

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**ARTUR BONINI DO PRADO**

**PROPOSTA DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS PARA  
SUPORTE À IRRIGAÇÃO**

Ilha Solteira  
2019



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Ilha Solteira

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E REGULACÃO DE  
RECURSOS HÍDRICOS**

**ARTUR BONINI DO PRADO**

**PROPOSTA DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS PARA  
SUPORTE À IRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para o Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - PROF-ÁGUA.

Área de concentração:

**Instrumentos da Política de Recursos Hídricos**

Orientador:

**Prof. Dr. Fernando Braz Tangerino Hernandez**

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P896p Prado, Artur Bonini do.  
Proposta de sistema de aquisição e transmissão de dados para suporte à irrigação / Artur Bonini do Prado. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019  
61 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos, 2019

Orientador: Fernando Braz Tangerino Hernandez  
Inclui bibliografia

1. Agricultura irrigada. 2. Monitoramento climático. 3. Uso da água. 4. Uso da água. 5. IoT. 6. Agricultura 4.0.

*Raiane da Silva Santos*  
Raiane da Silva Santos

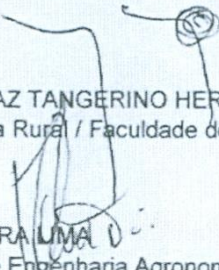
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** PROPOSTA DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS PARA SUPORTE À IRRIGAÇÃO


**AUTOR:** ARTUR BONINI DO PRADO

**ORIENTADOR:** FERNANDO BRAZ TANGERINO HERNANDEZ

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS, área: Regulação e Governança de Recursos Hídricos pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. FERNANDO BRAZ TANGERINO HERNANDEZ  
Fitossanidade, Engenharia Rural / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - SP

  
Prof. Dr. RONALDO CINTRA LIMA  
Coordenação de Curso de Engenharia Agrônoma / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas de Dracena

  
Prof. Dr. RICARDO GAVA  
Agronomia / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campus de Chapadão do Sul - CPCS

Ilha Solteira, 28 de fevereiro de 2019

Dedico este trabalho às pessoas que  
contribuíram e participaram desta  
etapa de minha vida, tornando-a  
completa e plena.

## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

Agradecimentos ao CNPq pelo apoio financeiro a presente pesquisa junto ao projeto CNPq - 424755/2016-5.

Agradeço ao Professor Dr. Fernando Braz Tangerino Hernandez pela dedicação em me orientar nesta pós-graduação.

Agradeço a toda Equipe da Área de Hidráulica e Irrigação da UNESP Ilha Solteira.

À UNESP FCAT campus Dracena e ao grupo de trabalho GEDEM, liderado pelo Professor Dr. Ronaldo Cintra Lima, pela oportunidade em participar no desenvolvimento do projeto CNPq - 424755/2016-5.

Agradeço por todo amor e carinho que recebo de meus familiares.

“É preciso amar as pessoas  
como se não houvesse  
amanhã”.  
(RUSSO; RENATO, 1992).

## RESUMO

A água é um recurso essencial para a agricultura. Sua gestão passa por práticas que definem a quantidade e qualidade disponível para diversos usuários comuns, como indústria e consumo humano. O volume de água utilizado para a irrigação deve passar por um processo de otimização em seu uso, avaliando as variáveis necessárias para a maximização da produtividade e controle dos custos. O monitoramento ambiental e das condições climáticas possibilitam prever o comportamento do ciclo hidrológico e planejar o uso da água na irrigação conforme a necessidade das culturas e o estoque disponível no solo. O adequado monitoramento do armazenamento de água no solo se constitui em uma boa prática na irrigação que garante alta produtividade das lavouras e colabora com o uso consciente da água, além de proporcionar resultados financeiros positivos, tanto no aumento da produtividade, como na economia de energia usada no bombeamento da água, além da preservação ambiental e dos recursos hídricos. A expansão da agricultura irrigada é um importante vetor de crescimento social e econômico, podendo ser a locomotiva para um futuro sustentável de uma região.

O objetivo deste trabalho é construir um sistema de aquisição de dados para medição da umidade do solo, disponibilizando uma base de dados histórica, a custos reduzidos, para que o usuário acompanhe a variação dos dados e estime a quantidade de água a ser utilizada na agricultura.

**Palavras-chave:** Agricultura irrigada. Monitoramento climático. Uso da água. IoT. Agricultura 4.0.

## **ABSTRACT**

Water is an essential resource for agriculture. Its management goes through good practices to determine the available amount for several users, such industry and human consumption. The water content used for irrigation should go through an optimization process, evaluating the necessary variables to maximize productivity and expenses control. The environment monitoring and climate conditions enable to forecast the hydrological period and the irrigation water consumption according to crop needs and available water inventory. The suitable monitoring of soil water content becomes an irrigation good practice which enables crops high productivity and collaborates to conscious water application, apart from affording positive financial yield, in productivity growth as well as in sparing energy on water pumping, besides conservation of the environment and water resources. The expansion of irrigated agriculture is an important vector of social and economic growth, and it can be the locomotive for a sustainable future of a region.

The objective of this work is to build a data acquisition system for soil moisture measurement, providing a historical database, at reduced costs, so that the user follows the variation of the data and estimates the amount of water to be used in agriculture.

**Keywords:** Data acquisition. Water monitoring. Water resources. IoT. Agriculture 4.0.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sensor de Temperatura do Ar.....	23
Figura 2 – Sensor de Umidade do Ar.....	23
Figura 3 – Sensor de Umidade do Solo.....	24
Figura 4 – Microcontrolador Phoenix Contact.....	25
Figura 5 – Entrada Analógica Phoenix Contact IB IL 4/I/4-20-ECO.....	25
Figura 6 – Sistema Fotovoltáico.....	26
Figura 7 – Fluxograma Estação Aquisição de Dados.....	27
Figura 8 – Esquema Elétrico Sensor Umidade do Solo.....	29
Figura 9 – Conversor 0..5V para 4..20mA.....	30
Figura 10 – Fixação Mecânica Componentes do Sensor de Umidade do Solo.....	30
Figura 11 – Cabo Padrão CAT5.....	31
Figura 12 – Conexão Elétrica do Sensor de Umidade do Solo.....	31
Figura 13 – Sensores de Umidade.....	32
Figura 14 – Ligações Elétricas Sensor Umidade do Solo.....	32
Figura 15 – Placa de Montagem do Painel Elétrico.....	33
Figura 16 – Borne Elétrico de Passagem PT2,5.....	34
Figura 17 – Placa de Montagem do Painel Elétrico com Fiação Aparente.....	34
Figura 18 – Conexão Elétrica entre Painel e Sensor.....	35
Figura 19 – Painel Elétrico Montado.....	35
Figura 20 – Sensor de Temperatura e Umidade Relativa do Ar.....	36
Figura 21 – Coleta de Dados.....	37
Figura 22 – Transmissão de Dados e Emissão de Relatórios.....	37
Figura 23 – Sistema Fotovoltáico.....	39
Figura 24 – Antena de Internet.....	39
Figura 25 – Método de pesagem (amostra saturada).....	39
Figura 26 – Método de Pesagem por diferenças sequenciais diárias.....	40
Figura 27 – Estufa de Secagem de Ar Forçado.....	43
Figura 28 – Curva de regressão ajustada para estimação da Umidade do solo – U(%) – a partir dos dados corrente elétrica (X).....	45
Figura 29 – Sensor de umidade no solo seco.....	46
Figura 30 – Sensor de umidade de solo instalado na cultura do Capim Mombaça.....	47

Figura 31 – Parcela com sensores de umidade de solo instalados a 10 e 20 cm de profundidade .....	48
Figura 32 – Vista do direcionamento do cabeamento dos sensores de umidade de solo nas parcelas .....	48
Figura 33 – Umidade do solo (%) - sensor 1B.....	51
Figura 34 – Umidade do solo (%) - sensor 2B.....	52
Figura 35 – Umidade do solo (%) - sensor 3B.....	52
Figura 36 – Umidade do solo (%) - sensor 4B.....	53
Figura 37 – Umidade do solo (%) - sensor 5B.....	53
Figura 38 – Umidade do solo (%) - sensor 6B.....	54
Figura 39 – Umidade do solo (%) - sensor 7B.....	54
Figura 40 – Umidade do solo (%) - sensor 8B.....	55
Figura 41 – Umidade do solo (%) - média sensores 1B a 8B.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados utilizados para ajuste da curva padrão.....	44
Tabela 2 – Leituras dos Sensores no Capim Mombaça.....	50

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ANA - Agência Nacional de Águas

UNESP - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

FCAT – Faculdade de Ciência Agrárias e Tecnológicas

GEDEM – Grupo de Estudos de Desenvolvimento de Estações Meteorológicas

IoT – Internet of Things

mA – miliampere

mV - milivolt

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	16
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	17
<b>3.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	17
<b>3.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	17
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
4.1	RECURSOS HÍDRICOS.....	18
4.2	CLÍMA E O SOLO .....	19
<b>4.2.1</b>	<b>Temperatura do ar</b> .....	20
<b>4.2.2</b>	<b>Umidade do solo</b> .....	20
<b>4.2.3</b>	<b>Umidade relativa do ar</b> .....	21
4.3	ESTAÇÃO AQUISIÇÃO DE DADOS.....	22
4.4	SENSORES.....	22
<b>4.4.1</b>	<b>Sensores de temperatura do ar</b> .....	23
<b>4.4.2</b>	<b>Sensores de umidade relativa do ar</b> .....	23
<b>4.4.3</b>	<b>Sensores de umidade do solo</b> .....	24
4.5	MICROCONTROLADORES.....	24
4.6	SISTEMA FOTOVOLTÁICO.....	25
<b>5</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	27
5.1	LOCAL DO EXPERIMENTO .....	27
5.2	DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DA ESTAÇÃO DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	27
5.3	DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DOS SENSORES DE UMIDADE DO SOLO .....	28
5.4	DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DO PAINEL ELÉTRICO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	32
5.5	MONTAGEM DO SENSOR DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR .....	35
5.6	COLETA DE DADOS, TRANSMISSÃO DOS DADOS E GERAÇÃO FOTOVOLTAICA .....	36
5.7	AQUISIÇÃO DE DADOS PARA CALIBRAÇÃO DOS SENSORES .....	39

5.8	AJUSTE POR MEIO DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES .....	44
5.9	ETAPA DE EXPERIMENTAÇÃO EM CAMPO .....	46
5.9.1	<b>Instalação do sistema de aquisição de dados em uma cultura de Capim Mombaça .....</b>	<b>46</b>
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>
7	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de alimentos necessita de uma quantidade muito grande de água, para que o crescimento da produção agrícola seja saudável e apresente alto rendimento. Por isso, em geral, os cidadãos não visualizam a quantidade de água que está agregada aos produtos que são consumidos no dia a dia. Em 2014 a região sudeste do Brasil vivenciou a maior crise hídrica da história e apesar de termos uma das maiores reservas de água doce disponível no mundo, a gestão dos recursos hídricos foi muito precária. A agricultura representa o maior usuário do recurso chegando a influenciar no ciclo hidrológico nas regiões irrigadas, mas este fato não a torna responsável pela crise hídrica que no geral se mostrou pela falta de gestão e planejamento do uso da água disponível (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA, 2016).

Temos em nosso território grande potencial de irrigação por conta da vasta disponibilidade hídrica, entretanto o uso dessa água deve ser pensado e gerido a fim de garantir o crescimento da área irrigada nos locais apropriados, a conservação dos reservatórios naturais e a disponibilidade de água para os usos industriais, geração de energia elétrica, abastecimento público, etc. (ANA, 2016). O monitoramento ambiental e das condições climáticas possibilitam prever o comportamento do ciclo hidrológico e planejar o uso da água na irrigação conforme a necessidade das culturas e o estoque hídrico disponível.

As plantas possuem um sistema de produção e respiração muito dependente da água. A irrigação garante a alta produtividade das lavouras, e para fazer isso sem causar danos aos recursos hídricos, se deve fazer o manejo da irrigação através de dados históricos de Evapotranspiração (ETo), quantidade de água no solo e demais fatores que determinam a real necessidade de água para suprir as necessidades das culturas sem exageros nem deficit. A boa prática na irrigação garante alta produtividade das lavouras e colabora com o uso consciente da água, além de proporcionar resultados financeiros positivos, tanto no aumento da produtividade, como na economia de energia usada no bombeamento da água, além da preservação ambiental e dos recursos hídricos.

Por meio da medição de variáveis agrometeorológicas, realizadas pela estação automática de aquisição de dados, objetiva-se o planejamento no uso da água em culturas irrigadas com o intuito de otimizar a eficiência, a lucratividade e o

uso racional dos recursos hídricos. Além disso, as informações climáticas coletadas possibilitam o desenvolvimento de novas pesquisas, proporcionando dados em tempo real para infinitas aplicações que possam enfrentar as mudanças climáticas e os eventos extremos na região analisada. A medição histórica dessas variáveis climáticas se torna uma importante vantagem competitiva para o planejamento dos recursos hídricos e enfrentamento de desastres naturais. Com os dados coletados, o planejamento na utilização dos recursos hídricos possibilita atingir rendimento máximo nas áreas agriculturáveis com utilização mínima dos recursos hídricos necessários.

As estações de aquisição de dados agrometeorológicos existentes no mercado conseguem suprir as necessidades na aquisição das variáveis climáticas essenciais ao correto manejo na agricultura, porém a preços muito elevados para aplicações quando se necessita de um elevado número de sensores de umidade do solo, posicionados a longas distâncias do ponto de coleta dos dados.

Nesse sentido, este projeto tem o objetivo de desenvolver um equipamento para aquisição automática de dados de umidade do solo, por meio de sensores remotos de baixo custo, disponibilizando uma base de dados histórica, a custos reduzidos, para que o usuário acompanhe a variação dos dados e estime a quantidade de água a ser utilizada na agricultura.

## **2 JUSTIFICATIVA**

O grande avanço da microeletrônica tornou possível a medição automática de diversas variáveis em tempo real. A automação da aquisição de dados esta sendo largamente utilizada pela eficiência e padronização dos dados coletados, diminuindo erros provenientes de leituras manuais (CUNHA, 2004).

Nas estações de aquisição de dados os sensores funcionam emitindo sinais elétricos. Esses sinais elétricos são amostrados por um sistema automático de aquisição de dados para armazenamento e processamento (GALINA, 2004)

Portanto, uma estação de aquisição de dados a baixo custo se torna uma poderosa ferramenta que permite estimar variáveis importantes no controle do consumo de água em sistemas de produção agrícola, otimizando custos e ganhos financeiros.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GERAL**

Desenvolver um sistema de aquisição de dados, automático e de baixo custo, para a otimização de insumos, água e energia elétrica, na produção agrícola.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a. Definir as especificações do sistema de aquisição de dados
- b. Definir as especificações dos sensores
- c. Programar o sistema de aquisição de dados
- d. Testar o sistema de aquisição de dados

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse trabalho está relacionado a uma aplicação na área de agronomia e de meteorologia agrícola. São apresentados, a seguir, tópicos relacionados a recursos hídricos e agrometeorologia. Neste último, ressalta-se o desenvolvimento e a montagem de sensores relacionados à mensuração de variáveis climáticas e de umidade de solo para fins de manejo da irrigação.

### 4.1 RECURSOS HÍDRICOS

Conforme a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) Lei n.º 9433 de 8 de janeiro de 1997, a bacia hidrográfica é a unidade territorial para sua gestão. O Brasil é dividido em 12 regiões hidrográficas, como, bacia do Amazonas, Tocantins-Araguaia, São Francisco e Paraná que receberam os nomes de seus rios principais, esses por sua vez, se dividem em sub-bacias compostas por seus afluentes, que também, se dividem em outros milhares de afluentes formando sub-bacias de maior ordem, constituindo uma extensa e abundante rede hidrográfica, a maior do planeta. Também existem reservas subterrâneas, constituídas por aquíferos e lençóis freáticos. Dentre os aquíferos mais importantes estão o Alter do Chão na região norte, o Guarani abrangendo o centro oeste, sul, Paraguai e Argentina, Rio Hamza que se localiza totalmente na bacia do Amazonas, o aquífero Karst na região centro oeste e sul e o Tubarão no estado de São Paulo, além de outros, de menor área (ZOBY, 2008). Os aquíferos não estão obrigatoriamente ligados à área da Bacia hidrográfica, estima-se que a vazão média na rede hidrográfica brasileira seja de aproximadamente 5.676 km<sup>3</sup>/ano, valor correspondente a 12% da vazão média anual de todos os rios do mundo e a reserva de água subterrânea é de aproximadamente 112.000 km<sup>3</sup> (ZOBY, 2008).

Apesar da grande quantidade de água doce presente no Brasil, uma pequena parte está prontamente disponível para os usos (ANA, 2016). Ao mesmo tempo, as reservas de água não estão distribuídas uniformemente, a região norte concentra aproximadamente 78% da água do país com apenas 8,3% da população, já a região nordeste com 27,8% da população retém 3,3% da reserva de água (FOLEGATTI *et al.*, 2007).

Em média, circulam pelo território brasileiro 260.000 m<sup>3</sup>/s de água. Desse valor, 205.000 m<sup>3</sup>/s estão na bacia amazônica, e os 55.000 m<sup>3</sup>/s restantes circulam pelas outras bacias do território brasileiro (ANA, 2016).

Em todo o território brasileiro existe sazonalidade pluvial com estações secas e chuvosas, influenciando o regime dos rios durante o ano. Para minimizar o risco de racionamento de água em períodos secos é necessário utilizar reservatórios capazes de captar água nos períodos úmidos (ANA, 2016).

O regime fluvial sofre variações ao longo do ano que estão estreitamente relacionadas ao regime de precipitações. Na maior parte do Brasil existe uma sazonalidade bem marcada com estações secas e chuvosas bem definidas, de forma que ao final do período seco se pode observar vazões muito abaixo da vazão média e inclusive ausência de água. Essa variabilidade das chuvas e vazões também é interanual, gerada pela ocorrência de anos mais secos e outros mais úmidos. Para manter uma maior garantia de água ao longo do tempo é necessária a utilização de reservatórios ou açudes, capazes de reservar água nos períodos úmidos para ofertar nos períodos mais secos.

## 4.2 CLIMA E O SOLO

O monitoramento de grandezas do solo e do ar ganha importância na necessidade da agricultura em suprir alimentos à crescente população mundial (LEPSCH, 2002).

Os equipamentos de coleta de dados permitem converter para o mundo digital, de forma rápida e confiável, grandezas reais como temperatura, umidade, pressão, vazão, entre outras inúmeras variáveis do meio ambiente (BORGES, 2014).

De acordo com Tubelis e Nascimento (1980), a meteorologia “é um ramo da física que estuda fenômenos atmosféricos”. Para a agricultura, o uso de soluções automáticas de aquisição, transmissão e tratamento de dados possibilita a redução de tempo e custo para a geração de informações úteis, sobre o clima e o solo, de maneira confiável e segura.

As condições atmosféricas e do solo podem ser definidas por meio da medição de variáveis tais como: temperatura e umidade do ar, temperatura e umidade do solo, velocidade e direção do vento, precipitação, radiação solar, dentre outras.

### **4.2.1 Temperatura do Ar**

A temperatura atua nas condições de vida na terra e nas características do solo em todas as regiões do mundo e suas variações estão associados a maioria dos fenômenos meteorológicos (BLAIR, 1964)

A temperatura é a variável climática mais comum e mais importante, influenciando as pessoas diretamente em suas formas de vestir e de se comportar (BITSON, 2006). Conforme Prevedello (1996), para a agricultura a temperatura do solo é um das variáveis que mais influenciam o rendimento da produção agrícola. A definição de temperatura é especificada pelo movimento das moléculas, em termos da medida de energia cinética média das moléculas. Para a maioria das aplicações, a temperatura se define de forma relativa, medindo o grau de calor que um corpo possui (AYODE, 1988). Para uma aplicação prática, a temperatura de um corpo é medida se utilizando um termômetro (AYODE, 1988).

Para se exprimir a temperatura em valores numéricos se utilizam vários tipos de escala, sendo a Fahrenheit, a Celsius e Kelvin as mais comuns. A escala Fahrenheit é mais comumente utilizada nos Estados Unidos da América e na Inglaterra. Já a escala Kelvin é utilizada nos meios científicos (GRIMM, 2009).

Segundo Grimm (2009), a correta localização do instrumento de medição da temperatura deve seguir padrões para melhorar sua exatidão. Normalmente o termômetro é posicionado em local abrigado e com ventilação, a um metro acima do solo, com cobertura de grama na área, afastada de obstáculos como árvores e ou impedimentos à livre circulação do ar.

Para a medição da temperatura em estações de aquisição de dados são utilizados diversos tipos de sensores que através de uma medida elétrica a correlacionam a um valor de temperatura. Essa medida elétrica é armazenada em um computador onde é realizada a calibração do sensor e desenvolvida a aplicação que utilizará o histórico de medições (BITSON, 2006).

### **4.2.2 Umidade do Solo**

Segundo Caputo (1989), a umidade do solo ( $h\%$ ) é a relação, expressa na forma percentual, entre o peso da água contida em um volume de solo ( $P_a$ ) e o peso da parte sólida existente neste mesmo volume ( $P_s$ ), conforme fórmula abaixo:

$$h\% = \frac{P_a}{P_s} * 100$$

No laboratório, para a obtenção do teor de umidade do solo, é pesada uma amostra de solo em seu estado natural, posteriormente se realiza a secagem em estufa a 105°C e a amostra é novamente pesada. Assim, a diferença entre os pesos representará a umidade do solo (CAPUTO, 1989).

A variação de umidade de um solo para outro é grande e na natureza não existem solos com teor de umidade igual a zero. Tal situação só é obtida em laboratório (CAPUTO, 1989).

Veihmeyer e Hendrickson (1949, p. 30) definiram a capacidade de campo do solo como:

[...] a quantidade de água retida pelo solo depois que o excesso tenha drenado e a taxa de movimento descendente tenha decrescido acentuadamente o que ocorre, geralmente, dois a três dias depois de uma chuva ou irrigação em solos permeáveis de estrutura e textura uniforme.

A capacidade de campo é um processo dinâmico, não uma característica da matriz do solo, que depende de interesses específicos de cada situação (REICHARDT, 1988).

#### **4.2.3 Umidade relativa do ar**

Conforme Ayoade (1996), o vapor d'água representa 2% da massa total da atmosfera e 4% do seu volume, sendo o componente atmosférico mais importante para determinação do tempo e clima.

Tubelis (1992) define a umidade relativa do ar como a quantidade de água, na fase de vapor, existente na natureza. Suas fontes naturais são as superfícies de água, gelo e neve, a superfície do solo, além das superfícies vegetais e animais.

O desempenho de uma produção agrícola é afetado diretamente pelas alterações da umidade relativa do ar (RUFFATO, 2000).

A umidade do ar também influencia a disseminação de pragas e doenças, sendo causado na maioria dos casos por microrganismos (ALVES, 2006).

Para a medição da umidade relativa do ar se utiliza um psicrômetro, que é um instrumento constituído por dois termômetros comuns, um de bulbo seco de mercúrio e o outro de bulbo úmido. O termômetro de bulbo seco fica exposto ao ar e o de bulbo úmido é envolvido por um condão umedecido em água, a qual evapora, o que possibilita o cálculo da umidade relativa do ar pela diferença de temperatura (SILVA, 2000).

#### 4.3 ESTAÇÃO DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Uma estação de aquisição de dados é um sistema automatizado de medição que surgiu com o objetivo de suprir a necessidade de monitorar e controlar o funcionamento de um sistema físico de maneira rápida, confiável e sem a necessidade de um operador. Esse sistema permite a aquisição de dados de variáveis, possibilitando o monitoramento de tarefas repetitivas e respostas rápidas sobre as características do ambiente (SILVA, 2002). Esse tipo de estação de aquisição e transmissão de dados fornece informações relativas às variáveis meteorológicas e também as relativas às variáveis agrícolas (fenológicas). Segundo Dally (1993), a automação na aquisição dos dados gera avanços enormes, permitindo o acesso a informação em tempo real e a rápida tomada de decisão. Os dados obtidos são utilizados para prever exigências de água e o desenvolvimento de culturas (HAYHOE, 1987).

Segundo Zambalde (1991), existem vários exemplos de sistemas automatizados de aquisição de dados devido a diversidade de situações e climas, o que dificulta a padronização dos equipamentos de medição remota.

Para o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados é necessário a construção ou adaptação de sensores, definição da interface entre o computador e os sensores, tratamento dos sinais obtidos em campo, armazenamento das informações e transmissão dos dados para um computador onde serão gerados os relatórios (BRITO, 1997).

#### 4.4 SENSORES

Para a medição dos fenômenos naturais, podem ser utilizados sensores eletrônicos capazes de detectar suas variações e transformá-los em sinais elétricos que podem ser lidos pelo sistema de aquisição de dados automática (SILVA, 2000).

O uso de sensores possui características vantajosas quanto a portabilidade, facilidade de automação, miniaturização e baixo custo (LOWINSOHN, 2006).

#### **4.4.1 Sensores de Temperatura do Ar**

Para a medição de temperatura podemos destacar os termopares e os termoresistores como os mais utilizados. Segundo Pires (2006), os termopares são pares de fios de metais diferentes dispostos lado a lado. A variação de tensão com a diferença de temperatura entre os pares de fios, torna possível estabelecer uma relação de calibração para a medição da temperatura. Os termoresistores são sensores que apresentam uma variação de sua resistência elétrica com a temperatura (SILVA, 2000).

**Figura 1** – Sensor de Temperatura do Ar



Fonte: Próprio autor.

#### **4.4.2 Sensores de Umidade Relativa do Ar**

Os sensores eletrônicos para a medida da umidade relativa do ar são baseados em um princípio capacitivo (SILVA, 2000). Um pequeno capacitor tem o ar atmosférico como seu meio dielétrico e as variações na umidade do ar aumentam ou diminuem sua capacidade dielétrica, variando o sinal elétrico enviado ao computador.

**Figura 2** – Sensor de Umidade do Ar



Fonte: Próprio autor.

#### 4.4.3 Sensores de Umidade do Solo

O sensor de umidade do solo é um dispositivo eletrônico que mede a variação da tensão entre as hastes de uma sonda devido a presença de água no solo. Conforme ilustrado na figura 3, o sensor de umidade do solo possui uma sonda que detecta variações na quantidade de água no solo, possibilitando desenvolver uma curva de calibração para que as medidas elétricas sejam correlacionadas corretamente na aquisição de dados com medidas de umidade do solo.

Na sonda do sensor de umidade do solo é medida a condutividade elétrica entre as hastes da sonda. Quanto mais água houver no solo, maior será a condutividade elétrica entre as hastes do sensor (TOME, 1997).

**Figura 3** – Sensor de Umidade do Solo



Fonte: Próprio autor.

#### 4.5 MICROCONTROLADORES

Para realizar a tarefa de aquisição automática dos dados dos sensores é necessário a utilização de um microcontrolador. Segundo aponta Rebello (2004), o microcontrolador é capaz de processar várias informações em um curto espaço de tempo.

Devido a grande integração de vários componentes eletrônicos em um único chip, é possível achar uma infinidade de dispositivos que contém CPU, memória, pontos de entrada e saída de dados e periféricos de comunicação. Esses microcontroladores permitem também a adição de periféricos, aumentando suas funcionalidades (SOUZA, 2006).

**Figura 4** – Microcontrolador Phoenix Contact



Fonte: Próprio autor.

**Figura 5** – Entrada Analógica Phoenix Contact IB IL 4/I/4-20-ECO



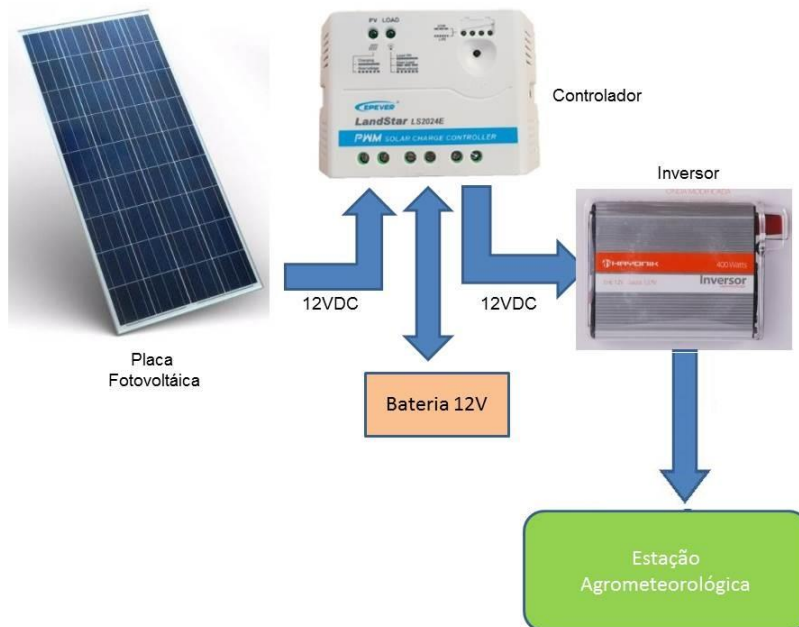
Fonte: Próprio autor.

#### 4.6 SISTEMA FOTOVOLTÁICO

Para suprir a energia necessária para o funcionamento do sistema de aquisição de dados, foi utilizado um sistema fotovoltaico. Esse sistema gera energia a partir da luz solar. Durante o período ensolarado do dia, o sistema gera energia suficiente para energizar o sistema de aquisição de dados e carregar a bateria, para que o sistema funcione durante o período sem luz solar.

As células solares de silício são atualmente a tecnologia com maior penetração no mercado. Apesar de outros materiais oferecerem eficiências maiores em relação ao silício, o processo de fabricação de células com filmes de silício cristalino é mais simples e barato (GUECHI, 2007).

**Figura 6 – Sistema Fotovoltaico**



Fonte: Próprio autor.

A incidência de luz nas células solares de silício libera portadores de carga que originam uma corrente elétrica. Basicamente, o efeito fotovoltaico consiste na absorção da radiação solar e a geração e transporte de portadores de carga elétrica na célula solar de silício (LASNIER, 1990).

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

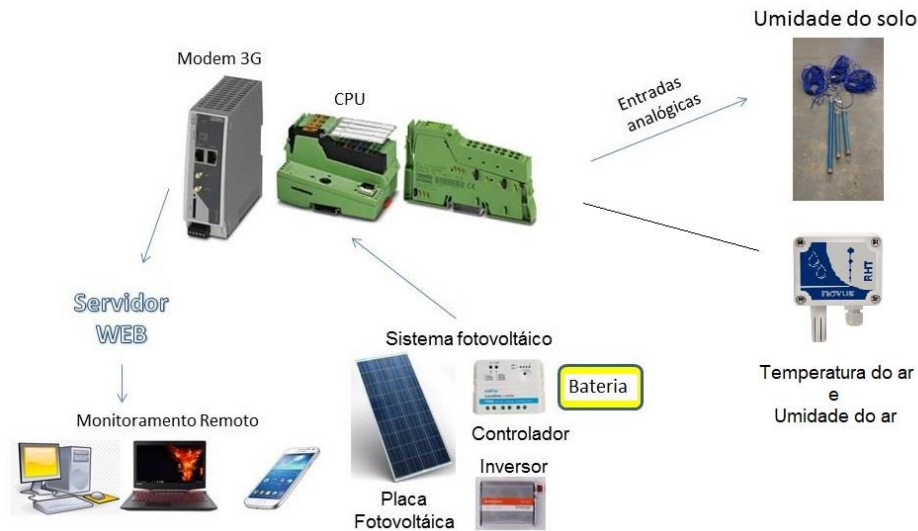
### 5.1 LOCAL DO EXPERIMENTO

Toda a fase de experimentação do projeto de pesquisa foi realizada no Campo Experimental de Agricultura Irrigada da Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas da UNESP, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus Dracena, coordenadas geográficas, 21°29’ de Latitude Sul e 51°52’ de Longitude Oeste e altitude média de 385 m.

### 5.2 DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DA ESTAÇÃO DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O projeto da estação de aquisição de dados é constituído por um microcontrolador para a leitura de sensores analógicos de umidade do solo e sensores de umidade relativa do ar e de temperatura do ar. A rotina pré-determinada de leitura dos sensores é armazenada na memória de trabalho do microcontrolador para que posteriormente essa leitura seja transmitida a um servidor remoto com o objetivo de disponibilizar dados para a geração de relatórios de otimização do uso da água na irrigação das culturas.

**Figura 7** – Fluxograma da Estação de Aquisição de Dados



Fonte: Próprio autor.

No projeto da estação de aquisição de dados foi utilizado o microcontrolador ILC 131 ETH, fabricado pela empresa Phoenix Contact. Este microcontrolador possui características de comunicação baseada em protocolos Ethernet, tais como: http, https, FTP, SNMP, SMTP, SQL, MySQL, DCP, etc., que facilitam sua integração em aplicações de coleta e transmissão de dados a um servidor central para a geração de relatórios ao usuário final.

A aquisição de dados dos sensores é realizada através de entradas analógicas. Na aquisição de dados, temos sensores dimensionados para a comunicação com o microcontrolador via loop de corrente, o que possibilita a instalação dos sensores a longas distâncias do microcontrolador. As longas distâncias no posicionamento dos sensores em relação ao microcontrolador não acarreta nenhuma perda de performance nos sinais medidos, tornando a comunicação imune a ruídos eletromagnéticos. O microcontrolador também possui 8 entradas digitais acopladas. As entradas analógicas são módulos acoplados ao microcontrolador, modelo IB IL AI 4/I/4-20-ECO.

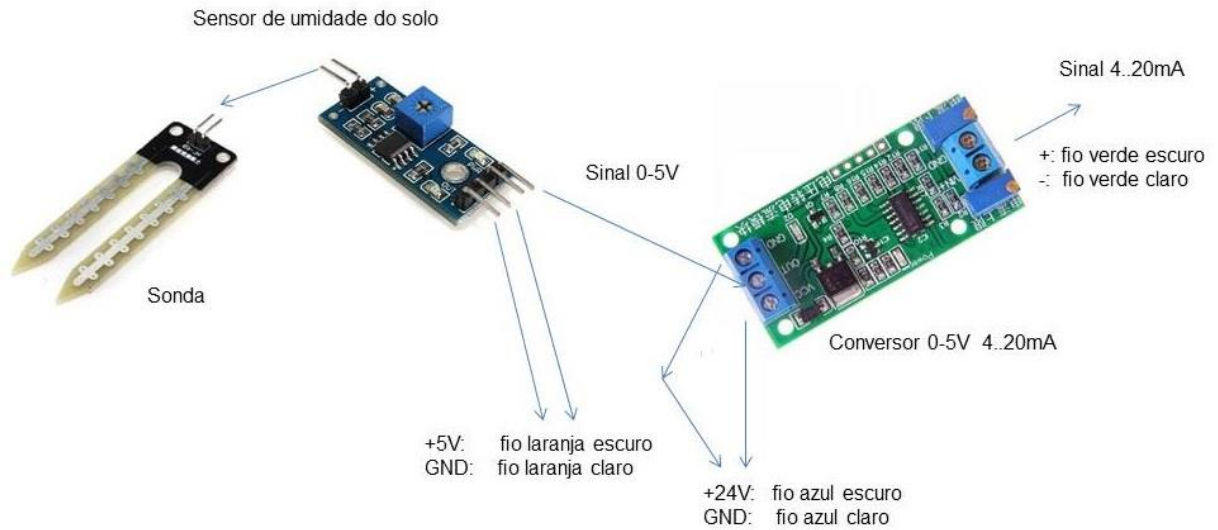
### 5.3 DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DOS SENSORES DE UMIDADE DO SOLO

A primeira fase consistiu na especificação da comunicação entre o sensor de umidade do solo e o microcontrolador, com a exigência da aplicação que os sensores pudessem ser instalados a distâncias superiores a 30 metros do microcontrolador. Devido a esse fato, foi definida a comunicação por loop de

corrente entre o sensor e o microcontrolador, que independe do comprimento do cabo do sensor, não sendo vulnerável a ruídos eletromagnéticos que poderiam interferir na leitura do sensor.

A sonda do sensor de umidade do solo disponibiliza um sinal analógico variando de 0 a 5V (tensão contínua).

**Figura 8** - Esquema elétrico do Sensor de Umidade do Solo

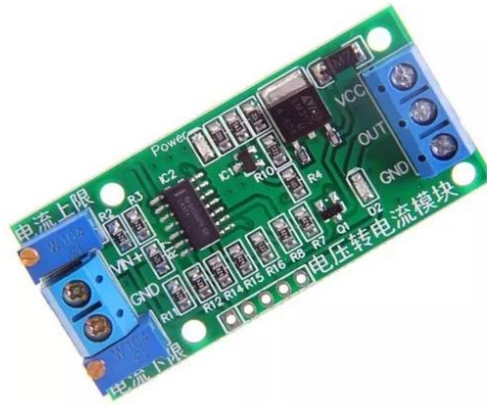


Fonte: Próprio autor.

O sensor de umidade do solo fornece um sinal analógico que varia de 0 a 5 Volts (tensão contínua), valor este que depende da quantidade água no solo no momento da leitura/aquisição. No módulo de controle do sensor de umidade do solo, foi conectada a saída analógica a um conversor de sinal que transforma um sinal de loop de tensão para um sinal em loop de corrente, com o intuito de manter a integridade e qualidade do sinal e permitir que não haja limitação no comprimento do cabo de interligação entre o sensor e o microcontrolador.

Na Figura 9 está apresentado o conversor de sinal empregado, responsável pela transformação do sinal do sensor de umidade. Essa conversão consiste em transformar um sinal de loop de tensão para um sinal em loop de corrente.

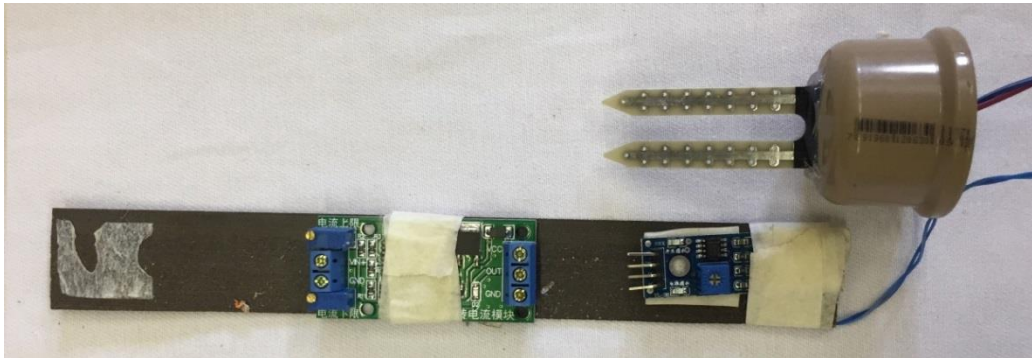
**Figura 9** – Conversor loop de tensão para loop de corrente



Fonte: Próprio autor.

Para a montagem mecânica do sensor e do conversor, foi utilizado como base uma placa de fórmica para permitir a fixação dos circuitos eletrônicos, Figura 10.

**Figura 10** – Fixação mecânica dos componentes do Sensor de Umidade do Solo



Fonte: Próprio autor.

Após a fixação mecânica dos circuitos eletrônicos, foi realizada conexão elétrica interna do sensor de umidade do solo por meio de um cabo de 8 vias padrão CAT5, (figura 11), também conhecido como cabo azul ETHERNET.

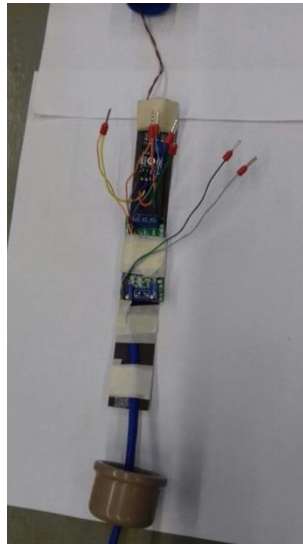
**Figura 11** – Cabo Padrão CAT5



Fonte: Próprio autor.

O sensor de umidade com suas conexões elétricas na figura 12.

**Figura 12** - Conexão elétrica do Sensor de Umidade do Solo



Fonte: Próprio autor.

O circuito elétrico do sensor de umidade foi acondicionado dentro de um tubo PVC com diâmetro de 32mm. Esta estrutura PVC é a base de fixação da sonda do sensor. Vide figura 13.

**Figura 13 - Sensores de Umidade**



Fonte: Próprio autor.

Para a conexão elétrica dos sensores de umidade do solo foi utilizada a simbologia descrita na figura 14.

**Figura 14 - Ligações elétricas do Sensor Umidade do Solo**

**Ligações Elétricas Sensor Umidade do Solo**



Fonte: Próprio autor.

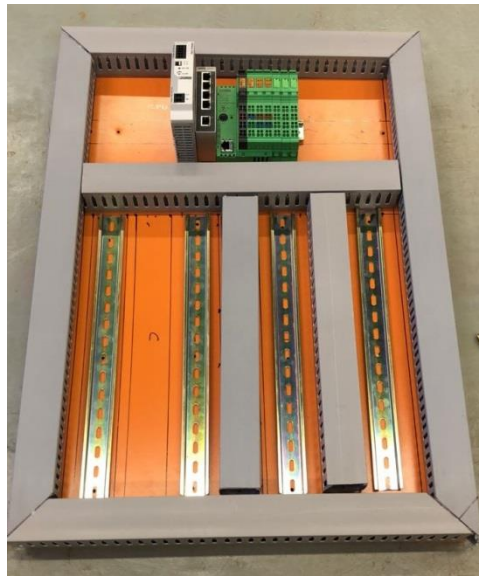
#### 5.4 DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DO PAINEL ELÉTRICO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A montagem do painel elétrico do sistema de aquisição de dados foi realizado junto com o grupo GEDEM, Grupo de Desenvolvimento de Estações Meteorológicas da Unesp Dracena.

Foi utilizado um painel elétrico de mercado para acondicionar o microcontrolador e as conexões elétricas dos sensores de umidade do solo, de umidade relativa do ar e temperatura do ar.

O painel elétrico apresenta as seguintes dimensões: 800 x 600 x 24 mm. A plataforma de fixação e montagem do sistema elétrico tem comprimento de 740 mm por 540 de largura, Figura 15.

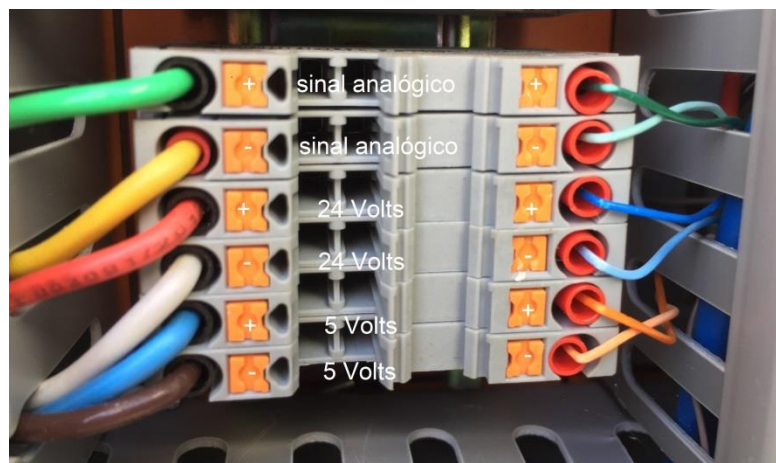
**Figura 15 - Placa de Montagem do Painel Elétrico**



Fonte: Próprio autor.

Para as conexões elétricas entre o painel e os sensores foi utilizado o borne PT 2,5 Phoenix Contact, devido a facilidade nas conexões, sem necessidade de parafusos de rosca para aperto/fixação, conforme figura 16.

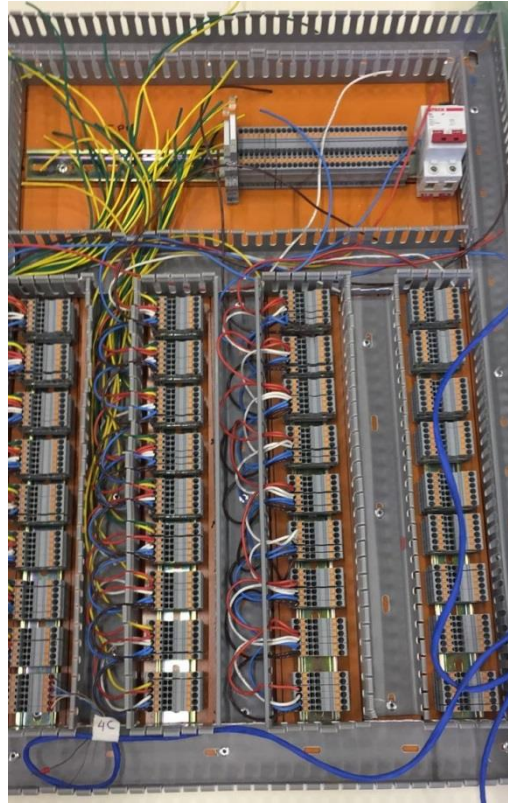
**Figura 16 - Borne Elétrico de Passagem PT 2,5**



Fonte: Próprio autor.

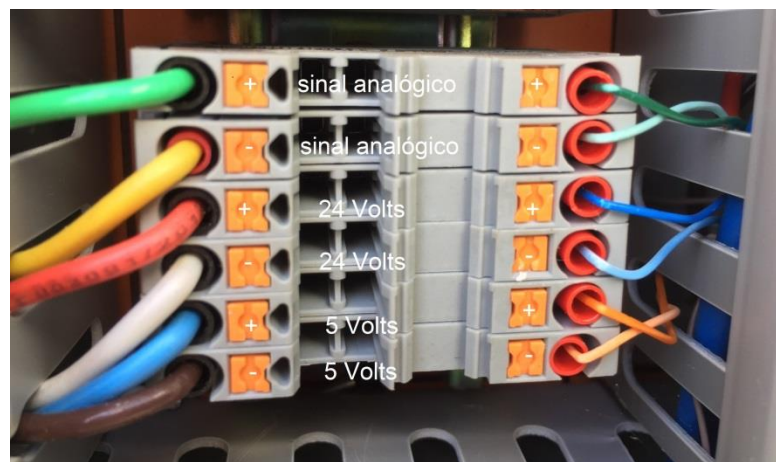
Abaixo na figura 17 o painel do sistema de aquisição de dados em sua fase de montagem.

**Figura 17 - Placa de Montagem do Painel Elétrico com Fiação Aparente**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 18 - Conexão Elétrica entre Painel e Sensor**



Fonte: Próprio autor.

Na figura 19 o painel do sistema de aquisição de dados com sua montagem mecânica e elétrica finalizada.

**Figura 19 - Painel Elétrico Montado**



Fonte: Próprio autor.

## 5.5 MONTAGEM DO SENSOR DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR

Foi utilizado o transmissor RHT-WM Novus que incorpora sensores de alta precisão e estabilidade para medição de umidade relativa e temperatura. Os valores medidos são convertidos em sinais de saída 4 a 20 mA linearmente relacionados a suas leituras.

O sensor de umidade relativa do ar tem faixa de medição entre 0 a 100 % RH e o sensor de temperatura do ar possui faixa de medição entre -40 e 120 °C.

**Figura 20** - Sensor de Temperatura e Umidade Relativa do Ar



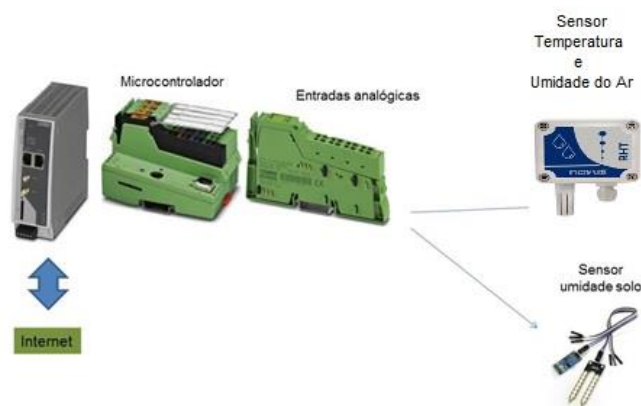
Fonte: Próprio autor.

## 5.6 COLETA DE DADOS, TRANSMISSÃO DOS DADOS E GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

A coleta de dados dos sensores de umidade do solo, temperatura do ar e umidade do ar são realizadas por meio de entradas analógicas 4.20mA controladas pela microcontrolador Phoenix Contact. Os dados coletados pelo microcontrolador serão transmitidos a um servidor de banco de dados via rede Ethernet, para serem utilizados por um software supervisor, onde são feitas as visualizações dos gráficos gerados pelo sistema.

O processo de coleta de dados está apresentado na Figura 21.

**Figura 21** - Coleta de Dados



Fonte: Próprio autor.

O processo de transmissão de dados está apresentado na Figura 22. No projeto do sistema de aquisição de dados, o servidor web e o servidor de banco de dados disponibilizam ao usuário final os gráficos gerados, oriundos dos dados de umidade do solo (%) coletados dos sensores.

**Figura 22** - Transmissão de dados e emissão de relatório de dados gerados pela Estação de Aquisição de Dados.



Fonte: Próprio autor.

Para suprir a necessidade de energia do sistema foi instalado um gerador solar 37,5 Kwh/Mês, o que equivale a uma geração diária de 1.2 kW ou de 50 W por hora.

O sistema de aquisição de dados consome 9,56 W por hora de funcionamento, para alimentar 18 sensores de umidade do solo. Na operação de coleta de dados dos sensores de umidade do solo, os sensores são inicialmente energizados por 20 segundos e posteriormente sendo feitas quatro medições com intervalo de 15 segundos.

Segue abaixo a descrição do consumo de cada componente do sistema de aquisição:

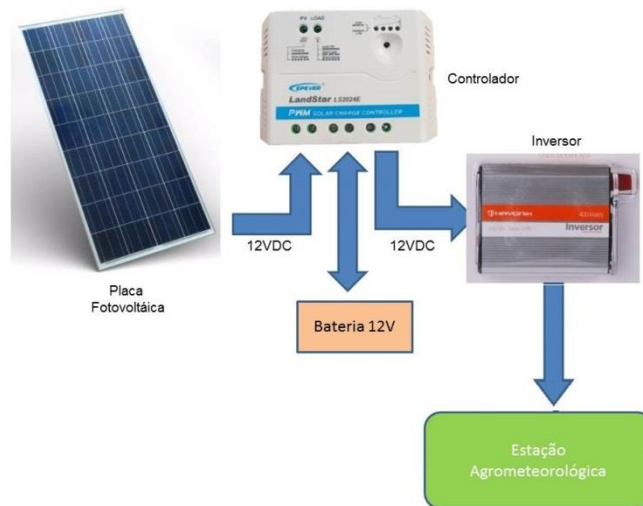
- controlador fotovoltaico: 0,132 W;
- fontes (24V e 5V): 0,072 W;
- microcontrolador: 6,648 W;
- switch: 0,6 W;
- antena Internet: 0,5 W

- sensor umidade ar e temperatura: 0,75 W e
- sensor umidade do solo: 0,85 W.

O sistema projetado tem geração diária de energia elétrica de 1.200W e o sistema de aquisição de dados consumindo 230 W. Com isso, o sistema gera um excedente diário de energia de 970 W.

Para armazenar a energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico foi utilizado uma bateria veicular de 60 Ah, com capacidade de fornecer 720 W ao sistema de aquisição de dados. Essa configuração é capaz de suprir energia ao sistema por 36 horas, sem nenhuma incidência de luz solar na placa fotovoltaica.

**Figura 23** - Sistema Fotovoltaico



Fonte: Próprio autor.

Para viabilizar a comunicação do sistema de aquisição de dados com a internet, para que os dados coletados dos sensores possam ser disponibilizados para um sistema de supervisão, foi utilizada uma antena de RF AirGrid M5, para fazer o link com a rede interna da UNESP. Essa antena de RF pode ser instalada a até 25 km da antena receptora e tem capacidade de transmissão de dados de 100Mbps. Tal conexão possibilita o envio e recebimento de dados pelo sistema de aquisição de dados.

**Figura 24** - Antena de Internet



Fonte: Próprio autor.

## 5.7 AQUISIÇÃO DE DADOS PARA CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

A aquisição de dados para calibração dos sensores nas profundidades de 0,10, 0,20 e 0,30 m, foi realizada por meio do método de pesagem, feito pelas diferenças de peso do conjunto (Figuras 25 e 26).

**Figura 25** - Método de Pesagem (amostra saturada).



Fonte: Próprio autor.

**Figura 26** - Método de Pesagem por diferenças sequenciais diárias (capacidade de campo).



Fonte: Próprio autor.

Determinação da CAD e da calibração dos sensores nas profundidades de 0,0 – 0,10; 0,10 - 0,20 e 0,20 - 0,30 m, respectivamente, foram realizadas por meio do método de pesagem de massa, feito pelas diferenças da massa do conjunto com período entre pesagens de 24 horas, conforme figuras 25 e 26:

- a) Solo utilizado para determinação da CAD: O solo foi classificado segundo o Sistema Brasileiro de Classificação, como ARGISSOLO VERMELHO distrófico (EMBRAPA, 2013);
- b) Balde “tipo caixa para aterramento elétrico” de PVC com fundo removível, com as seguintes dimensões: diâmetro de 0,299 m e altura de 0,317 m, compondo um volume de 0,0223 m<sup>3</sup> ou 22,319 Litros. Antes da coleta do solo o recipiente foi preparado com perfurações laterais e tampa inferior, para facilitar a drenagem do excesso da água e alcançar a capacidade de campo

- (CC). Antes de receber o solo, o balde recebeu pintura com duas demãos de tinta à base de esmalte na cor branca (Figura 25);
- c) Balança marca Balmak, com capacidade de 50 kg, com plataforma nas dimensões 50 x 50 cm, com coluna/braço, precisão de 20g, equipada com display digital, com bateria recarregável e autonomia mínima de 50 horas (Figura 26);
  - d) Sensores de Umidade do Solo (Figura 13);
  - e) Para a saturação do solo foi utilizado um recipiente (tambor de PVC) com capacidade de 100 litros, onde o conjunto (balde + solo + sensores elétricos) foram imersos com água até a altura de 2 centímetros da borda superior do balde por um período de 24 horas, tempo suficiente para a completa saturação e eliminação do ar contido na macroporosidade da amostra (Figura 25);
  - f) Plataforma metálica utilizada como base de sustentação do conjunto (balde + solo + sensores elétricos + água) na operação de pesagem da massa do conjunto para determinação capacidade de água disponível (CAD), conforme Figura 26, instalados no solo nas profundidades 0,0 – 0,10; 0,10 - 0,20 e 0,20 - 0,30 m, respectivamente. A aquisição de dados, massa do conjunto e leituras elétricas foram usadas para determinar a correlação, corrente elétrica (mA) versus umidade do solo (%), entre períodos de 24h. Tais leituras foram realizadas no processo de calibração tomadas em diferentes situações de umidade do solo em questão: entre o solo saturado (S) e o solo na capacidade de campo (CC) conforme descrito no item g.5, e entre o solo na capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP).
  - g) entre o solo saturado (S) e o solo na capacidade de campo (CC), conforme item g.5 foi realizada a primeira mensuração da massa do conjunto e da leitura dos sensores, respectivamente, adquirindo neste momento as mensurações elétricas dos sensores (mA) e a massa total do conjunto saturado, obtendo assim o Solo Saturado (S), na sequência o conjunto foi

protegido por uma lona de PVC de cor preta para evitar a perda de água da amostra por meio evaporação do solo. Para obter a Capacidade de Campo (CC), foi mensurada a massa do conjunto saturado a cada 24 horas até atingir massa constante, período este que durou aproximadamente 48 horas (Figura 26);

- h) Mensurada a massa e os valores elétricos da amostra na umidade do solo na Capacidade de Campo (CC), fez-se a retirada da lona preta que protegia o solo da perda de água por evaporação, daí em diante o solo passou a perder água naturalmente por evaporação, onde as leituras dos sensores (mA) e mensurações da massa da amostra foram realizados diariamente até a estabilização das mesmas, atingindo neste momento o Ponto de Murcha Permanente (PMP);
- i) Na sequência da determinação da (PMP), para a mensuração da amostra de solo seco levou o conjunto (balde + solo + água, sensores elétricos e plataforma de metálica) a estufa de ventilação de ar forçado (Figura 27) a uma temperatura de 85 °C por aproximadamente 48 h quando a mesma atingiu peso constante, de posse dos valores de solo seco e do volume da amostra, calculou-se a densidade do solo da cultura teste “Capim Mombaça”. Matematicamente, a densidade (d) é a razão entre a massa de uma substância (m) e o seu volume (v) (ATKINS; JONES, 2001);

$$d = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} = \frac{m}{v}$$

**Figura 27** - Estufa de Ventilação de Ar Forçado.



Fonte: Site fabricante.

## 5.8 AJUSTE POR MEIO DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES

Foi ajustada a curva padrão de umidade do solo atual (%) considerando os dados das leituras do sensor elétrico (mA), instalado na profundidade de 0,20 m utilizados na etapa de calibração. Dados apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1** - Dados utilizados para ajuste da curva padrão.

mA	Umidade (%)
9.81	100.00%
10.48	91.67%
10.98	84.09%
11.71	79.17%
11.9	74.05%
12.05	67.99%
12.21	58.33%
12.36	49.81%
12.54	40.91%
12.68	36.55%
12.91	33.14%
13.07	30.30%
13.28	25.38%
13.52	21.40%
13.87	13.83%
14.14	5.30%
14.26	2.65%
14.9	0%

Fonte: Próprio autor.

Os dados de leitura de corrente (mA) foram associadas por meio de método de regressão linear simples com as leituras de Umidade (%). O cálculo da umidade do solo em porcentagem –  $U(\%)$  – foi realizado por meio dos valores de umidade volumétrica do solo –  $U (\text{cm}^3/\text{cm}^3)$  – por meio da equação  $U(\%) = \frac{(U-PMP).10}{CC-PMP}$ ; em que PMP corresponde ao ponto de murcha permanente, e CC corresponde à capacidade de campo.

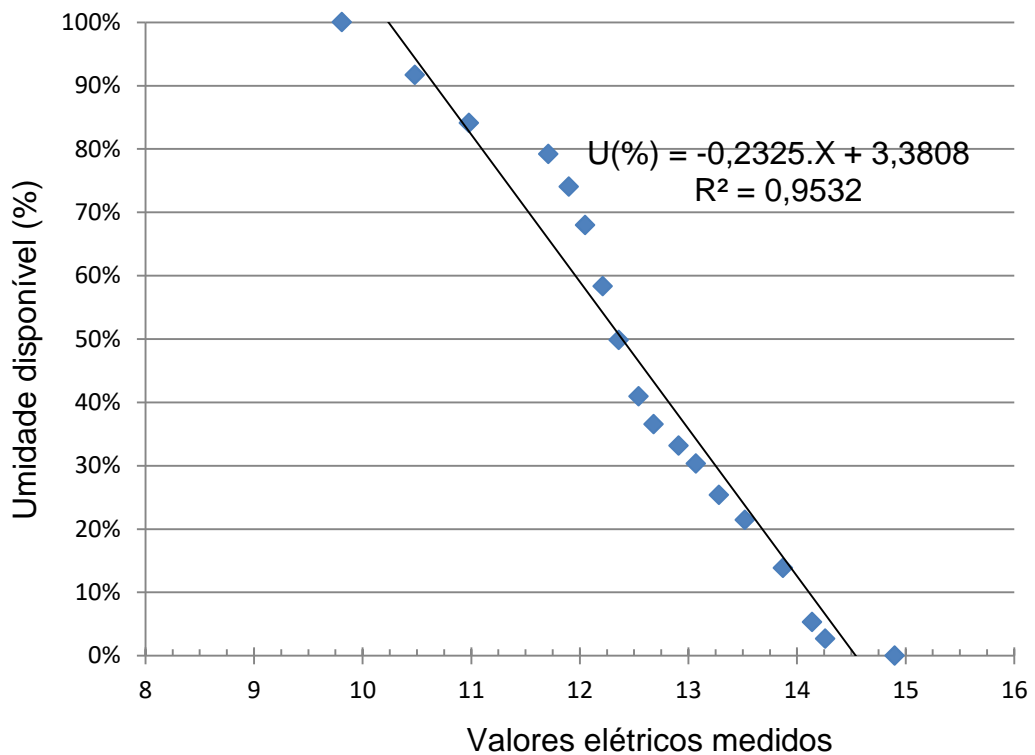
A curva ajustada é dada por  $U(\%) = -0,2325.X + 3,3808$ , sendo X os valores de corrente elétrica em mA. A curva ajustada é válida apenas no intervalo de

corrente elétrica que vai de 9,8 a 14,9 mA; de forma que o software construído apresenta a seguinte função:

$$U(\%) = \begin{cases} U(\%) = 100\% \text{ se } X < 9,81\text{mA}; \\ U(\%) \text{ se } 9,81\text{mA} < X < 14,9\text{mA} \\ U(\%) = \text{zero se } X > 14,9 \end{cases}$$

Na Figura 28 está apresentada a reta de regressão linear simples ajustada com os dados apresentados na Tabela 1. A estimativa de  $R^2$  de 95,32% denota bom ajuste da reta ajustada.

**Figura 28** - Curva de regressão ajustada para estimação da Umidade do solo –  $U(\%)$  – a partir dos dados corrente elétrica ( $X$ ).



Fonte: Próprio autor.

## 5.9 ETAPA DE EXPERIMENTAÇÃO EM CAMPO

### 5.9.1 Instalação do sistema de aquisição de dados em uma cultura de Capim Mombaça

Após a determinação da curva de calibração foram instalados 18 sensores de umidade do solo em uma cultura de Capim Mombaça. Os sensores foram instalados na profundidade de 20 cm, próximos ao sistema radicular da cultura. Para melhor controle foram posicionados mais dois sensores em ambientes livres de umidade do sistema de irrigação e de precipitação pluviométrica, sendo um destes sensores introduzido em um recipiente contendo solo livre de umidade, figura 29, que previamente foi seco em estufa à temperatura de 105°C por 24 horas, e o outro exposto ao ar ambiente.

**Figura 29** - Sensor de umidade no solo seco



Fonte: Próprio autor.

Após a instalação dos sensores nas profundidades descritas acima, foi realizada a irrigação com lâmina suficiente para que o solo fosse saturado (S), e a certeza que todos os macro e micro poros do solo estivessem com máxima saturação. Antes do início das leituras dos sensores, com o solo saturado, aguardou-se um período de 48hs para que o sistema entrasse em regime de capacidade de campo (CC), e a partir desse momento deu-se início as medições dos 18 Sensores de Umidade do Solo, sempre em mesmo horário do dia, às 16 h, com 4 repetições sequenciais espaçadas a cada 20 segundos de intervalo entre si.

**Figura 30** - Sensor de umidade de solo instalado na cultura do Capim Mombaça



Fonte: Próprio autor.

**Figura 31** - Parcela com sensores de umidade de solo instalados a 0,20 cm de profundidade.



Fonte: Próprio autor.

**Figura 32** - Vista do direcionamento do cabeamento dos sensores de umidade de solo nas parcelas.



Fonte: Próprio autor.

## **Equipamentos de manejo e de irrigação**

Os sensores utilizados no experimento foram instalados no solo, em área teste irrigada com Capim Mombaça. Para o cálculo da reposição da lâmina de irrigação foi utilizado variáveis climáticas obtidas a partir da Estação Meteorológica Campbell Scientific - Modelo CR10X, instalada nas proximidades da área experimental, ou seja, dentro da FCAT/UNESP - Câmpus de Dracena, a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi estimada pelo método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

A área teste era equipada com sistema de irrigação por aspersão convencional fixo, com 4 aspersores para uma área de 144 m<sup>2</sup>, pressão de serviço de 20 mca e lâmina líquida (LL) de 6,5 mm h<sup>-1</sup>, posicionados nos quatro cantos da área, com tubo de subida dos aspersores com 1,7 m de altura, espaçados em 12 metros entre as linhas laterais e 12 metros entre aspersores na linha.

Para verificar a uniformidade da lâmina de irrigação foi efetuado os testes de campo, onde foi utilizado o método do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), obtendo assim, uma uniformidade de distribuição igual 84%. Na sequência, foi calculada a lâmina bruta (LB) aplicada no valor de 8,13 mm h<sup>-1</sup>, para uma eficiência de aplicação do sistema por aspersão de 80%.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De posse dos valores elétricos (mA) dos sensores para determinação da umidade do solo (%) instalados na cultura teste do capim Mombaça durante o período de 23 de junho a 25 de julho, conforme a Tabela 2, sendo, tais dados utilizados nos cálculos da curva de regressão linear simples ajustada (Figura 30), que é dada por  $U(\%) = -0,2325.X + 3,3808$ , sendo X os valores de corrente elétrica em mA.

**Tabela 2 - Leituras dos Sensores no Capim Mombaça**

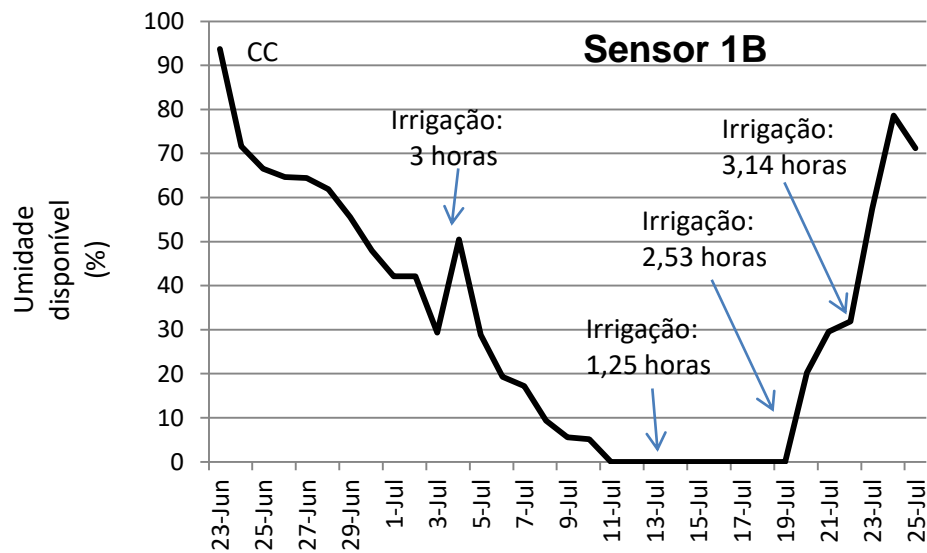
Entradas de H <sub>2</sub> O	Data/Hora	Sensor 1B	Sensor 2B	Sensor 3B	Sensor 4B	Sensor 5B	Sensor 6B	Sensor 7B	Sensor 8B	Média
Capacidade de Campo	23-06-18 16:05	10,51	10,59	9,97	10,88	8,12	10,54	10,65	10,49	10,22
	24-06-18 16:05	11,46	10,62	10,64	11,43	8,39	11,27	10,64	10,51	10,62
	25-06-18 16:05	11,68	10,49	10,76	11,16	8,48	11,60	10,65	10,38	10,65
	26-06-18 16:05	11,76	10,57	10,93	11,21	8,75	11,66	10,74	10,52	10,77
	27-06-18 16:05	11,77	10,79	11,15	11,52	9,43	11,73	10,90	10,72	11,00
	28-06-18 16:05	11,88	11,03	11,38	11,84	10,00	11,94	11,05	11,02	11,27
	29-06-18 16:05	12,15	11,32	11,72	12,25	10,52	12,24	11,17	11,20	11,57
	30-06-18 16:05	12,48	11,61	12,03	12,66	10,94	12,54	11,36	11,36	11,87
	01-07-18 16:05	12,73	11,90	12,35	12,97	11,39	12,77	11,72	11,40	12,15
	01-07-18 16:05	12,73	11,90	12,35	12,97	11,39	12,77	11,72	11,40	12,15
03-07-18 16:05	13,28	12,39	12,95	13,59	12,55	13,42	12,24	12,00	12,80	
Irrigação: 3 horas	04-07-18 16:05	12,37	11,41	12,89	13,35	12,79	8,33	12,17	12,01	11,92
	05-07-18 16:05	13,30	11,78	12,72	13,04	13,18	13,90	12,41	11,86	12,77
	06-07-18 16:05	13,71	12,14	12,83	13,20	13,52	14,30	12,61	12,19	13,06
	07-07-18 16:05	13,80	12,26	12,94	13,28	13,79	14,57	12,73	12,34	13,21
	08-07-18 16:05	14,14	12,63	13,23	13,54	14,50	15,05	13,04	12,67	13,60
	09-07-18 16:05	14,30	12,78	13,39	13,66	14,92	15,41	13,22	12,85	13,82
	10-07-18 16:05	14,32	12,72	12,30	12,76	11,32	13,28	12,17	12,10	12,62
	11-07-18 16:05	14,77	12,95	12,51	12,74	11,50	13,99	12,25	12,10	12,85
12-07-18 10:07	14,92	12,85	12,40	13,14	11,41	14,19	12,21	12,00	12,89	
Irrigação: 1h 25 min	13-07-18 16:05	14,89	12,75	11,86	13,20	11,74	14,36	12,34	12,38	12,94
	14-07-18 16:05	15,01	12,90	12,05	13,56	10,65	14,43	12,41	12,55	12,95
	15-07-18 16:05	15,23	13,16	12,27	13,84	10,63	14,63	12,31	12,80	13,11
	16-07-18 16:05	15,30	12,84	12,35	13,95	14,77	14,70	12,26	13,04	13,65
	17-07-18 16:05	15,07	12,84	12,50	14,12	14,54	14,88	12,26	13,17	13,67
	18-07-18 16:05	15,29	12,81	12,94	15,01	14,70	15,22	12,52	13,42	13,99
Irrigação: 2h 53 min	19-07-18 16:05	13,91	11,74	12,15	13,83	13,47	15,06	12,28	13,04	13,19

	20-07-18 16:05	13,67	11,62	12,35	14,61	14,03	15,31	12,25	13,19	13,38
	21-07-18 16:05	13,27	11,53	12,50	14,16	14,23	15,55	12,45	13,37	13,38
	22-07-18 16:05	13,17	11,57	12,78	14,27	14,59	15,72	12,61	13,54	13,53
Irrigação: 3h 14 min	23-07-18 16:05	12,07	12,03	11,39	13,20	10,31	10,49	11,31	11,59	11,55
	24-07-18 16:05	11,16	11,73	11,29	12,82	10,02	10,45	11,45	11,40	11,29
	25-07-18 16:05	11,48	11,84	11,40	13,01	9,71	10,32	11,74	11,47	11,37

Fonte: Próprio autor.

Para os sensores 1B a 8B, e sua média, instalados na profundidade de 0,20 m foram obtidas as curvas de umidade do solo (%), durante o período de 23 de junho a 25 de julho de 2018, como mostrado nas figuras 33 a 41.

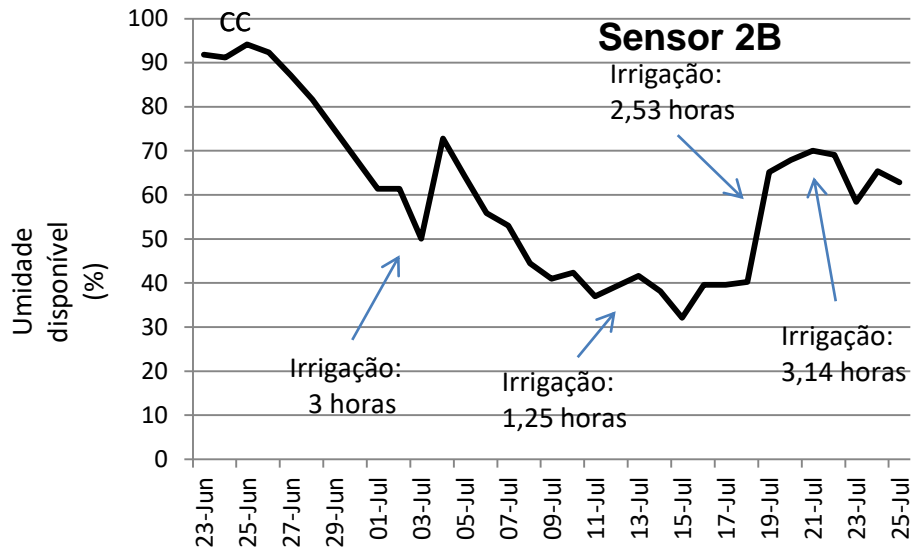
**Figura 33 – Umidade do solo (%) - sensor 1B**



Fonte: Próprio autor.

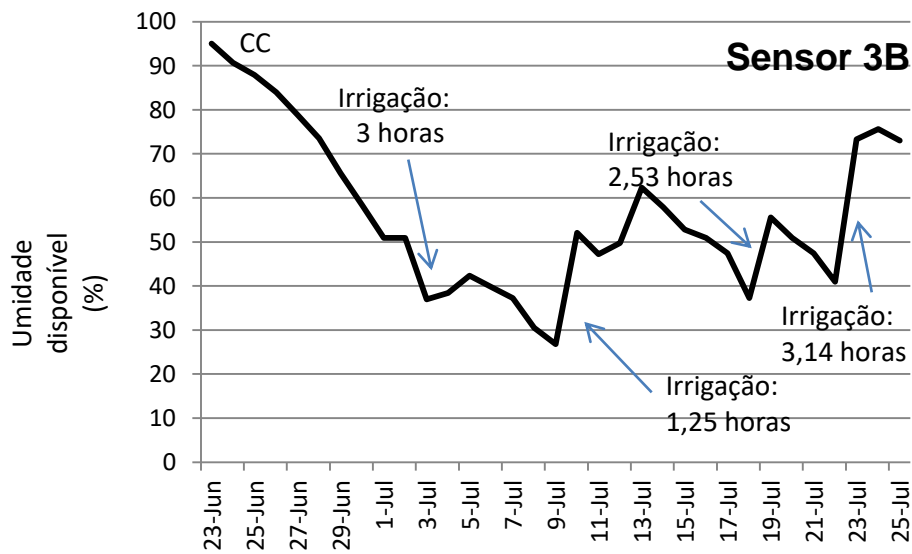


**Figura 34 – Umidade do solo (%) - sensor 2B**



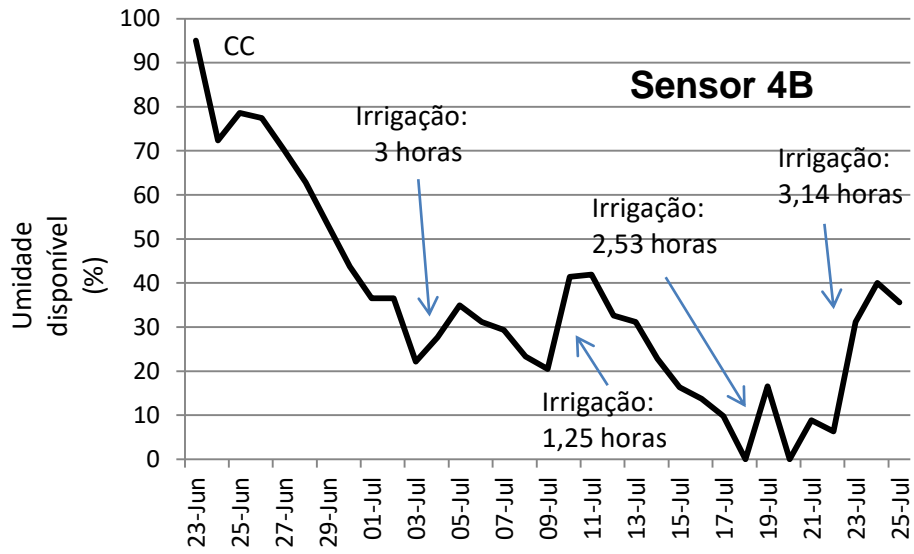
Fonte: Próprio autor.

**Figura 35 – Umidade do solo (%) - sensor 3B**



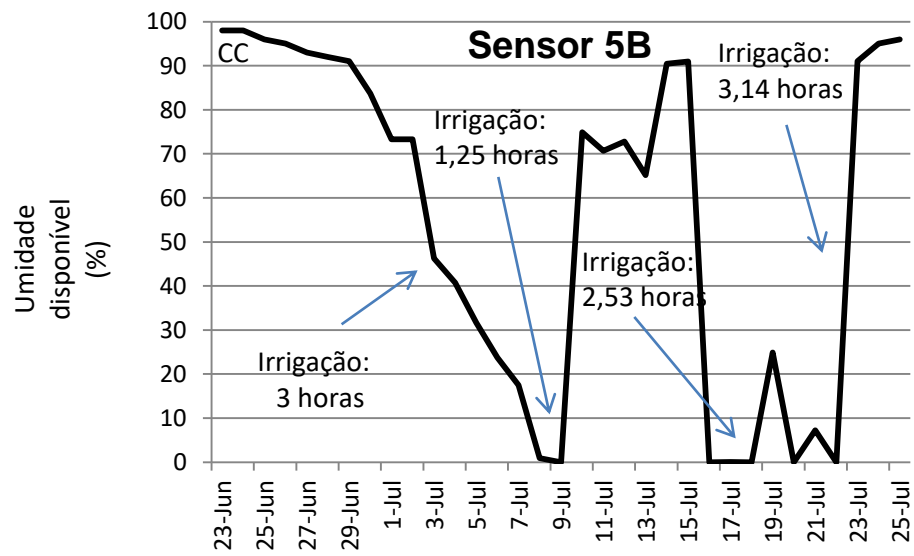
Fonte: Próprio autor.

**Figura 36 – Umidade do solo (%) - sensor 4B**



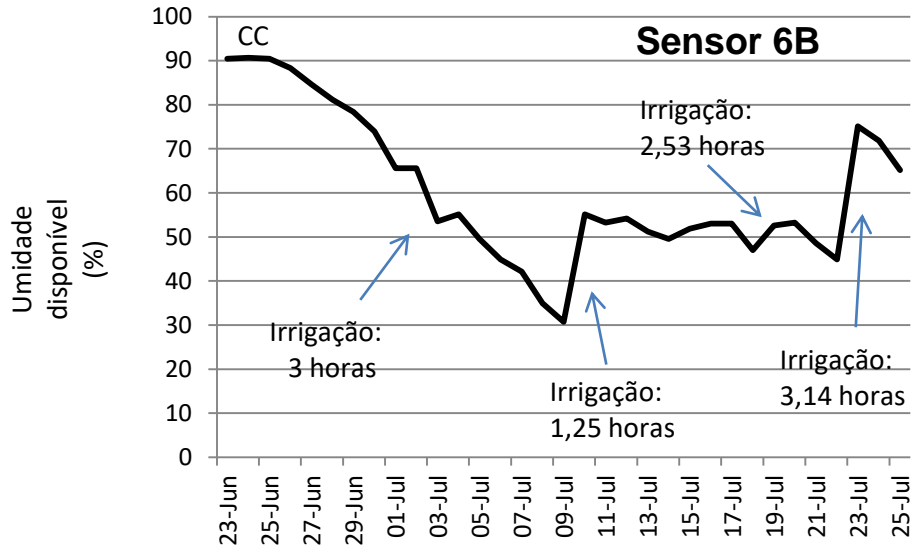
Fonte: Próprio autor.

**Figura 37 – Umidade do solo (%) - sensor 5B**



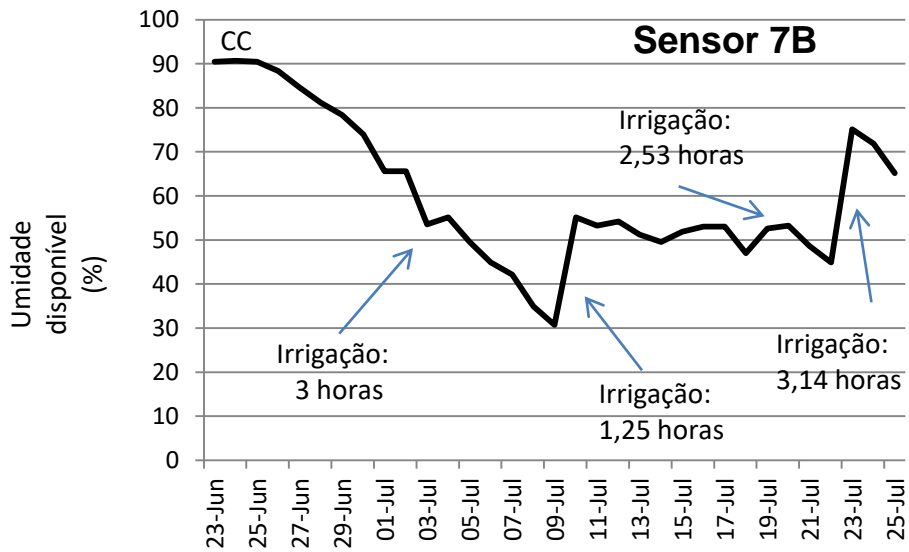
Fonte: Próprio autor.

**Figura 38 – Umidade do solo (%) - sensor 6B**

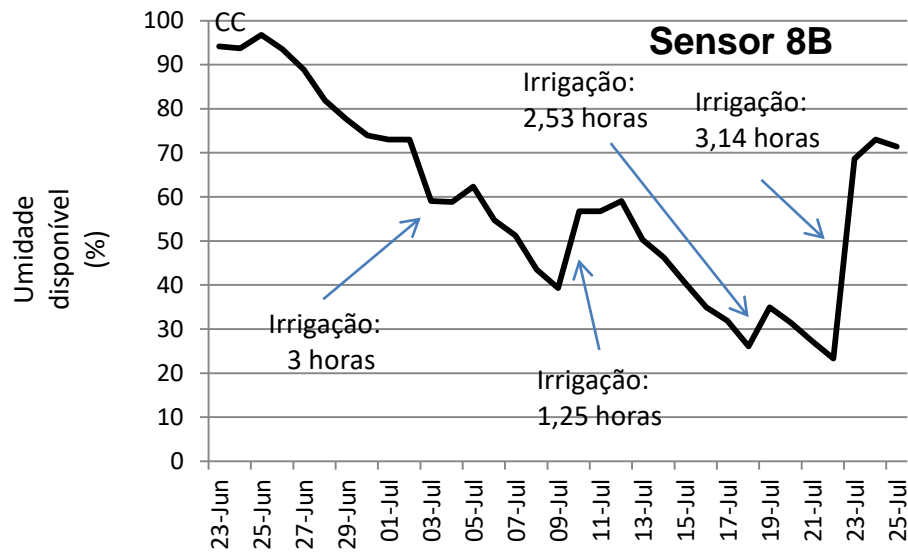


Fonte: Próprio autor.

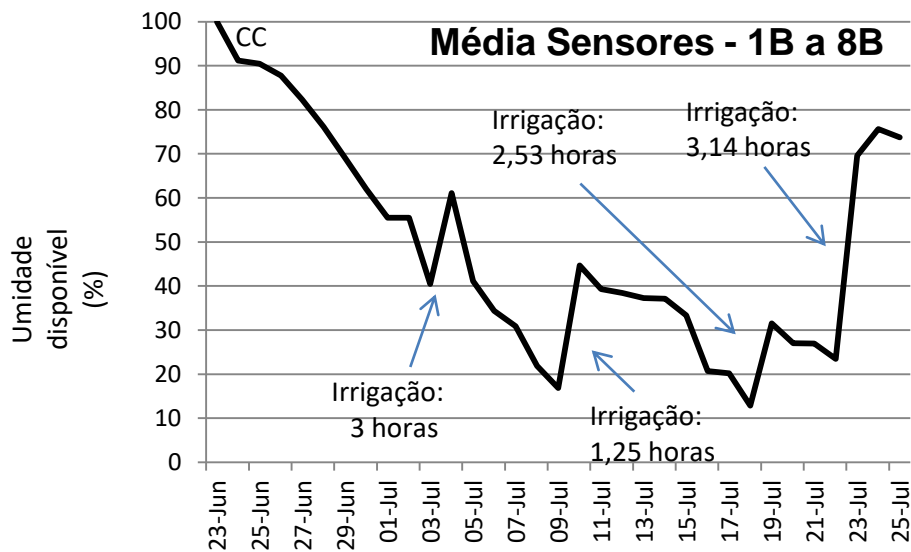
**Figura 39 – Umidade do solo (%) - sensor 7B**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 40 – Umidade do solo (%) - sensor 8B**

Fonte: Próprio autor.

**Figura 41 – Umidade do solo (%) - média sensores 1B a 8B**

Fonte: Próprio autor.

Durante o experimento, tivemos quatro eventos de irrigação nos dias 03, 09, 18 e 22 de julho, com uma quantidade irrigada de aproximadamente 20, 8,5, 20 e 21 mm respectivamente.

Nas figuras 33 a 40 temos o comportamento dos sensores perante os eventos de irrigação durante o período de teste. Vale ressaltar que não houve chuva no período de teste da cultura do capim Mombaça.

No primeiro evento de irrigação no dia 03 de julho, temos os sensores 5B, 6B, 7B e 8B (respectivamente Figuras 37, 38, 39 e 40) tendo uma resposta diferente dos outros sensores (1B a 4B, Figuras 33 a 36 respectivamente). No setor onde estavam instalados os sensores 5B a 8B houve algum evento externo que interferiu na uniforme distribuição da água pelo sistema de irrigação. Esse evento externo pode ter sido influência do vento ou mesmo o entupimento de um aspersor.

Na figura 41 temos a média das medições dos 8 sensores. A média dos sensores apresenta os quatro eventos de irrigação bem representados, sendo a melhor aproximação para a quantificação da umidade disponível no solo (%). Os eventos de irrigação demonstram o aumento da umidade disponível no solo, tendo a última irrigação elevado a umidade disponível no solo de 25% para 75% (Figura 41).

Portanto, se demonstrou viável o desenvolvimento do sensor de umidade do solo e do sistema de aquisição de dados, possibilitando o correto manejo do sistema de irrigação.

Com o sistema de aquisição de dados e os sensores de umidade do solo é possível estimar a umidade disponível para outros tipos de solo.

Conforme levantamento de preços de equipamentos de mercado com funções similares ao sistema de aquisição de dados proposto, temos:

a. Equipamento de empresa do mercado de agronomia:

01 x CR1000: R\$ 15.350,00

36 x CURS: R\$ 12.160,00

01 x Multiplexer AM1632: R\$ 6.200,00

No total temos o custo do equipamento compatível: R\$ 33.710,00.

b. Equipamento Sistema de Aquisição de Dados:

01 x ILH131: R\$ 680,00

08 x EA : R\$ 1.760,00

No total temos o custo do equipamento Phoenix de R\$ 2.440,00.

c. Sensor Umidade do Solo MAS-1 (4-20mA), fabricante Decagon:

01 x sensor: R\$ 1.300,00

d. Sensor Umidade do Solo desenvolvido no projeto:

01 x sensor: R\$ 120,00

Para um sistema de aquisição de dados com 32 entradas analógicas 4-20mA e 32 sensores de umidade do solo temos:

Conjunto similar no mercado: R\$ 75.310,00

Protótipo desenvolvido: R\$ 6.280,00

Portanto, o sistema de aquisição de dados e 32 sensores de umidade do solo, pertencentes a este projeto, apresentam um custo médio 90% mais barato que os sistema e sensores similares existentes no mercado.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com as leituras realizadas foi possível estimar a umidade atual do solo (%) a cada medição diária dos sensores.

O sistema de controle e aquisição de dados demonstrou ser estável, tendo o sistema operacional funcionando de maneira contínua por mais de 6 meses.

Com relação a geração de energia, o sistema fotovoltaico é capaz de suprir o sistema de aquisição de dados por até 3 dias consecutivos sem nenhuma geração (tempo nublado).

A comunicação do sistema de aquisição de dados com centro de controle e usuários finais, também se mostrou estável e confiável.

O sensor de umidade do solo demonstrou ter repetibilidade e confiabilidade ao longo do período de aquisição de dados. Ainda, o sensor de umidade do solo apresentou alta imunidade a ruído, imunidade à queda de tensão na linha, imunidade a termopares parasitas, imunidade à tensão e resistência de contato.

Uma outra característica do sensor é o alarme de falha no circuito elétrico, que aponta a existência de problema no sensor ou em sua conexão elétrica ao microcontrolador.

Alguns sensores mostraram resultados diferentes da média possivelmente devido a interferências externas ao funcionamento do sistema de irrigação devido a velocidade do vento acima do permitido, acarretando baixa uniformidade na lâmina de irrigação.

O sistema de aquisição de dados opera de maneira estável e contínua há mais de 6 meses, apresentando estabilidade no consumo de energia e alta confiabilidade na comunicação dos dados.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G; PEREIRA, L.S; RAES, D; SMITH, M. **Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO Irrigation and Drainage, 1998. 56p.
- ALVES, K. J. P.; FERNANDES, J. M. C. Influência da temperatura e da umidade relativa do ar na esporulação de *Magnaporthe grisea* em trigo. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 31, p. 579-584, 2006.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Ministério do Meio Ambiente. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2016**. Brasília, DF, 2015.
- AOSONG. **Temperature and humidity module AM2302 DHT22: product manual**. [S. l.], 2014.
- ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- AYODE, J. O. **Introdução a climatologia para os trópicos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.
- BITSON, T. **Weather toys: bulding and hacking your own 1-wire weather station**. Indianapolis: Wiley, 2006.
- BLAIR, T. A.; FITE, R. C. **Meteorologia**. Rio de Janeiro: Artes Gráficas Gomes de Souza, 1964.
- BORGES, F. F.; NUNES, O. J. S; BORGES, I. R. F. **Coletor de dados de baixo custo, baseado na plataforma arduino, para aplicações em pesquisas sobre meio ambiente**. [S. l.: s. n.], 2014.
- BRITO, A. A. S.; SOUZA, A. H. Sistema de aquisição de dados climatológicos automatizados por microcomputador. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 5., Belém, 1987. **Anais [...]** [S. l.: s. n.], 1987. p. 1-10.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 1989. v. 1.
- CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Estudo comparativo entre elementos meteorológicos obtidos em estações meteorológicas convencional e automática em Botucatu, SP, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 103-111, 2004.
- DALLY, J. W.; WILLIAM, F.; McCONNELL, K. G. **Instrumentation for engineering measurements**. 2nd ed. New York: John Willey, 1993.
- FOLEGATTI, M. V.; SÁNCHEZ – ROMÁN, R .M; COELHO, R. D.; FRIZZONE, J. A. **Gestão dos recursos hídricos e agricultura irrigada no Brasil.Águas do Brasil: análises estratégicas**. São Paulo: EdUSP, 2007.

GALINA, M. H.; VERONA, J. A. Fontes de observações meteorológicas no Estado de São Paulo. **Estudos Geográficos**, Rio Claro, v. 2, n. 1, p. 107-118, 2004.

GRIMM, A. M.; OLIVEIRA, G. S. Observações ambientais atmosféricas e de propriedades da superfície. In: PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS – PBMC. **Base científica das mudanças climáticas**. Rio de Janeiro: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas.

GUECHI, A.; CHEGAAR, M. Effects of diffuse spectral illumination on microcrystalline solar cells. **Journal of electronics**, Abingdon, v. 5, p. 116-121, 2007.

HAYHOE, H. N., BALCHIN, D. Automatic retrieval of data agrometeorological using a microcomputer and radiotelemetry. **Journal of Computers and Eletronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 2, n. 2, p. 129-134, 1987.

LASNIER, F.; ANG, T. G. **Photovoltaic engineering handbook**. Bristol: Adam Hilger, 1990.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação do solo**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

LOWINSOHN, D.; BERTOTTI, M. Sensores eletroquímicos: considerações sobre mecanismos de funcionamento e aplicações no monitoramento de espécies químicas em ambientes microscópicos. **Química Nova**, São Paulo, v. 29, n. 6, p.1318-1325, 2006.

MANZIONE, R. L. **Águas subterrâneas**: conceitos e aplicações sob uma visão multidisciplinar. Jundiaí: Paco editorial, 2005.

MARTINS JUNIOR; P. P. **Projeto CRHA**: Conservação de recursos hídricos no âmbito da gestão agrícola e ambiental de bacias hidrográficas. São Paulo: CETEC/CT-HIDRO/ 2002-MCT/ FINEP, 2006. Relatório final.

MAXIM INTEGRATED. **Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer**. DS18B20. Datasheet, 2015.

PIRES, D. P. L.; AFONSO, J. C.; CHAVES, F. A. B. A termometria nos séculos XIX e XX. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 101-114, 2006.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo**. Curitiba: Editora da UFPR, 1996.

REBELLO JUNIOR, C. J. **Sistema de aquisição de dados agrometeorológicos baseado no microcontrolador “Basic Step”**. 2004. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.12, p. 211-216, 1988.

RUFFATO, S.; CORRÊA, P. C.; MARTINS, J. H.; MANTOVANI, B. H. M.; SILVA, J. N. Efeito das condições de colheita, pré-processamento e armazenamento na qualidade do milho: pipoca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 3, p. 591-597, 2000.

SILVA, K. O. **Desenvolvimento de sistema automatizado de baixo custo para aquisição de dados de umidade relativa e temperatura do ar**. 2000. 81 f. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

SILVA, K. O.; MORAES, S. O. Desenvolvimento de um sistema automatizado de baixo custo para aquisição de dados de temperatura do ar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 189-195, 2002.

SOUZA, O. **Descrição geral da arquitetura do microcontrolador PIC: aprendendo robótica**. Lisboa: [s. n.], 2006.

TOME Jr, J. B. **Manual para interpretação de análise do solo**. [S. l.]: Livraria e Editora Agropecuária, 1997.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. São Paulo: Nobel, 1992.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP. **Acesso à base diária: canal clima**. Ilha Solteira: UNESP-FE / Departamento de Fitossanidade e Engenharia Rural e Solos - DEFERS / Área de Hidráulica e Irrigação - AHI, 2012.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentages of soils. **Science**, Washington, v. 68, p. 75-94, 1949.

ZAMBALDE, A. L. **Sistema computadorizado para aquisição e análise de dados agrometeorológicos**. 1991. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia: Eletrônica) – Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1991.

ZOBY, J. L. G. Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. In: CONGRESSO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15., 2008, Campinas. **Anais [...]** Brasília, DF: ANA, 2008. p. 1-20.