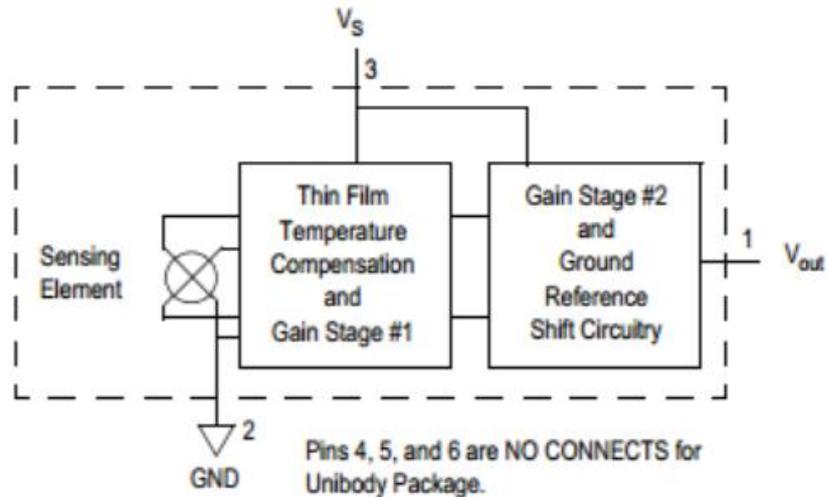


Figura 3 Diagrama de funcionamento do sensor de pressão da série MPX5500.

Fonte: Datasheet Motorola (2017).

No diagrama da Figura 3 mostram-se três blocos: o elemento sensor (*sensing element*), que é um cristal piezoelétrico que, quando submetido a uma pressão, gera um sinal analógico nos seus terminais; uma película fina metalizada para compensação da temperatura e o primeiro estágio de ganho para o sinal analógico; o segundo estágio de ganho e a transformação do sinal de balanceado para referência ao terra do circuito. O *datasheet* do fabricante apresenta que este circuito integrado é um medidor diferencial de pressão e que trabalha dentro da faixa de temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. A diferença de pressão máxima que se permite medir é de 2000 kPa.



Figura 4 Sensor de pressão MPX5500DP.

Fonte: Datasheet Motorola (2017).

Dentre outros sensores importantes, encontra-se também o SHT20, um sensor de umidade e temperatura que é embutido em um pacote de dupla de proteção sem chumbo, é soldável por refluxo e possui a dimensão de 3×3 mm de altura e 1,1 mm de altura. Fornece sinais calibrados e linearizados no formato I2C. É do tipo capacitivo e possui um sensor de

temperatura *band-gap* e um circuito integrado analógico e digital dedicado com tecnologia CMOSens®. Gera um desempenho do sensor inigualável, em termos de precisão e estabilidade, bem como consumo de energia mínimo. Contém ainda um amplificador de sinal, uma memória *One time programmable* (OTP) e uma unidade de processamento digital.

Pode ser alimentado por uma tensão de 2,1 a 3,6 V e consome 3.2μW. Precisão de +/- 3% na leitura de umidade (na faixa de 20 a 80%) e +/- 0,3% na leitura (na faixa de 5 °C a 60 °C) de temperatura.

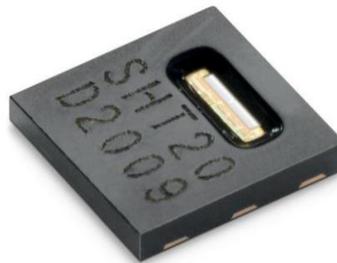


Figura 5 Sensor de umidade e temperatura.

Fonte: Sensirion (2017).

3.7 Sensor resistivo

O sensor resistivo consiste de dois eletrodos alimentados por uma tensão contínua no tempo e que, em contato com a umidade do solo, faz com que a resistência do meio entre os dois eletrodos se altere proporcionalmente. Na Figura 6 é apresentado um dos tipos disponíveis no mercado (FASTTECH, 2016).

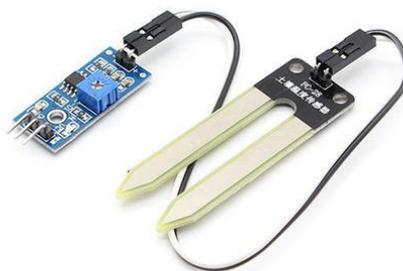


Figura 6 Sensor de umidade resistivo.

Fonte: Fasttech (2016).

3.8 Rádio de comunicação

A transmissão de dados através de ondas de rádio frequência (RF) consiste na utilização de uma onda eletromagnética de alta frequência, chamada portadora, a qual é produzida por uma fonte denominada transmissor (Tx) e capturada por um receptor (Rx), sendo esses dois elementos separados por uma certa distância. O uso de uma onda de alta frequência é necessário para que se possa estabelecer a comunicação empregando-se menor potência elétrica e utilizando-se antenas de dimensões reduzidas.

Sobre a portadora trafega um outro sinal, que são os dados. Denomina-se modulação ao processo de adição dos dados de baixa frequência (modulante) em uma onda de radiofrequência. A modulação consiste na modificação de alguma característica da portadora de forma proporcional ao sinal modulante. A informação é recuperada no Rx pelo processo conhecido como demodulação ou detecção. Quando a modificação ocorre na amplitude da portadora, tem-se a modulação em amplitude ou *amplitude modulation* (AM); quando ocorre modificação na frequência da portadora, tem-se *frequency modulation* (FM); quando se modifica a fase, tem-se *phase modulation* (PM).

Na transmissão de dados digitais, a onda modulante varia aos saltos, entre valores discretos. A modulação de uma onda de radiofrequência por um sinal digital é chamada chaveamento (*keying*). O chaveamento em amplitude é definido como *amplitude shift keying* (ASK), em frequência como *frequency shift keying* (FSK) e em fase como *phase shift keying* (PSK). Na Figura 7, apresenta-se um esquema dos três tipos de modulação.

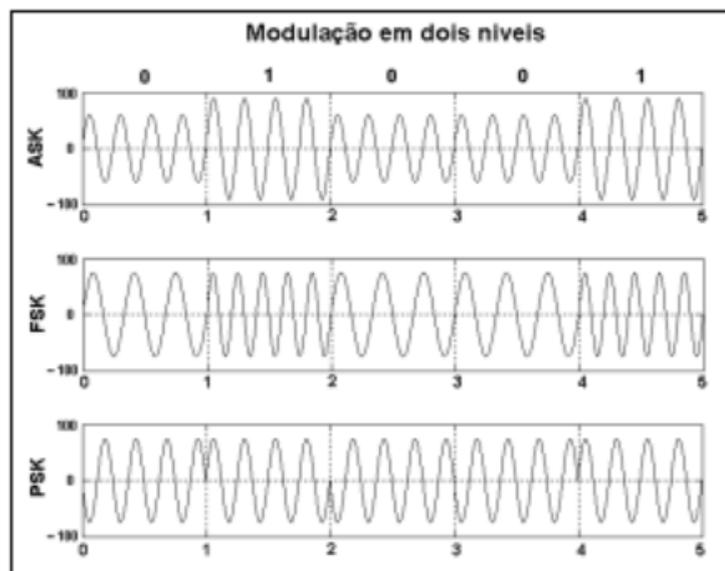


Figura 7 Modulação com sinal modulante binário tipo ASK, FSK e PSK.

Fonte: Vasconcelos (2017).

3.9 Rede de sensores sem fio (RSSF)

Segundo Bonifácio (2010), a evolução das redes de sensores sem fio está aliada ao grande avanço ocorrido nas áreas de processadores de baixo consumo, dispositivos de sensoriamento, sistemas embarcados e comunicação sem fio.

As perspectivas de sua aplicação, a curto prazo, encontram-se em diversos cenários, desde o monitoramento de pacientes em clínicas e hospitais, o monitoramento ambiental, a automação industrial e de serviços urbanos.

Estas redes são compostas por um grande número de dispositivos autônomos e compactos, chamados nós sensores. Os nós sensores são dispositivos eletrônicos de baixo custo, baixa potência e com múltiplas funcionalidades. Têm a tarefa de realizar a coleta de dados, conforme programado, armazenar temporariamente os dados e realizar a comunicação, através de mensagens, entre os elementos da rede utilizando um canal de RF (radiofrequência).

Conforme apresentado na Figura 10, a mensagem é encaminhada através da rede sem fio por algum dos caminhos possíveis até chegar a um *Gateway*, que irá encaminhar essa mensagem, através de uma conexão cabeada, tipicamente *Ethernet*, até uma central de controle (*Host*), onde será possível armazenar, processar, analisar e apresentar os dados coletados.

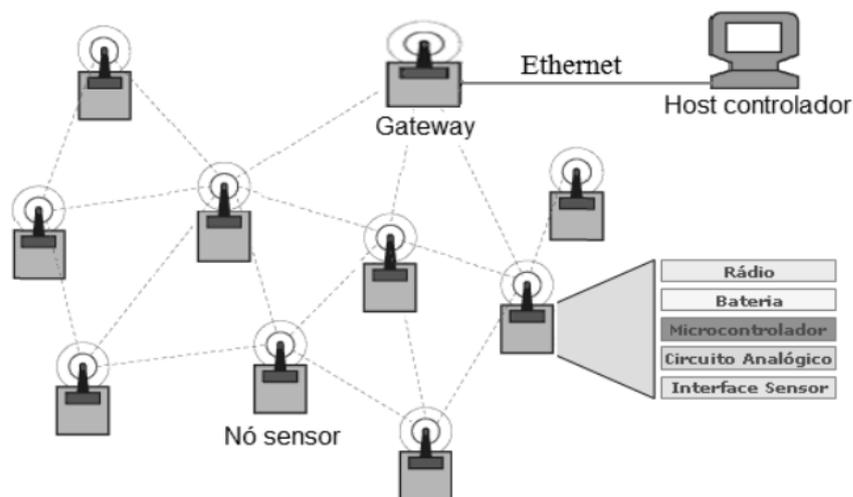


Figura 10 Diagrama dos elementos que compõe a rede de sensores sem fio.

Fonte: Bonifácio (2010).

Ainda, segundo Bonifácio (2010), em razão das baixas taxas de transmissão, do curto alcance e da ausência de infraestrutura pré-existente, as redes de sensores sem fio ficaram conhecidas como redes pessoais sem fio de baixas taxas (*Low-rate wireless personal area networks – LR-WPANs*).

A forma de comunicação entre os nós nas redes é baseada em um esquema de retransmissão *Multi-hop* (múltiplos saltos), apresentada na Figura 11. A maneira como os nós se comunicam com os outros fora de seu alcance de transmissão é por meio da formação de uma cadeia de encaminhamento, na qual os nós fonte e destino estão nas extremidades. Os nós vizinhos têm a função de receber e encaminhar mensagens ao próximo nó até que a mensagem atinja o destino.

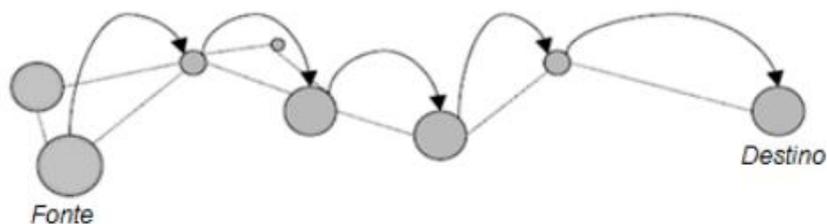


Figura 11 Esquema de transmissão e retransmissão *Multi-hop* entre os nós sensores.

Fonte: Bonifácio (2010).

As redes de sensores sem fio se caracterizam por não se basearem em estrutura ou topologia fixa pré-existente, isso implica que a rede deve se auto-organizar para formar uma entidade coordenada de comunicação. Quando os nós se movem, são desligados ou ligados, entram ou saem da rede. O protocolo de comunicação deve ser capaz de se ajustar a tais mudanças na topologia sem a intervenção humana. Ademais, grande parcela dos nós pode estar localizada demasiadamente longe do ponto de coleta de dados ou do ponto de acesso de dados para se comunicarem diretamente com estes.

Nós sensores imediatamente próximos ao emissor são utilizados, neste caso, para retransmitir as mensagens adiante, utilizando a comunicação *Multi-hop*, segundo protocolos de roteamento próprios. Em termos de *hardware*, um nó sensor é composto de quatro subsistemas: i) um subsistema computacional que consiste de um microprocessador ou microcontrolador; ii) um subsistema de comunicação composto de um rádio de alcance curto para comunicação sem fio; iii) um subsistema de sensoriamento que liga o nó ao mundo físico e que consiste de um grupo de transdutores e atuadores; e iv) um subsistema fonte de energia que alimenta o resto do nó, o qual é composto de baterias e um conversor CC-CC [22]. O objetivo desse conversor é prover uma tensão constante para os subsistemas do nó sensor.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local da pesquisa

O desenvolvimento experimental foi realizado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná-Unioeste, *campus* de Cascavel, localizada na Latitude de 24°59' Sul, Longitude 53°23' Oeste e altitude de, aproximadamente, 750 metros em relação ao nível do mar. Foi realizado em duas etapas: a primeira etapa foi o desenvolvimento e teste de *hardware* e *software* para a aquisição de dados. Essa etapa foi desenvolvida no Laboratório de Eletrônica Digital (LED) do Curso de Ciência da Computação; a segunda etapa foi desenvolvida com a coleta de solo no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola (NEEA), próximo à rodovia BR 467 – Km 101, Cascavel - PR, com localização geográfica 24°53'59.85" latitude sul e 53°32'1.98" longitude oeste de Greenwich e altitude 750 m (Figura 12). O solo está classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico.

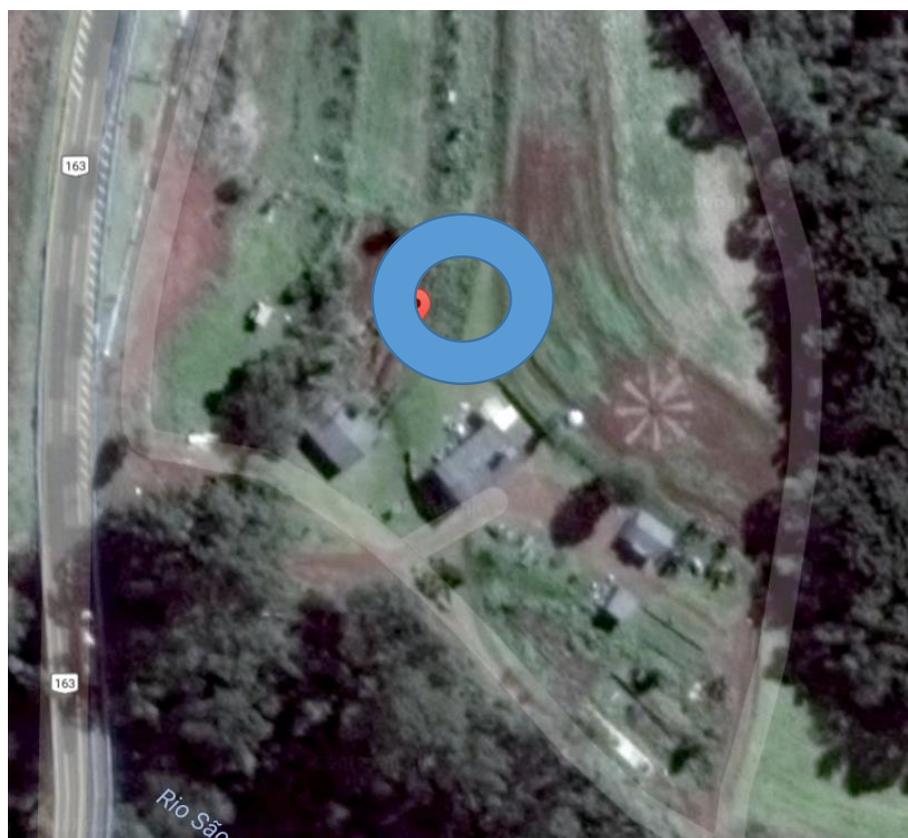


Figura 12 Localização da retirada das amostras de solo.

Fonte: Google Earth (2014).

O Laboratório de Eletrônica Digital (LED) utilizado nesta pesquisa está situado no Bloco F do prédio destinado ao desenvolvimento do curso de Ciência da Computação. Na Figura 13, apresenta-se uma visão aérea da universidade e a localização do laboratório.



Figura 13 Laboratório de Eletrônica Digital – Unioeste, *campus* de Cascavel.

Fonte: Google Earth (2014).

Nesse laboratório foram desenvolvidos o *hardware*, o *software* e foi executada a coleta de dados dos instrumentos.

4.2 Etapas do experimento

O experimento da pesquisa foi montado em várias etapas sequenciais e algumas delas foram executadas em paralelo.

Foi coletado solo seco no campo experimental e tratado como citado a seguir no item 4.3.

Para programação das placas, foi utilizado o Arduino, ambiente disponibilizado pela própria fabricante das placas, e a versão 1.6.7 para o sistema operacional *Windows* 10.

Foram desenvolvidas as rotinas para leitura dos sensores de umidade e temperatura utilizando bibliotecas livres, de terceiros, que acompanham o pacote do ambiente do *software*. Além das bibliotecas MySensor, DHT, SHT2x e Wire.

Foram escolhidos no mercado rádios que permitiram a comunicação entre os módulos Arduino e os testes para garantir a comunicação entre os nós e o *Gateway* da rede *mesh*.

Foi, também, executada:

- a instalação e a configuração do Arduino Mega com a placa Shield W5100 Ethernet e as placas de rádios digitais (*Gateway*).
- a instalação e a configuração das rotinas para comunicação dos rádios no Arduino Nano (nó).
- a instalação e a configuração das rotinas para leitura dos circuitos Real Time Clock (RTC) DS1302.
- a instalação e a configuração do *software* em servidor para receber dados dos nós sensores através do *Gateway*.
- a montagem dos baldes com os três sensores e a sonda do TDR e a leitura dos dados obtidos no experimento, através de navegador acessando o servidor.

4.3 O solo utilizado

O solo utilizado é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico, com relevo levemente ondulado e textura muito argilosa (EMBRAPA, 2006).

Para a pesquisa, foram retirados no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola (Figura 14) 60 litros de solo. Depois de limpar a superfície que apresentava muitas folhas e detritos orgânicos, o solo foi raspado e a camada de 5 cm foi descartada. Escavou-se nesta faixa uma camada com profundidade de 20 cm, logo depois revolveu-se o solo que foi armazenado em três sacos plásticos com capacidade para 20 litros e, em seguida, foram lacrados.



Figura 14 Solo no local de coleta da área do Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola.

Antes da coleta do solo, com a sonda de 20 cm o TDR media a umidade volumétrica de 29%, a temperatura ambiental era 27 °C e a umidade relativa do ar a 75%.

Antes do uso, o solo foi destorroado, peneirado em uma peneira de 2,0 mm de malha e deixado à sombra para que ocorresse a secagem ao ar.

Pacheco (2012) apresenta em seu trabalho os atributos físico-químicos encontrados no solo do local da pesquisa (Tabela 1).

Tabela 1 Características físico-químicas do solo da área experimental no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola, Cascavel – PR, 2011

Nutrientes ¹		Parâmetros	
P disponível ²	7,83 mg dm ⁻³	Teor de água ³	0,357 g g ⁻¹
C	25,59 g dm ⁻³	Densidade ³	1,122 g cm ⁻³
Ca	6,06 cmolc dm ⁻³	Areia ⁴	120 g kg ⁻¹
Mg	3,74 cmolc dm ⁻³	Silte ⁴	220 g kg ⁻¹
Al	0,09 cmolc dm ⁻³	Argila ⁴	660 g kg ⁻¹
K	0,33 cmolc dm ⁻³	pH (CaCl ₂)	5,53
Cu	7,60 mg dm ⁻³	CTC	14,95 cmolc dm ⁻³
Zn	2,27 mg dm ⁻³	Soma de bases	10,13
Fe	23,67 mg dm ⁻³		
Mn	155,67 mg dm ⁻³		
H+Al	4,89 cmolc dm ⁻³		

Notas: 1) Determinado segundo EMBRAPA (1997); 2) Mehlich-1; 3) Método do anel volumétrico (KIEHL, 1979); 4) Método do densímetro (BOUYOUCOS, 1927).

Fonte: Pacheco (2012).

Milani, Tavares e Scherpinski (2008), em análise do solo no mesmo local estudado por Pacheco (2012), encontraram que a umidade volumétrica do solo na capacidade de campo era 40,5% e que a umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente era 25,3%.

4.4 Concepção do *hardware*

O Arduino é uma plataforma de *hardware* e *software* livre utilizada por diversos pesquisadores e pela indústria de automação. Seu custo comparativamente a outras plataformas é muito baixo e permite que o desenvolvedor não esteja preso a nenhum fabricante específico. O projeto de todas as placas e seus descritivos estão disponibilizados no *site*: <http://www.arduino.cc>. Outra grande vantagem é que na *internet* se encontra todo tipo de exemplo de uso para a integração com outros equipamentos e sensores. Portanto, o *hardware* desenvolvido nesta pesquisa têm com base principal esta plataforma.

O projeto tem na sua base um circuito Arduino integrado através de suas portas analógicas e/ou digital com os sensores, rádios e placas de comunicação com a *internet*. Como o equipamento precisava estar no campo, foi acondicionado em uma caixa apropriada isolando-o das intempéries.

Para que o sistema no campo possa ser alimentado, o conjunto, placa e sensores, é alimentado por bateria e placas solares, pois é utilizado por grandes períodos.

A comunicação entre sensores deve ser garantida uma distância de 50 a 100 m.

4.5 Concepção do *software*

O *software* é embarcado em placa Arduino. As bibliotecas utilizadas são de *software* livre e a escolha do *hardware* reflete a capacidade de memória do microcontrolador a ser utilizada no programa, ou seja, o programa deve ser otimizado para estar contido no espaço disponível da memória *flash*.

A linguagem utilizada para Arduino é a C++. Todas as bibliotecas utilizadas são disponibilizadas pela plataforma, os casos em que não há suporte, a comunidade de usuários da plataforma fornece.

O *software* considera que a aplicação deve reduzir o consumo de energia e colocar o sistema em *standby* quando não estiver em operação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento do *hardware*, *software* e os dados coletados.

5.1 O projeto e montagem do nó sensor

Foi utilizado o Arduino Nano como microcontrolador para o nó da rede de sensores. Esse microcontrolador apresenta dimensões de 18 x 45 mm, memória *Flash* de 32 kbytes, 8 entradas e saídas analógicas e 22 entradas e saídas digitais. O consumo também é mínimo comparado a outros da série Arduino, 19 mA em 5 V. Para a comunicação bidirecional entre os nós e o *Gateway* foi utilizado o rádio NRF24L01. Os sensores digitais de umidade e temperatura utilizados foram o SHT20 e o DHT22, o sensor resistivo de umidade, que é analógico, foi o FC-28 e, para estabelecer sincronismo temporal entre as leituras, foi utilizado o *Real Time Clock* DS1302. O sistema é alimentado por uma bateria de 9 V recarregável e que é mantida carregada por um circuito composto por um LM317, diodos, resistores e três placas solares de 5 V e 200 mA cada uma. Na Figura 15, mostra-se o circuito do protótipo e, na Figura 16, apresenta-se o circuito do carregador solar da bateria.

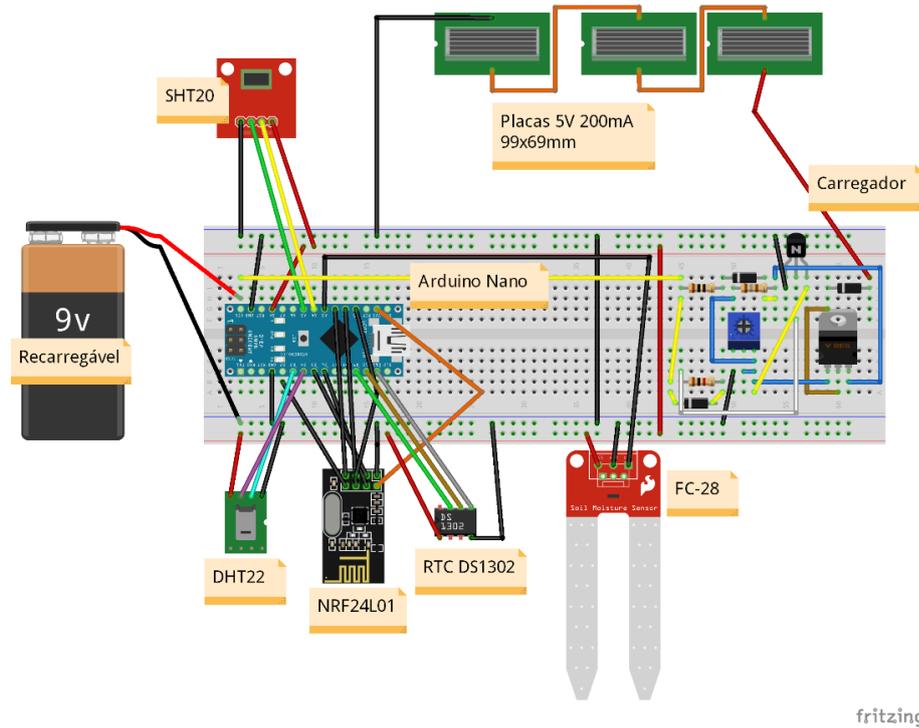


Figura 15 Circuito do nó (protótipo).

Nota: Imagem construída utilizando o *software* Fritzing.

O circuito montado para o carregador foi adaptado de Mohankumar (2016) com algumas alterações, pois, originalmente, foi projetado para carregar bateria de 6 V.

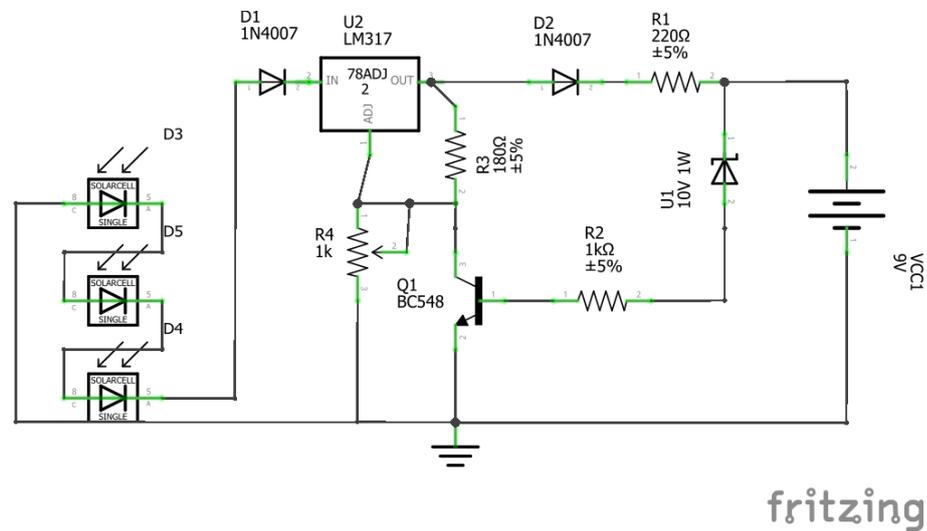


Figura 16 Carregador de bateria que utiliza células solares.

Nota: Imagem construída utilizando o *software* Fritzing.

O circuito montado e soldado em placa de fibra de vidro é apresentado na Figura 17.

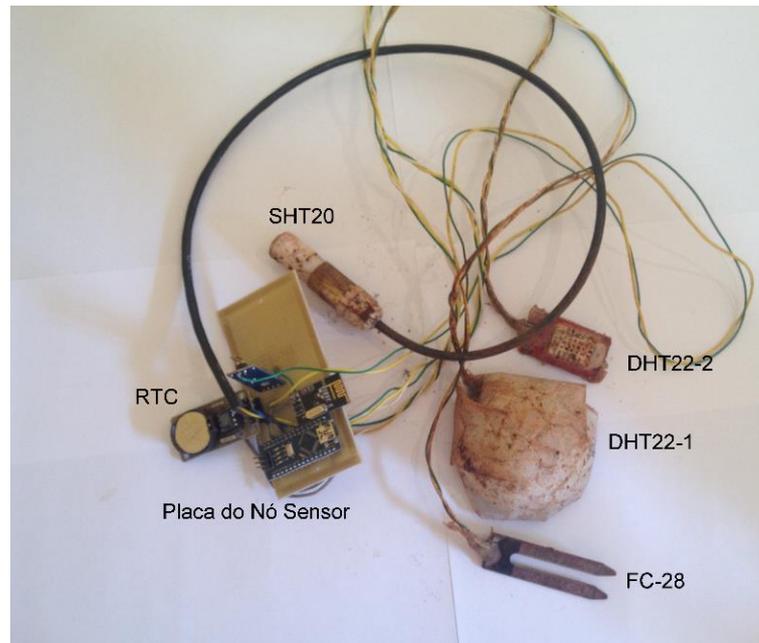


Figura 17 Protótipo do nó sensor, montado com os sensores.

Pode-se observar na Figura 17 que, além da placa do nó sensor, estão conectados 4 dispositivos. Os dois DHT22, um SHT20, ambos sensores de umidade capacitivos e também medem a temperatura, e o FC-28 que é um sensor de umidade resistivo.

O sensor DHT22-1 teve sua câmara de ar ampliada com a fabricação de uma semiesfera em Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS), impresso em uma impressora 3D (Figura 18c). Retirou-se do DHT22 o invólucro branco que aparece na Figura 18a, ficando como é mostrado na Figura 18b. A semiesfera possui um diâmetro de 6,5 cm.

Na Figura 18d está o resultado final, após o revestimento da semiesfera com uma tela de *silkscreen* muito fina, que permite a passagem do ar úmido.

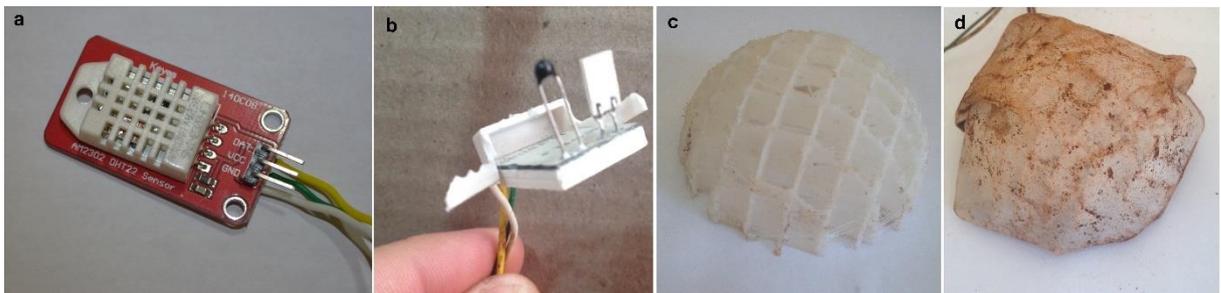


Figura 18 Sensor DHT22 modificado: a) original; b) sem invólucro; c) semiesfera de ABS; d) resultado final com o sensor dentro do invólucro e com uma tela aplicada.

5.2 O projeto e montagem do Gateway

O Gateway foi projetado baseado no Arduino Uno com a ligação de um Arduino Ethernet Shield W5100. O Shield W5100 conecta o Arduino Uno através de um cabo com conector RJ45 na Internet através de um ponto de rede.

Para conectar logicamente o Gateway com os nós sensores foi utilizado o rádio NRF24L01 conectado fisicamente ao conjunto, conforme apresentado nas figuras 19 e 20.

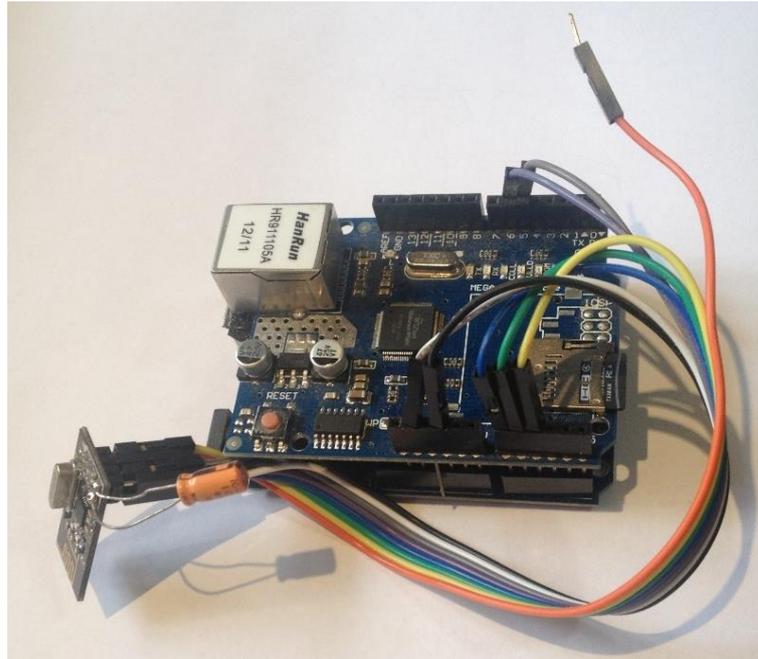


Figura 19 Montagem do Gateway.

Na ligação do rádio NRF24L01 com a placa do microcontrolador Arduino Mega ou Uno o pino IRQ do rádio não foi conectado.

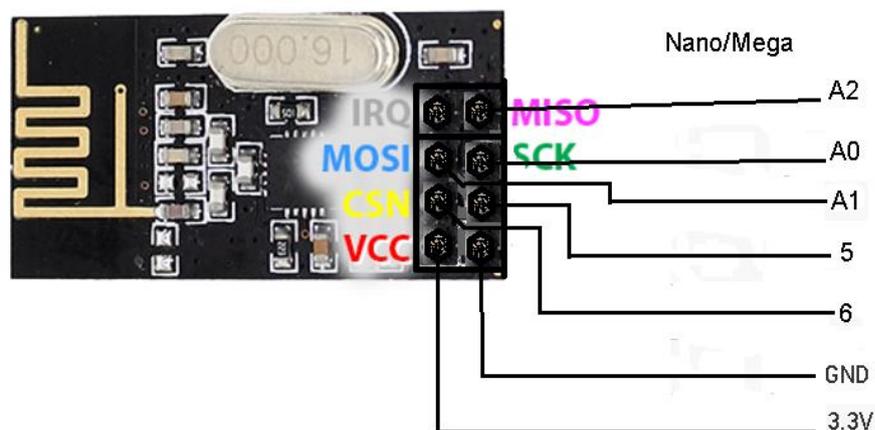


Figura 20 Diagrama de ligação do rádio NRF24L01 com a placa do microcontrolador.

5.3 O software

O diagrama de comunicação apresentado na Figura 20 representa todo o fluxo de mensagens entre os componentes do sistema de *hardware*.

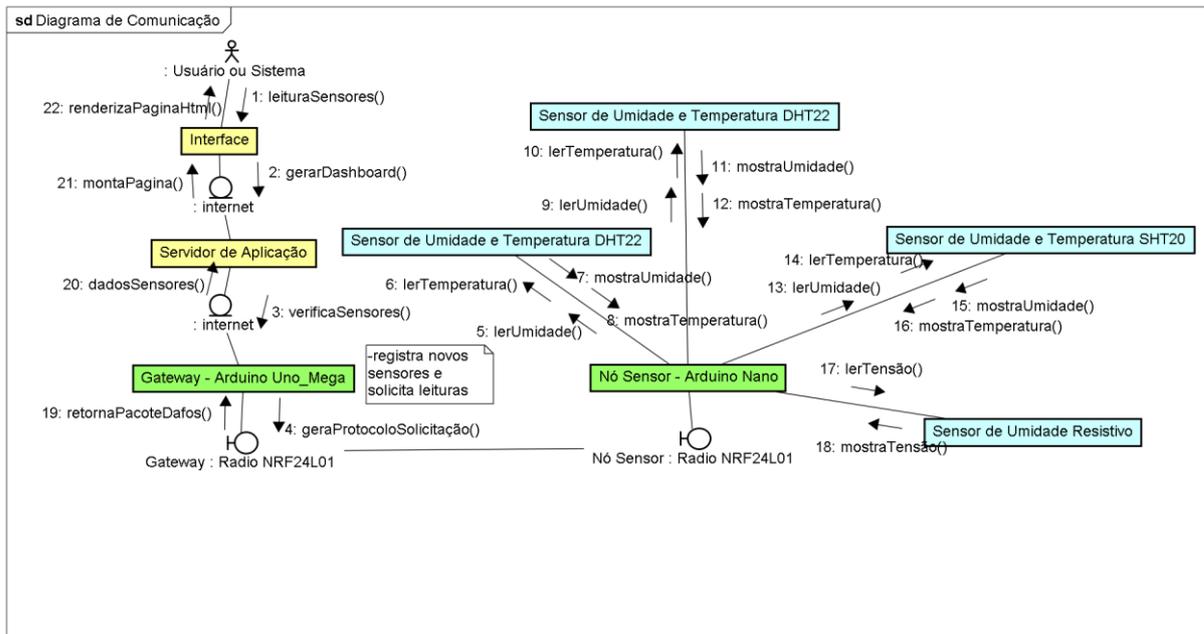


Figura 21 Diagrama de comunicação para o sistema de leitura.

O usuário, que pode ser uma pessoa ou qualquer outro sistema, recebe os dados de todos os sensores monitorados na rede através de um endereço no navegador web. O dispositivo pode ser um *tablet*, um *smartphone* ou ainda um computador.

Quando um nó sensor é ligado, um pacote de inicialização é enviado pelo rádio; se o pacote for recebido pelo *Gateway* este fornecerá um número de identificação para o solicitante e retornará via rádio uma resposta para o nó que iniciou o diálogo; se outros nós sensores próximos receberem o pacote de inicialização, irão retransmitir o pacote de inicialização via rádio uns aos outros na expectativa de alcançar o *Gateway*; os nós também retransmitem a resposta à solicitação de inicialização de outros nós que tenha vindo do *Gateway*. Logo, se houver fisicamente proximidade entre os rádios, todos os nós conseguirão ser identificados numericamente e por seu tipo. Isto possibilitou que a qualquer tempo um nó sensor seja inserido na rede. O pacote de inicialização identifica o sensor e o tipo de dados que ele fornece, umidade, temperatura ou tensão.

Os nós sensores e o *Gateway* armazenam, em sua memória não volátil, o menor percurso para a transmissão de dados após inicializados.

Essa rede de rádio pode consistir em até 254 nós de rádio diferentes e cada nó de rádio pode relatar dados para 254 sensores de conectados à rede. Isso significa que, em teoria, é possível gerenciar dados para até 64516 sensores em uma única rede de rádio. Se isso não for suficiente, é possível criar outra rede de rádio paralela em um canal diferente e existem 126 canais disponíveis para o NRF24L01.

O nó sensor atua no sistema conforme o diagrama de máquina de estado (Figura 22).

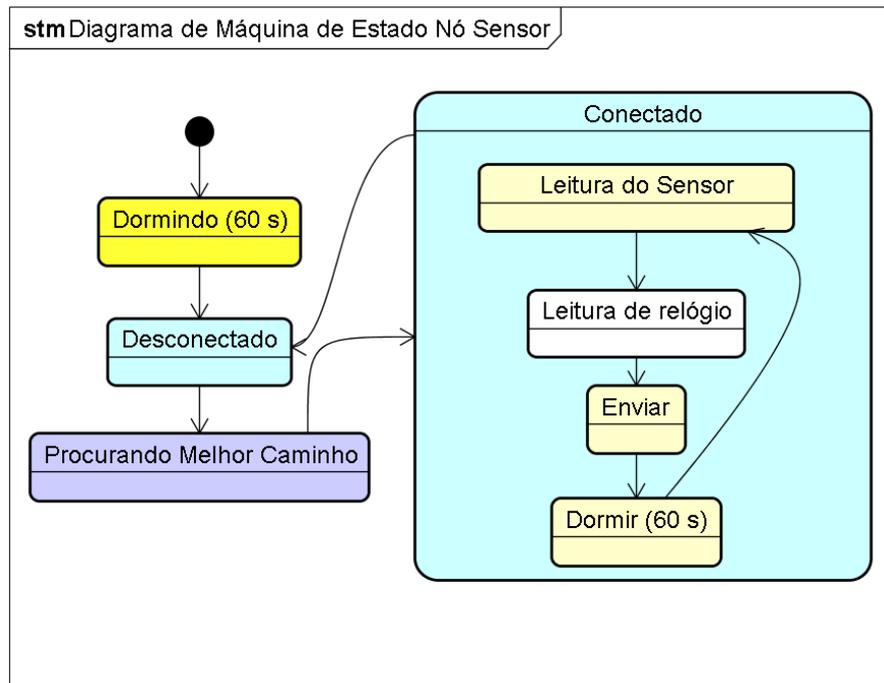


Figura 22 Diagrama de máquina de estado do nó sensor.

A comunicação entre o *Gateway* e o controlador, neste caso o servidor de aplicação, usa a seguinte estrutura de mensagem (protocolo):

<idNo>; <idSensor>; <comando>; <ack>; <tipo>; <dados>\n

onde:

- idNo é o identificador do nó sensor, é um número único;
- idSensor é o identificador do sensor que está sendo monitorado no nó;
- comando é uma ação que deve ser realizada;
- ack é utilizada para confirmação de mensagem recebida;
- tipo depende do “comando”, tem diferentes significados;
- dados é a informação a ser coletada do sensor ou então um estado de acionamento a ser realizado no nó.

Os comandos utilizados são valores numéricos:

- a) apresentação (0), para quando um nó sensor está no processo de inicialização;
- b) enviar (1), esta mensagem é enviada quando o nó sensor quer informar ao *Gateway* um novo valor de leitura realizado ou o *Gateway* pode usá-la para solicitar a um nó sensor que realize nova leitura em um dos seus sensores;

c) receber (2), solicita um valor de variável.

Quando o “comando” de um sensor para o *Gateway* for “apresentação”, o “tipo” identifica qual a grandeza ou instrumento que será monitorado pelo controlador. Foi usado 6 para o sensor de temperatura e 7 para a umidade. O relógio do nó sensor usa o número 40. Para que se obtenha o momento exato em que a temperatura e ou a umidade foi lida, data e hora, a data e hora do relógio do sensor é convertida para o número de segundos, a partir de 01/01/2016, ou seja, é um número que será armazenado. Para obter-se o tempo em hora, minuto e segundo, aplica-se a este número um cálculo inverso.

A codificação do *software* desenvolvido para o nó sensor e o *Gateway* foi executada na linguagem C++, utilizando o ambiente e as bibliotecas disponíveis no Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) e também as bibliotecas externas *Ethernet*, *SPI*, *Wire*, *Adafruit DHT Unified*, *DHT*, *MySensors*, *SHT2x – Arduino Library Master*, *Sodaq_SHT2x* e *VirtuabotixRTC*. Essas bibliotecas, por sua vez, acessam diversas outras em seus respectivos pacotes.

O servidor de aplicação utilizado foi o Domoticz (<http://www.domoticz.com>), implementado também com a linguagem C++ e instalado em um *notebook* Sony Vaio com processador Core i7 e sistema operacional Windows 10.

A interface do usuário gerada pelo Domoticz é um *frontend web* HTML5 escalável e é automaticamente adaptada para *Desktop* e dispositivos móveis. Logo, não importa qual o tamanho da tela do dispositivo ou do sistema operacional para acessar o sistema, o usuário terá uma tela de monitor adaptada instantaneamente.

A janela mostrada ao usuário quando este estiver usando um *Desktop* é apresentada na Figura 23 e em um *Iphone* na Figura 24.



Figura 23 Janela a ser visualizada pelo usuário em um *Desktop*.



Figura 24 Janela a ser visualizada pelo usuário em um *Iphone*.

A interface detecta a tela do dispositivo e renderiza a página de visualização com um formato próprio.

As leituras dos sensores em cada nó são armazenadas em um arquivo com a extensão *.db* gerenciado pelo *SQLite*. Pode-se então exportar os dados para outros sistemas via conexão com esse banco.

O banco é composto por 48 tabelas e 7 gatilhos sendo que as tabelas *DeviceStatus* e *Temperature* possuem os dados relacionados ao armazenamento das leituras.

Nas figuras 25 e 26 são mostrados os campos de cada uma.

ID	HardwareID	DeviceID	Unit	Name	Used	Type	SubType
Filtro	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro
1	2	258	0	TempHum SH...	1	82	5
4	2	257	0	TempHum D...	1	82	5
5	2	259	1	TempHum SH...	0	82	5
6	2	260	1	TempHum D...	0	82	5

Figura 25 Campos com dados da tabela *DeviceStatus*.

DeviceRowID	Temperature	Chill	Humidity	Barometer	DewPoint	SetPoint	Date
Filtro	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro
1	26.3	0.0	56	0	16.83	0.0	2015-08-31 2...
1	26.3	0.0	57	0	17.11	0.0	2015-08-31 2...
1	26.3	0.0	57	0	17.11	0.0	2015-08-31 2...
1	26.3	0.0	57	0	17.11	0.0	2015-08-31 2...
1	26.3	0.0	56	0	16.83	0.0	2015-08-31 2...

Figura 26 Campos com dados da tabela *Temperature*.

Observa-se que o sensor identificado com o ID 1, na tabela da Figura 25, possui os dados relacionados a ele na tabela da Figura 26, ou seja, a coluna *DeviceRowId* com o valor 1 se refere àquele dispositivo.

A interface que está disponível ao usuário também permite visualizar os dados graficamente, a Figura 27 ilustra esta funcionalidade.

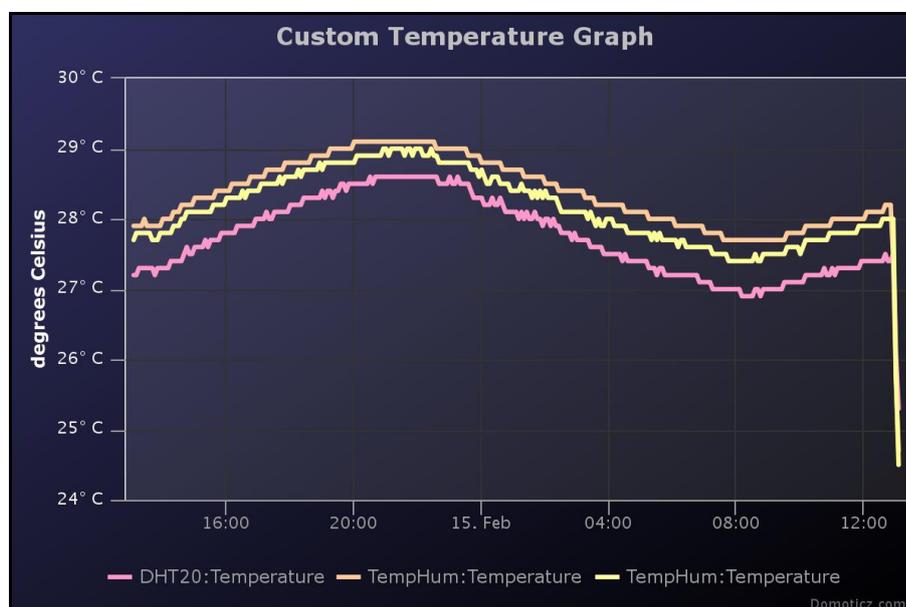


Figura 27 Gráfico de visualização da variação de temperatura em três sensores diferentes.

No gráfico da Figura 27, percebe-se que a temperatura variou nos três sensores entre 27 °C a 29 °C no período das 12:00 do dia 14 de fevereiro às 12:00 do dia seguinte.

5.4 *Time domain reflectometry* - TDR

O equipamento a ser usado é um TDR da marca Trase®, modelo 6050X1, com suas sondas de diversos comprimentos, conforme Figura 28.



Figura 28 TDR da marca Trase ® modelo 6050X1.

O TDR permite fazer medições, gravar as leituras e gráficos e transferi-los para o computador, com dados que podem ser armazenados ou impressos, conforme mostra o manual fornecido pelo fabricante (SOILMOISTURE EQUIPMENT CORPORATION, 1998).

5.5 O experimento

Conforme a recomendação de Tommaselli (1997), para que a medição da umidade do solo seja confiável, torna-se necessário no mínimo a determinação de vinte valores da constante dielétrica e as respectivas umidades do solo, distribuídos uniformemente entre o ponto de umidade residual e o ponto de saturação do solo durante o delineamento da curva de calibração da tecnologia TDR. Usou-se essa indicação para este trabalho e, para obtenção dos pontos uniformemente distribuídos, foi adotada a metodologia descrita a seguir.

Foram construídos 20 recipientes com tubo de PVC de 100 mm de diâmetro com altura de 50 cm. Na base, usou-se um Caps (tampão) com anel de vedação.

Um dos recipientes foi preenchido com solo até uma altura de 20 cm e, em uma balança de precisão, foi medida a massa do solo, descontada a massa do conjunto. Assim, obteve-se um valor de 2,3 kg. Logo, foi calculada a necessidade de, aproximadamente, 46 kg de solo para o preenchimento de todos os tubos.

Utilizando-se outros recipientes apropriados, 50 kg de solo foram colocados em uma estufa a 105 °C durante 48 horas, tampado hermeticamente e deixado esfriar por 6 horas.

Novamente o solo seco foi colocado em todos os recipientes a uma altura de 20 cm no tubo.

Com uma amostra de 20 g do solo úmido determinou-se a umidade residual.

Para determinação da umidade de saturação do solo foi utilizado um recipiente de PVC com as dimensões já descritas. A sua base foi perfurada e mergulhada em outro recipiente bem maior, no qual a coluna d'água tinha 2/3 da altura do solo no tubo. Sob a base do tubo colocou-se uma tela para permitir a entrada de água pelo fundo. O balde ficou imerso durante 5 dias.

O intervalo entre a umidade residual e a capacidade de campo foi dividido em 20 partes, obtendo-se a umidade que o solo contido no recipiente deveria possuir. Subtraindo-se da umidade desejada, o valor da umidade residual, calculou-se a quantidade de água a ser adicionada ao solo de cada recipiente, multiplicando a diferença pelo peso do solo. A massa de água, múltiplo de 40 g, foi cuidadosamente aspergida sobre a massa de solo em cada recipiente e, logo após a mistura, peneirada por duas vezes consecutivas, em malhas de 2 mm e, finalmente, depositada de volta no recipiente. Após a deposição do solo no recipiente, este foi vedado com plástico e cinta elástica. Durante 10 dias, o tubo foi diversas vezes balançado ao ar para que houvesse a homogeneização da umidade em todo o perfil.

Em cada um dos tubos, um a cada vez, foram inseridos os sensores ligados ao nó sensor e também à sonda de 20 cm do TDR e o tubo foi fechado novamente. Foram realizadas 5 leituras em cada sensor a cada 2 horas, medições de umidade, temperatura, tensão e no TDR mediu-se a constante dielétrica e a umidade volumétrica.

Para que as leituras nos outros tubos, com os mesmos sensores, não sofressem o efeito das medições anteriores, fossem resilientes, os sensores ficaram durante 2 horas em ambiente à sombra e temperatura ambiente, antes de voltar a medir novamente.

Para se obter as medições localmente, na memória do nó sensor, como se esse fosse um *Datalogger*, padronizou-se a saída dos dados seriais, no formato da Figura 29.

```

s5=21.60,s4=75.99,s1=21.90,s3=22.30,s0=74.90,s2=87.00,s7=1020.00,, 08/08/2016 16:59:47
s5=21.60,s4=75.99,s1=21.90,s3=22.30,s0=74.90,s2=87.10,s7=1015.00,, 08/08/2016 16:59:54
s5=21.61,s4=75.99,s1=21.90,s3=22.30,s0=74.90,s2=87.10,s7=1021.00,, 08/08/2016 17:00:00
s5=21.61,s4=75.99,s1=21.90,s3=22.30,s0=74.90,s2=87.20,s7=1013.00,, 08/08/2016 17:00:06
s5=21.61,s4=75.99,s1=21.90,s3=22.40,s0=75.00,s2=87.20,s7=1017.00,, 08/08/2016 17:00:13
s5=21.61,s4=76.02,s1=21.90,s3=22.40,s0=75.00,s2=87.20,s7=1014.00,, 08/08/2016 17:00:19
s5=21.61,s4=76.02,s1=21.90,s3=22.40,s0=75.00,s2=87.30,s7=1017.00,, 08/08/2016 17:00:25
s5=21.61,s4=76.02,s1=21.90,s3=22.40,s0=75.00,s2=87.30,s7=1014.00,, 08/08/2016 17:00:32
s5=21.61,s4=76.02,s1=21.90,s3=22.40,s0=75.00,s2=87.40,s7=1017.00,, 08/08/2016 17:00:38
s5=21.62,s4=76.02,s1=21.90,s3=22.40,s0=75.00,s2=87.40,s7=1015.00,, 08/08/2016 17:00:44
s5=21.62,s4=76.02,s1=21.90,s3=22.40,s0=75.00,s2=87.40,s7=1017.00,, 08/08/2016 17:00:51
s5=21.62,s4=76.02,s1=21.90,s3=22.40,s0=75.00,s2=87.40,s7=1014.00,, 08/08/2016 17:00:57
s5=21.63,s4=76.02,s1=21.90,s3=22.40,s0=75.00,s2=87.50,s7=1019.00,, 08/08/2016 17:01:03
s5=21.63,s4=76.02,s1=21.90,s3=22.40,s0=75.00,s2=87.50,s7=1013.00,, 08/08/2016 17:01:09
s5=21.63,s4=76.02,s1=21.90,s3=22.40,s0=75.00,s2=87.50,s7=1018.00,, 08/08/2016 17:01:16
s5=21.63,s4=76.02,s1=21.90,s3=22.40,s0=75.00,s2=87.60,s7=1020.00,, 08/08/2016 17:01:22
s5=21.64,s4=76.02,s1=21.90,s3=22.40,s0=75.00,s2=87.60,s7=1014.00,, 08/08/2016 17:01:28

```

Figura 29 Saída serial dos dados lidos no nó sensor.

Na Figura 29 cada linha representa uma leitura de todos os sensores. A data e hora da leitura é registrada nas duas últimas colunas e no final de cada linha é gerado um *Line Feed* ou \n. Para o sensor SHT20 a variável s5 representa a leitura de temperatura e s4 a umidade. Para o sensor DHT22-1 a variável s1 representa a leitura de temperatura e s0 a umidade e, ainda, para o sensor DHT22-2 a variável s3 representa a leitura de temperatura e s2 a umidade. A variável s7 é o valor da tensão do sensor resistivo FC-28.

Durante as leituras efetuadas nos recipientes, a umidade volumétrica e a constante dielétrica também foram medidas com o TDR, conectado com a sonda original do fabricante introduzida no recipiente. O TDR foi programado para fazer uma série de leituras naquele mesmo período, como ela possui memória interna não volátil, após este período os dados foram obtidos através da interface RS232 e de cabo apropriado.

Utilizou-se o *software* RComSerial, v. 1.2 da Rogercom (www.rogercom.com). Esse *software* é um excelente terminal de comunicação. Após a obtenção dos dados, no formato da Figura 30, gerou-se arquivo texto com extensão txt.

```

1,1,"",4.0,3.4,20.0,"BUR",0,0,"BUN",10.9,"08-AUG-16","16:12:01",0,"","21A"
1,2,"",4.0,3.4,20.0,"BUR",0,0,"BUN",10.9,"08-AUG-16","16:14:01",0,"","21A"
1,3,"",4.0,3.4,20.0,"BUR",0,0,"BUN",10.9,"08-AUG-16","16:16:01",0,"","21A"
1,4,"",4.0,3.4,20.0,"BUR",0,0,"BUN",10.9,"08-AUG-16","16:18:01",0,"","21A"
1,5,"",4.1,3.4,20.0,"BUR",0,0,"BUN",10.9,"08-AUG-16","16:20:01",0,"","21A"
1,6,"",4.0,3.4,20.0,"BUR",0,0,"BUN",11.0,"08-AUG-16","16:22:25",0,"","21A"
1,7,"",4.0,3.4,20.0,"BUR",0,0,"BUN",10.9,"08-AUG-16","16:24:01",0,"","21A"
1,8,"",7.1,4.7,20.0,"BUR",0,0,"BUN",11.0,"08-AUG-16","16:27:00",0,"","21A"
1,9,"",7.2,4.7,20.0,"BUR",0,0,"BUN",11.0,"08-AUG-16","16:28:01",0,"","21A"
1,10,"",7.3,4.8,20.0,"BUR",0,0,"BUN",11.0,"08-AUG-16","16:30:01",0,"","21A"
1,11,"",7.5,4.9,20.0,"BUR",0,0,"BUN",11.0,"08-AUG-16","16:32:01",0,"","21A"
1,12,"",7.7,5.0,20.0,"BUR",0,0,"BUN",11.0,"08-AUG-16","16:34:38",0,"","21A"
1,13,"",7.8,5.0,20.0,"BUR",0,0,"BUN",11.0,"08-AUG-16","16:36:01",0,"","21A"
1,14,"",8.1,5.1,20.0,"BUR",0,0,"BUN",11.0,"08-AUG-16","16:38:01",0,"","21A"
1,15,"",8.2,5.2,20.0,"BUR",0,0,"BUN",11.0,"08-AUG-16","16:40:01",0,"","21A"
1,16,"",8.3,5.2,20.0,"BUR",0,0,"BUN",11.0,"08-AUG-16","16:42:26",0,"","21A"
1,17,"",8.3,5.2,20.0,"BUR",0,0,"BUN",11.0,"08-AUG-16","16:44:01",0,"","21A"

```

Figura 30 Arquivo de leitura do TDR.

Na primeira linha da Figura 30, o campo que apresenta o valor 4.0 indica a umidade volumétrica lida, o campo que apresenta 3.4 indica o valor da constante dielétrica, logo a seguir o tamanho da sonda e outras informações, como a data e a hora da leitura efetuada. Cada linha representa então uma leitura e os dados estão separados por vírgula.

5.6 Dados obtido pelos sensores de umidade

Os valores medidos através do método da estufa, pelo TDR e pelos sensores de umidade, estão apresentados nas tabelas 1, 2, 3, 4, 5 e 6 do Apêndice A, e visualizados nas figuras 1, 2, 3, 4, 5 e 6 do Apêndice A, que apresentam os gráficos de linhas ajustados para o modelo de regressão cúbica, cabe então a análise desses dados aplicados à Figura 31.

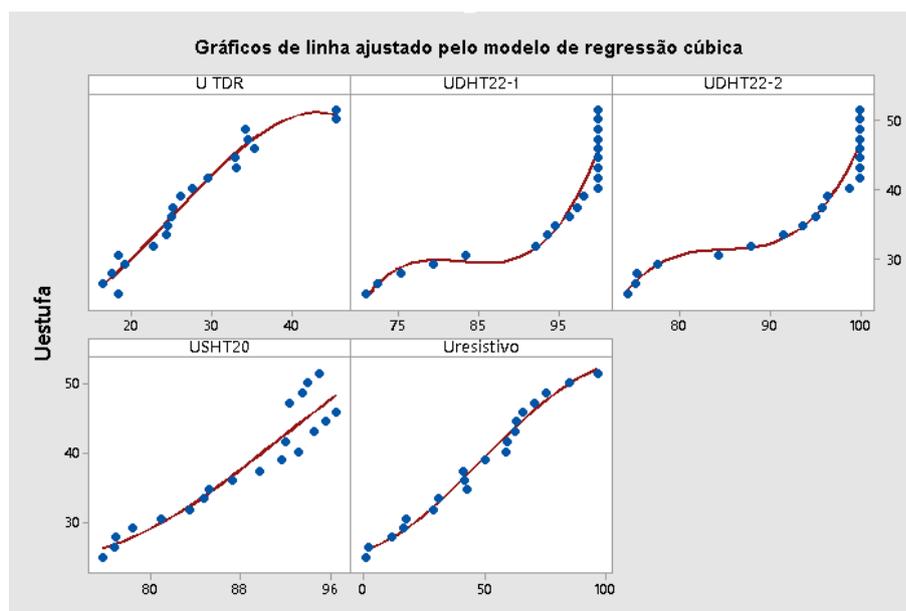


Figura 31 Gráficos de linha ajustados pelo modelo de regressão cúbica entre as leituras de umidade dos sensores e o padrão da estufa.

Observa-se visualmente que o modelo cúbico se adaptou a todas as curvas de ajuste. Os pontos acima de 92% no sensor SHT20 apresentam um resíduo maior, em relação a todas as outras curvas. O sensor resistivo apresenta uma curva semelhante, na forma e nos parâmetros da TDR; os dois sensores DHT22 tiveram um comportamento muito semelhante entre si.

Os sensores DHT22 e SHT20 apresentam grandezas de leituras de valores de umidade muito acima dos valores esperados e, inclusive, nos sensores DHT22 fazem limitar o valor real da umidade próximo ao valor de 47%, não permitindo valores acima deste, ou seja, quando o sensor estiver gerando um valor de 98% ou acima, na verdade, comparado com o padrão ouro, a equação do modelo sempre resultará um valor de 47%, mesmo quando a umidade real estiver bem acima deste valor.

Outra característica negativa observada pelos sensores DHT22 é que, quando estiverem fornecendo uma leitura entre 80% e 90% de umidade, o valor real, aplicando-se o modelo de regressão obtido, estará na verdade entre 29% e 31%, ou seja, o erro será maior, pois, em uma variação de 10% gera apenas 2% de variação do valor real.

O “valor de p” para o modelo de regressão, em todas as equações, mostra que os modelos estimados pelo procedimento de regressão são significantes em um nível de 0,05 para cada uma delas, já que em todas $p.\text{valor} < 0,05$.

Também se faz necessário analisar as equações de regressão obtidas, as chamadas curvas de ajuste.

$$U_{\text{estufa}} = 24,17 - 1,052 U_{\text{TDR}} + 0,09123 U_{\text{TDR}}^2 - 0,001214 U_{\text{TDR}}^3$$

$$U_{\text{estufa}} = - 2022 + 74,42 U_{\text{DHT22-1}} - 0,8988 U_{\text{DHT22-1}}^2 + 0,003614 U_{\text{DHT22-1}}^3$$

$$U_{\text{estufa}} = - 2522 + 90,09 U_{\text{DHT22-2}} - 1,060 U_{\text{DHT22-2}}^2 + 0,004162 U_{\text{DHT22-2}}^3$$

$$U_{\text{estufa}} = 814 - 27,88 U_{\text{SHT20}} + 0,3185 U_{\text{SHT20}}^2 - 0,001159 U_{\text{SHT20}}^3$$

$$U_{\text{estufa}} = 25,91 + 0,1020 U_{\text{resistivo}} + 0,005017 U_{\text{resistivo}}^2 - 0,000034 U_{\text{resistivo}}^3$$

Observando-se o coeficiente de grau 3 das equações dos modelos de ajuste, o modelo para a umidade no sensor resistivo tem quase nenhuma influência para umidades até 35%.

Nas equações obtidas para os sensores capacitivos: DHT22 e SHT20, o termo independente mostra uma discrepância muito grande em relação à TDR e ao FC-28. Com absoluta certeza, o fato gerador deste valor foi a leitura da umidade estar iniciando em valores muito elevados.

Na análise da variância dos dados sabemos que, teoricamente, se um modelo fosse capaz de explicar 100% da variância, os valores ajustados seriam sempre iguais aos valores observados e, conseqüentemente, todos os pontos de dados estariam na linha de regressão ajustada. Logo, para comparar os modelos obtivemos o Coeficiente de Determinação dos modelos:

$$R^2_{\text{TDR}} = 96,9\%; R^2_{\text{DHT22-1}} = 90,1\%; R^2_{\text{DHT22-2}} = 92,7\%; R^2_{\text{SHT20}} = 89,0\% \text{ e } R^2_{\text{Resistivo}} = 98,5\%.$$

De acordo com os valores de R^2 , os modelos que melhor explicam a relação entre os valores obtidos pelo método da estufa, padrão ouro, são o da TDR e o do sensor resistivo, apesar de que os outros sensores também apresentaram um bom coeficiente de determinação.

Considerando ainda a análise de variância, outra medida que permite a comparação dos modelos é o erro padrão da regressão (S), no qual o menor valor indica o melhor modelo:

$$S_{\text{TDR}} = 1,58906; S_{\text{DHT22-1}} = 2,83434; S_{\text{DHT22-2}} = 2,4295; S_{\text{SHT20}} = 2,98157; S_{\text{Resistivo}} = 1,11613.$$

Nesse caso, ainda se apresentam as duas regressões anteriores como as melhores, a TDR e a do sensor resistivo, só que agora apontando o resistivo como o melhor através do cálculo do desvio padrão dos resíduos.

5.7 Consumo de energia do nó sensor

A rede está baseada em rádio que usa o transceptor nRF24L01, fabricado pela Nordic, possui um baixo consumo de energia, taxa de dados de até 2 Mbps, opera na banda de 2,4 GHz ISM. O nRF24L01+ integra um transceptor RF completo de 2.4GHz, sintetizador

de RF e lógica *baseband*, incluindo o *hardware* avançado, acelerador de protocolo ShockBurst™, suportando uma interface SPI de alta velocidade entre o controlador da aplicação. A tensão de alimentação usada foi 3.6 V. A potência, quando está transmitindo, oscila, aproximadamente, em torno de 40,68 mW, durante a recepção é de 44,28 mW e durante o repouso 3,24 μ W.

O consumo de potência de todo o circuito do nó sensor, com todos os sensores instalados e coletando as medidas de temperatura, umidade, calendário (data e hora) e transmissão/recepção consome 0,034 A, ou seja, a fonte de 5 volts do regulador que está no Arduino e alimenta a placa consome 168 mW.

A relação de consumo de energia entre o período em que o nó está transmitindo/recebendo o sinal e quando está em repouso é 35% maior, portanto, é um valor expressivo e deve ser levado em consideração durante a configuração do ciclo de leitura e transmissão de dados.

O ciclo de leitura e envio foi alterado para transmitir novos valores de um sensor apenas quando este obtiver uma leitura que varie 5% ou mais da anterior. Esse valor também poderá ser configurado.

Apesar de alertar sobre o aumento no consumo durante a transmissão/recepção dos dados, na prática, verificou-se que o tempo de transmissão não tem grande influência, pois as transmissões são feitas com um pacote de 32 bytes a uma velocidade de 1 Mbps, logo, cada pacote consome 35% mais de energia apenas durante 256 μ s.

5.8 Comportamento da rede *mesh*

Foram realizados testes com o nó em região urbana a distâncias de 30, 50 e 100 m do *Gateway* com visada entre os rádios.

Tabela 2 Número de pacotes enviados pelo nó e recebidos pelo *Gateway*

Pacotes enviados a cada 5 minutos	Distância 30 m	Distância 50 m	Distância 100 m
100	100	100	100

Não foi avaliado o envio de pacotes no campo e em maiores distâncias.

5.9 Custo do produto implementado

Nesta seção são apresentados os valores relativos aos custos de desenvolvimento do produto, comparativamente para o Brasil e China.

O *hardware* do nó sensor:

Descrição	Preço US\$ (china)	Preço R\$ (Brasil)
Arduino nano	2,00	20,00
Módulo RTC1302	3,00	13,00
DHT22	3,00	36,90
SHT20	12,00	-
FC-28	3,00	20,00
Rádio NRF24L01+	1,00	15,00
Bateria 9V	10,00	22,00
Placas Solares	3 x 4,00	3 x 30,00
Componentes carregador	7,00	35,00
Total	53,00	251,90

O Gateway:

Descrição	Preço US\$ (china)	Preço R\$ (Brasil)
Arduino Uno	4,00	50,00
Shield w5100	5,50	50,00
Rádio nRF24L01+	1,00	15,00
Total	10,50	115,00

A aquisição de uma unidade da TDR utilizada no experimento, com uma sonda, foi orçada em R\$176.000,00.

Logo, a diferença de valores entre o sistema desenvolvido e a TDR para a aplicação no campo é muito grande. A preços do Brasil, uma unidade completa desenvolvida custaria ao produtor rural o valor de R\$ 366,00 reais e um custo de R\$ 251,00 a cada novo nó ligado na rede de sensores. A TDR só faz uma leitura com uma única sonda e, ainda assim, limitada à distância do cabo que liga a TDR à sonda.

6 CONCLUSÕES

Considerando os objetivos traçados e os resultados alcançados, pode-se concluir que:

- O projeto de *hardware* do *Gateway* e do nó sensor funcionaram adequadamente no requisito de utilização de tecnologias livres. A plataforma utilizada - Arduino – traz a característica de hardware e software livres, através da licença Creative Commons. Ocupam pouco espaço físico, baixo consumo de energia e alto desempenho, além de o preço de seus componentes estarem muito abaixo dos apresentados por muitas outras tecnologias. O sistema de bateria permite funcionamento sem recarga até 36 horas e, com sol, as células fotovoltaicas garantem funcionamento ininterrupto.
- Os sensores empregados e o rádio apresentaram custo muito baixo e foi demonstrado que a utilização de todos os dispositivos é viável, principalmente o resistivo e que este ou os outros capacitivos podem substituir a utilização da TDR para a medição de umidade, aplicando-se a correção através das curvas encontradas neste trabalho.
- A utilização da rede *Mesh* através da biblioteca MySensors garantiu a entrega dos dados ao *Gateway*, sem falhas. Os dados podem trafegar do sensor para *Gateway* e *internet* ou vice versa, inclusive permitindo que sejam dados comandos remotos ao nó sensor através da interface *web*.
- A análise dos dados indicou a viabilidade da utilização dos sensores propostos e resultou em um modelo a ser aplicado para cada dispositivo.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante os experimentos a manipulação dos sensores revelou a fragilidade dos materiais empregados.

Em contato com o solo, o sensor resistivo apresentou alguns sinais de corrosão que, mesmo depois do experimento e de sua retirada do solo, embora em menor ritmo, continua. Certamente seu uso continuado no campo deverá exigir manutenção periódica, pelo menos uma vez ao mês.

Os sensores capacitivos DHT22 tiveram que ter os seus circuitos lacrados com silicone, pois dentro do solo também foram atacados e certamente também com o tempo irão se degenerar, requerendo também a atenção e planejamento de manutenção preventiva.

O único sensor que não foi afetado foi o SHT20, pois este usa polímeros na fabricação de seu dielétrico.

Deve-se avaliar melhor o sistema do carregador das células fotovoltaicas proposto, através da análise durante todo o ano das condições de insolação na região.

O *software* Domoticz deve ser instalado em um dispositivo embarcado como uma placa Raspberry PI ou ainda Beaglebone ou outra, o que diminuiria o custo, pois dispensaria o uso de um *notebook* ou *Desktop* de servidor, inclusive faria diminuir o consumo de energia.

A maior contribuição do sistema proposto foi disponibilizar um conjunto de *hardware* e *software* de baixo custo para a coleta de informações real time, quais sejam elas, remotamente no campo.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, A. S.; SANTOS, E. C. Efeito da umidade e da temperatura do solo na emergência de plântulas de arroz. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, PR, v. 5, n. 1, p. 43-54, 1983.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SILVA, C. R.; COELHO, E. F. Monitoramento do teor de água no solo. *In*: AGUIAR NETTO, A.; BASTOS, E.A. (Ed.). **Princípios agronômicos da irrigação**. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 262 p.
- ANDRADE, C. L. T.; BRITO, R. A. L. **Cultivo do milho: irrigação**. 2006. Embrapa Milho e Sorgo. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho_2ed/imeto dos.htm>. Acesso em: 15 out. 2012.
- ARAÚJO, A. E. de.; SILVA, C. A. D. da; AZEVEDO, D. M. P. de; FREIRE, E. C.; RAMALHO, F. de S.; ANDRADE, F. P.; FERREIRA, G. B.; SANTANA, J. C. F. de.; AMARAL, J. A. B. do.; MEDEIROS J. da C.; PEREIRA, J. R.; SILVA, K. L. da.; BARROS, M. A.L.; CARVALHO, M. da C. S.; SILVA e LUZ, M. J. da.; BELTRÃO, N. E. de M.; SUASSUNA, N. D.; FERREIRA, F. P.; SANTOS, R. F.; FONSECA, R. G. da; Cultivo do algodão irrigado. 2003. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Algodao/AlgodaoIrrigado/irrigacaomanejodeagua.htm>>. Acesso em: 20 out. 2011.
- ASSIS JÚNIOR, R. N.; REICHARDT, K. Determinação do potencial mátrico da água no solo por tensiômetro de câmara de ar. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 26, 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBCS, 1997. 1 CD-Rom.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 625p.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 4. ed. Viçosa: UFV Imprensa Universitária, 1995. 625p.
- BONIFÁCIO, T. G. **Implementação de um protocolo mesh multi-hop baseado em algoritmo de roteamento geográfico para redes de sensores sem fio**. 2010. 140 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- CALBO, A. G.; SILVA, W. L. C. Novo tensiômetro: rápido, contínuo e opera em tensões superiores a 100 kPa. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32º, Goiânia, 2003. **Anais...** Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2003.1 CD-ROM.
- CAMARGO, A. P.; CROHMAN, F.; CAMARGO, M. B. P. Tensiômetro simples de leitura direta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 12, p. 1736-1772, 1982.
- CARVALHO, D. F.; OLIVEIRA, L. F. C. **Planejamento e manejo da água na agricultura**. Viçosa: UFV, 2012. 239 p.
- CARVALHO, L.G. de; SAMPAIO, S.C.; SILVA, A.M. da. **Determinação da umidade na capacidade de campo in situ de um Latossolo Roxo distrófico**. Engenharia Rural, v.7, p.91-97, 1996.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa solos, 2006, 306 p.

FARIA, R. T.; COSTA, A. C. **Tensiômetro**: construção, instalação e utilização. Londrina: IAPAR, 1987. 22 p. (IAPAR. Circular, 56).

FASTTECH. **FC-28 soil humidity detection sensor module**. Disponível em: <<https://www.fasttech.com/product/1380900-fc-28-soil-humidity-detection-sensor-module>>. Acesso em: 20 fev. 2016.

FIGUEREDO, S.F. **Estabelecimento do momento de irrigação com base na tensão da água no solo para a cultura do feijoeiro**. 1998. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo.

FRIZZONE, J. A. **Métodos de irrigação**. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/disciplinas/Frizzone/LEB_1571/Texto%20complementar-Metodos%20de%20Irrigacao%202016.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2016.

FRIZZONE, J. A. **Necessidade de água para irrigação**. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/disciplinas/Frizzone/LEB_1571/TEXTO_COMPLEMENTAR_2_-_NECESSIDADE_DE_AGUA_PARA_IRRIGACAO.pdf>. Acesso em: 26 Mai. 2017.

GOOGLE EARTH. <http://www.google.com.br/maps/@-24.8997801,-53.5329861,18.25z>>. Acesso em: 20 Abr, 2014.

HENDRICKX, J. M. H.; NIEBER, J. L.; SICCANNA, P. D. Effect of tensiometer cup size on field soil water tension variability. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 58, n. 2, p. 309-315, 1994.

HUBBELL, J. M.; SISSON, J. B. Advanced tensiometer for shallow or deep soil water potential measurements. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 163, p. 271-77. 1998.

LUCAS, J. F. R.; TAVARES, M. H. F.; CARDOSO, D. L. CÁSSARO, A. M. Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro. **Rev. Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 1957-1973, dez. 2011.

MARQUELLI, W. A.; LOPES, C. A.; SILVA, W. L. C. Incidência de murcha-bacteriana em tomate para processamento industrial sob irrigação por gotejamento e aspersão. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.23, n.2, p.320-323, abr-jun 2005.

MARTHALER, H. P.; VOGELSANGER, W.; RICHARD, F.; WIERENGA, P. J. A pressure transducer for field tensiometers. **Soil Science Society American Journal**, v. 47, p. 624-627, 1983.

MARTIN, D. L.; GILLEY, J. R.; SKAGGS, R. W. **Soil Water Balance and Management**. In: FOLLETT, R. F. KEENEY, D. R.; CRUSE, R. M. (eds.). *Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability*, SSSA. Madison, p. 199-235, 1991.

MAXIM INTEGRATED. **Programmable resolution 1-wire digital thermometer**. DS18B20. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2016.

MILANI, D. I. C.; TAVARES, M. H. F.; SCHERPINSKI, C. Calibração de sondas TDR em condições de laboratório. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 3, n. 1, p. 68-75, 2008.

MIRANDA, J. H.; GONÇALVES, A. C.; CARVALHO, D. F. Água e Solo. *In*: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2001, p. 1-62.

MOHANKUMAR, D. **Schematic of the solar charger circuit**. Disponível em: <<http://www.electroschematics.com/4746/solar-charger-circuit/>>. Acesso em: 10 fev. 2016.

MOTOROLA. **Integrated silicon pressure sensor on-chip signal conditioned, temperature compensated and calibrated**. Disponível em: <<http://www.kosmodrom.com.ua/pdf/MPX5500.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

NASCIMENTO, E. C. L. **Um fotômetro microcontrolado LED-NIR, portátil e de baixo custo para análise screening de gasolinas tipo C**. 2008. 92 f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2008.

NYHAN, J. W.; DRENNON, B.J. Tensiometer data acquisition system for hydrologic studies requiring high temporal resolution. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.54, p.293-96. 1990.

OWEN, P.C. **The effects of temperature on the growth and development of rice**. Field Crop. Abstr., 24(1):1-8, 1971.

PACHECO, F. P. **Água residuária de suinocultura aplicada em cobertura na cultura do milho com cultivo sequencial de aveia preta**. 2012. 67 f. dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2012.

PEDROSO, B.A. **Condições climáticas para cultivar arroz: temperatura**. Lavoura Arrozeira, v.33, n.320, p.6-8, 1980.

QUEIROZ, T. M. **Desenvolvimento de um sistema automático para irrigação de precisão em pivô central**. 2007. 141 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2007.

RANEY, F. C.; Y. MIHARA. Water and soil temperature. **Amer. Sec. Agron. Agron.** v. 11, p. 1024-1036. 1967.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n. 2, p. 211-216, maio/ago. 1988.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera**. Conceitos, processos e aplicações. Barueri: Manole, 2004. 478 p.

SCALOPPI, E. J. Características dos principais sistemas de irrigação. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 25, p. 22-27, 1986.

SENSIRION. **Humidity and temperature sensor IC**. Disponível em: <https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/2_Humidity_Sensors/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT20_Datasheet_V4.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2017.

SILVA, W. R.; MARCOS FILHO, J. Avaliação da embebição e do desenvolvimento inicial das estruturas embrionárias de sementes de milho submetidas a diferentes potenciais hídricos. **Anais da escola superior de agricultura “Luiz de Queiroz”**, Piracicaba – SP, 1990. p. 335-359.

SOILMOISTURE EQUIPMENT CORPORATION. **Trase operating instructions**. Santa Barbara, 1998, 119 p.

STANSEL, J. W. Effective utilization of sunlight. *In: Six decades of rice research in Texas*. Beaumont: Texas Agricultural Experiment Station, 1975. p. 43-50.

TEIXEIRA, A. S.; COELHO, S. L. Desenvolvimento e calibração de um tensiômetro eletrônico de leitura automática. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 367-376, 2005.

TEXAS INSTRUMENTS. **Single chip very low power RF transceiver**. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1000.pdf>>. Acesso em: 26 mai. 2017.

THIEL, T.J. **Electrical water pressure transducers for field and laboratory use**. Soil Science Society of American Journal, Madison, v.27, n.5, p.601-2, 1963.

TOMMASELLI, J. T. G. **Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um equipamento de TDR (Time-Domain Reflectometry)**. Piracicaba : Esalq, 1997. 109 p. Tese de Doutorado.

TOPP, G. C.; FERRÉ, P. A. The soil solution phase. *In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (eds.). Methods of soil analysis*. Wisconsin: Soil Science Society of America, 2002. p. 417-1071.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.

VASCONCELOS, Daniel. **Sistema de monitoramento de temperatura através da rede elétrica**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABvnsAK/sistema-monitoramento-temperatura-atraves-rede-eletrica?part=3>> Acesso em: 26 mai. 2017.

VILLA NOVA, M. S.; VILLA NOVA, N. A.; OLIVEIRA, A. S.; REICHARDT, K. Performance and test of a direct reading "Air pocket" tensiometer. **Soil Technology**, Cremlingen, v. 5, p. 283-287, 1992.

APÊNDICES

**APÊNDICE A VALORES DA CONSTANTE DIELÉTRICA (KA) E DA UMIDADE (U) NA
TDR NOS 20 RECIPIENTES**

As leituras dos valores da constante dielétrica (Ka) e da umidade (U) na TDR nos 20 recipientes estão registradas na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 Valores médios medidos pela TDR, constante dielétrica ka e umidade volumétrica UTDR

Recipiente	TDR	
	ka	U _{TDR} %
1	9,2	18,3
2	8,4	16,4
3	8,9	17,5
4	9,6	19,2
5	9,2	18,3
6	11,6	22,8
7	12,4	24,3
8	12,5	24,6
9	12,8	25
10	13	25,2
11	13,8	26,1
12	15,2	27,6
13	17	29,6
14	19,8	33,1
15	19,6	32,9
16	21,5	35,3
17	20,8	34,5
18	20,7	34,3
19	28,5	45,6
20	28,5	45,6

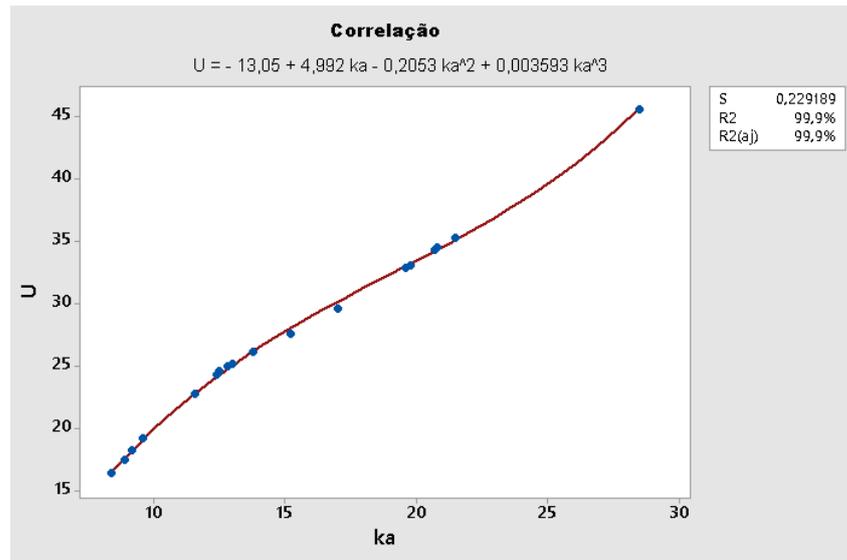


Figura 1 Correlação entre a umidade volumétrica U e a constante dielétrica ka medida pela TDR.

A equação de regressão é:

$$U = - 13,05 + 4,992 ka - 0,2053 ka^2 + 0,003593 ka^3$$

$$S = 0,229189 \quad R^2 = 99,9\% \quad R^2_{\text{ajustado}} = 99,9\%$$

Análise de variância

	GL	SQ	QM	F	P
Regressão	3	1389,10	463,033	8815,06	0,000
Erro	16	0,84	0,053		
Total	19	1389,94			

Análise de variância sequencial

	GL	SQ	F	P
Linear	1	1379,27	2327,74	0,000
Quadrático	1	1,00	1,76	0,203
Cúbico	1	8,83	168,03	0,000

Tabela 2 Umidade gravimétrica medida em estufa e Umidade volumétrica medida pela TDR

Recipiente	Estufa x TDR	
	U _{Estufa} %	U _{TDR} %
1	24,9	18,3
2	26,3	16,4
3	27,8	17,5
4	29,2	19,2
5	30,5	18,3
6	31,8	22,8
7	33,5	24,3
8	34,7	24,6
9	36,1	25
10	37,3	25,2
11	39	26,1
12	40,2	27,6
13	41,7	29,6
14	43,1	33,1
15	44,5	32,9
16	45,9	35,3
17	47,2	34,5
18	48,7	34,3
19	50,1	45,6
20	51,5	45,6

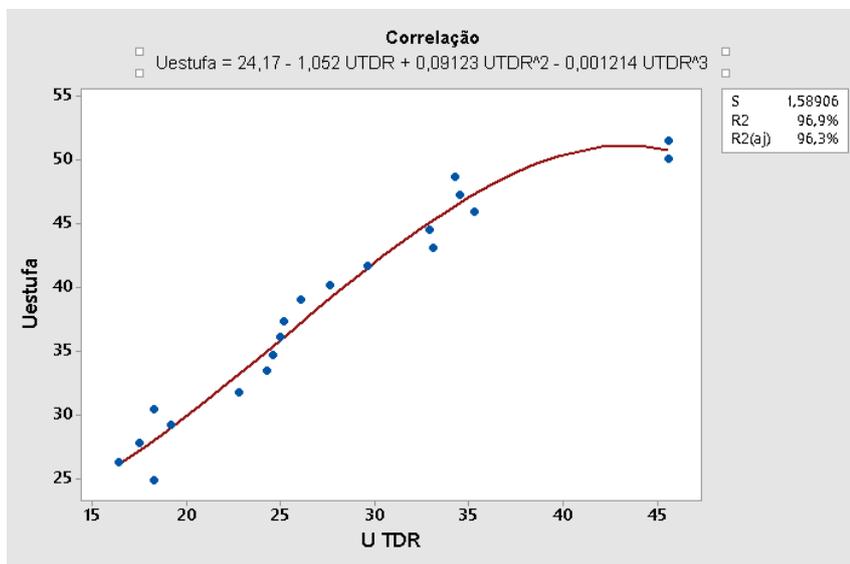


Figura 2 Correlação entre a umidade volumétrica U_{TDR} e a U_{estufa} gravimétrica medida na estufa.

A equação de regressão é:

$$U_{estufa} = 24,17 - 1,052 U_{TDR} + 0,09123 U_{TDR}^2 - 0,001214 U_{TDR}^3$$

$$S = 1,58906 \quad R^2 = 96,9\% \quad R^2_{ajustado} = 96,3\%$$

Análise de variância

	GL	SQ	QM	F	P
Regressão	3	1256,70	418,899	165,89	0,000
Erro	16	40,40	2,525		
Total	19	1297,10			

Análise de variância sequencial

	GL	SQ	F	P
Linear	1	1188,08	196,15	0,000
Quadrático	1	59,92	20,75	0,000
Cúbico	1	8,70	3,45	0,082

Tabela 3 Umidade gravimétrica medida em estufa e umidade relativa medida pelo sensor DHT22-1

Recipiente	Estufa x DHT22-1	
	U _{Estufa} %	U _{DHT22-1} %
1	24,9	70,8
2	26,3	72,35
3	27,8	75,15
4	29,2	79,3
5	30,5	83,4
6	31,8	92
7	33,5	93,5
8	34,7	94,5
9	36,1	96,23
10	37,3	97,3
11	39	98,1
12	40,2	99,9
13	41,7	99,9
14	43,1	99,9
15	44,5	99,9
16	45,9	99,9
17	47,2	99,9
18	48,7	99,9
19	50,1	99,9
20	51,5	99,9

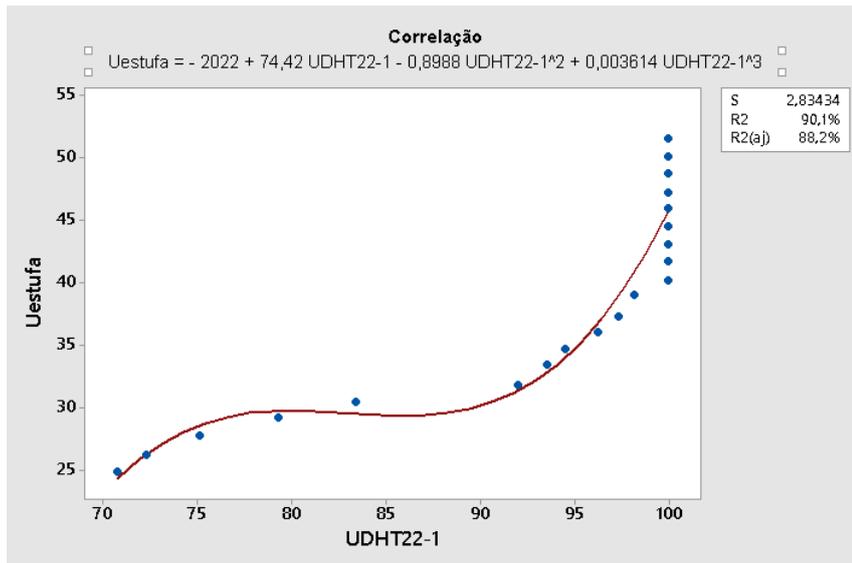


Figura 3 Correlação entre a umidade volumétrica $U_{DHT22-1}$ e a U_{estufa} gravimétrica medida na estufa.

A equação de regressão é:

$$U_{estufa} = - 2022 + 74,42 U_{DHT22-1} - 0,8988 U_{DHT22-1}^2 + 0,003614 U_{DHT22-1}^3$$

$$S = 2,83434 \quad R^2 = 90,1\% \quad R^2_{ajustado} = 88,2\%$$

Análise de variância

	GL	SQ	QM	F	P
Regressão	3	1168,56	389,521	48,49	0,000
Erro	16	128,54	8,034		
Total	19	1297,10			

Análise de variância sequencial

	GL	SQ	F	P
Linear	1	969,446	53,26	0,000
Quadrático	1	126,298	10,66	0,005
Cúbico	1	72,820	9,06	0,008

Tabela 4 Umidade gravimétrica medida em estufa e Umidade relativa medida pelo sensor DHT22-2

Recipiente	Estufa x DHT22-2	
	U _{Estufa} %	U _{DHT22-2} %
1	24,9	74,2
2	26,3	75,12
3	27,8	75,19
4	29,2	77,58
5	30,5	84,3
6	31,8	87,9
7	33,5	91,46
8	34,7	93,6
9	36,1	95
10	37,3	95,7
11	39	96,3
12	40,2	98,7
13	41,7	99,9
14	43,1	99,9
15	44,5	99,9
16	45,9	99,9
17	47,2	99,9
18	48,7	99,9
19	50,1	99,9
20	51,5	99,9

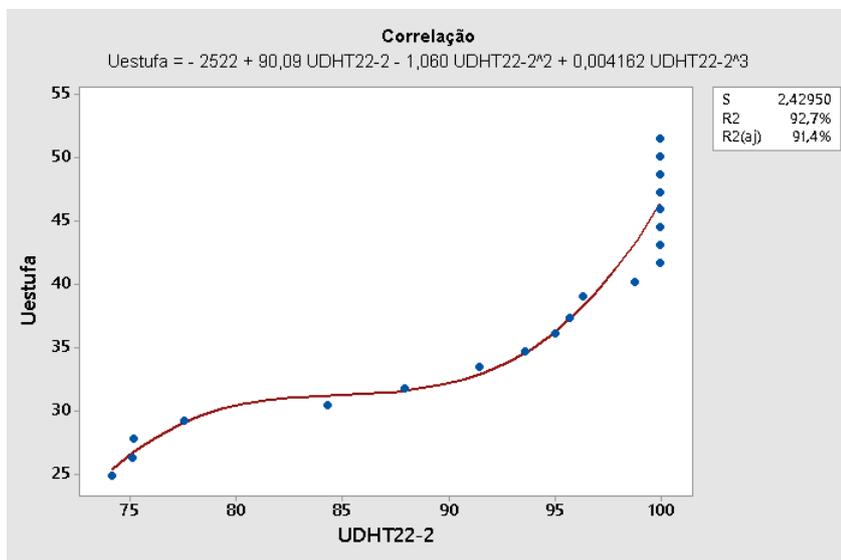


Figura 4 Correlação entre a umidade volumétrica $U_{DHT22-2}$ e a U_{estufa} gravimétrica medida na estufa.

A equação de regressão é:

$$U_{estufa} = - 2522 + 90,09 U_{DHT22-2} - 1,060 U_{DHT22-2}^2 + 0,004162 U_{DHT22-2}^3$$

$$S = 2,42950 \quad R^2 = 92,7\% \quad R^2_{ajustado} = 91,4\%$$

Análise de variância

	GL	SQ	QM	F	P
Regressão	3	1202,66	400,887	67,92	0,000
Erro	16	94,44	5,902		
Total	19	1297,10			

Análise de Variância Sequencial

	GL	SQ	F	P
Linear	1	1056,57	79,07	0,000
Quadrático	1	109,43	14,19	0,002
Cúbico	1	36,67	6,21	0,024

Tabela 5 Umidade gravimétrica medida em estufa e umidade relativa medida pelo sensor SHT20

Recipiente	Estufa x SHT20	
	U _{Estufa} %	U _{SHT20} %
1	24,9	75,79
2	26,3	76,8
3	27,8	77
4	29,2	78,5
5	30,5	81
6	31,8	83,5
7	33,5	84,8
8	34,7	85,2
9	36,1	87,3
10	37,3	89,7
11	39	91,6
12	40,2	93,1
13	41,7	92
14	43,1	94,5
15	44,5	95,6
16	45,9	96,5
17	47,2	92,3
18	48,7	93,5
19	50,1	94
20	51,5	94,97

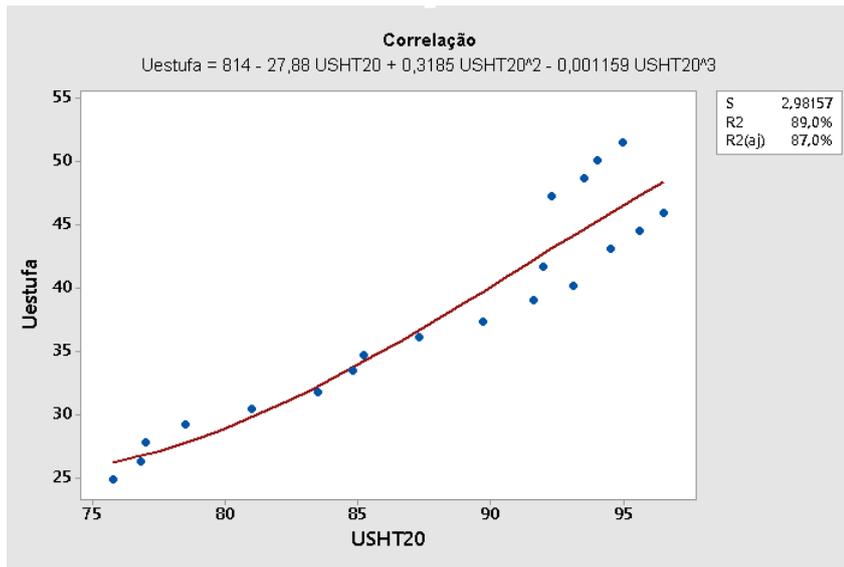


Figura 5 Correlação entre a umidade volumétrica U_{SHT20} e a U_{estufa} gravimétrica medida na estufa.

A equação de regressão é:

$$U_{estufa} = 814 - 27,88 U_{SHT20} + 0,3185 U_{SHT20}^2 - 0,001159 U_{SHT20}^3$$

$$S = 2,98157 \quad R^2 = 89,0\% \quad R^2_{ajustado} = 87,0\%$$

Análise de variância

	GL	SQ	QM	F	P
Regressão	3	1154,86	384,955	43,30	0,000
Erro	16	142,24	8,890		
Total	19	1297,10			

Análise de variância sequencial

	GL	SQ	F	P
Linear	1	1145,45	135,96	0,000
Quadrático	1	8,54	1,01	0,328
Cúbico	1	0,87	0,10	0,758

Tabela 6 Umidade gravimétrica medida em estufa e Umidade medida com o sensor FC-28.

Recipiente	Estufa x FC-28	
	U _{Estufa} %	U _{FC-28} %
1	24,9	0,58
2	26,3	1,75
3	27,8	11,33
4	29,2	16,32
5	30,5	17,59
6	31,8	28,83
7	33,5	30,98
8	34,7	42,42
9	36,1	41,64
10	37,3	40,86
11	39	50,24
12	40,2	58,65
13	41,7	59,13
14	43,1	62,36
15	44,5	63,04
16	45,9	65,39
17	47,2	70,47
18	48,7	75,07
19	50,1	85,14
20	51,5	96,87

O sensor FC-28 fornece um valor de tensão inversamente proporcional a umidade do solo, quanto menor a tensão maior o valor da umidade do solo. A tensão máxima obtida pelo Arduino no nó sensor, transformada por um conversor Analógico Digital é 1024. Aplica-se então no *software* do nó sensor uma regra de três inversa para assim determinar os valores da umidade, como as apresentadas na Tabela 6.

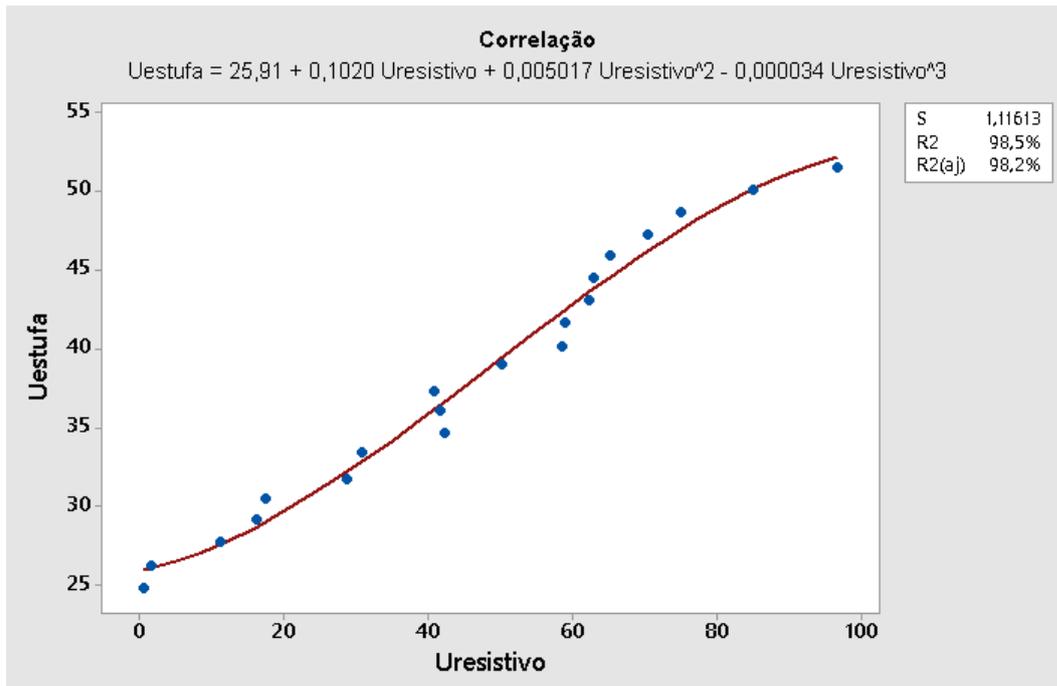


Figura 6 Correlação entre a umidade volumétrica $U_{resistivo}$ e a U_{estufa} gravimétrica medida na estufa.

A equação de regressão é:

$$U_{estufa} = 25,91 + 0,1020 U_{resistivo} + 0,005017 U_{resistivo}^2 - 0,000034 U_{resistivo}^3$$

$$S = 1,11613 \quad R^2 = 98,5\% \quad R^2_{ajustado} = 98,2\%$$

Análise de variância

	GL	SQ	QM	F	P
Regressão	3	1277,17	425,723	341,74	0,000
Erro	16	19,93	1,246		
Total	19	1297,10			

Análise de variância sequencial

	GL	SQ	F	P
Linear	1	1267,62	774,02	0,000
Quadrático	1	0,20	0,11	0,739
Cúbico	1	9,35	7,51	0,015