



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**HENRIQUE SOUZA VASCONCELOS**

**AUTOMAÇÃO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO EM MALHA FECHADA  
UTILIZANDO REDE SEM FIO DE SENSORES  
CAPACITIVOS DE UMIDADE DO SOLO**

**FORTALEZA  
2013**

**HENRIQUE SOUZA VASCONCELOS**

**AUTOMAÇÃO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO EM MALHA FECHADA  
UTILIZANDO REDE SEM FIO DE SENSORES  
CAPACITIVOS DE UMIDADE DO SOLO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de Concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Orientador: Prof. Adunias dos Santos Teixeira,  
Ph.D.

**FORTALEZA  
2013**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

- 
- V450a Vasconcelos, Henrique Souza.  
Automação de sistema de irrigação em malha fechada utilizando rede sem fio de sensores capacitivos de umidade do solo / Henrique Souza Vasconcelos. – 2013.  
75 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2013.  
Área de Concentração: Engenharia de Sistemas Agrícola.  
Orientação: Prof. PhD. Adunias dos Santos Teixeira.  
Coorientação: Prof. Dr. Clemilson Costa dos Santos
1. Irrigação – automação. 2. Irrigação – precisão. 3. Sensores remoto. I. Título.

**HENRIQUE SOUZA VASCONCELOS**

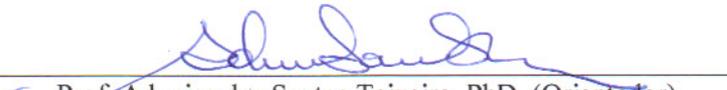
**AUTOMAÇÃO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO EM MALHA FECHADA  
UTILIZANDO SENSORES CAPACITIVOS DE UMIDADE DO SOLO  
E REDES DE SENSORES SEM FIO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de Concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Orientador: Prof. Adunias dos Santos Teixeira, Ph.D.

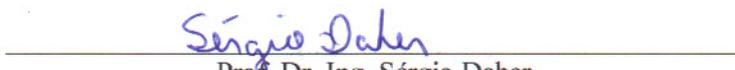
Aprovada 31 / 07 / 13.

**BANCA EXAMINADORA**

  
Prof. Adunias dos Santos Teixeira, PhD. (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará – UFC

  
Dr. Clemilson Costa dos Santos  
Universidade Federal do Ceará – UFC

  
Dr. Antônio Macílio Pereira de Lucena  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

  
Prof. Dr. Ing. Sérgio Daher  
Universidade Federal do Ceará – UFC

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor e orientador Adunias dos Santos Teixeira, pelos inúmeros conhecimentos transmitidos, dedicação ao projeto e grande apoio em todos os momentos.

A meus pais, por todo o trabalho e esforço dedicados ao meu ensino e todas as lições que não aprendemos entre as paredes da academia.

Aos gigantes de Newton, que ajudam a todos os cientistas a enxergar mais longe.

A minha pequena grande Crislene Araújo, que me engrandece e me ajuda a superar novos desafios a cada dia.

Aos colegas do Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA): Odílio, Firmino, Lúcio, Kenya, Alisson, Tadeu, Lucas, Alfredo, Tiago Terto e Felipe Muniz.

Aos novos amigos que me acolheram nesta nova realidade: Odílio Coimbra, Karla Batista, Raul Monte, Tadeu Macryne e mais tantos que não cabem no papel.

Aos velhos amigos que sempre me apoiaram ao longo do tempo: Hélio, Herlon, Ismael, Marcos Paulo, Santhiago e Samuel.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Sem o apoio financeiro destas instituições não seria possível realizar os trabalhos.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Transmissão de informações em uma RSSF.....	17
Figura 2 – Arquitetura do módulo sensor.....	18
Figura 3 – Sistema de controle em malha aberta.....	21
Figura 4 – Sistema de controle em malha fechada.....	21
Figura 5 – Sistema de controle liga-desliga.....	22
Figura 6 – Sistema de controle discreto.....	23
Figura 7 – Sistema de controle contínuo.....	23
Figura 8 – Sensor capacitivo de umidade do solo.....	27
Figura 9 – Esquema de um sistema de automação da irrigação.....	29
Figura 10 – Fluxograma de um algoritmo de controle da irrigação.....	31
Figura 11 – Relação entre teor de água do solo e respostas dos sensores capacitivos FDR a 10 cm de profundidade (A) ou 30 cm de profundidade (B).....	32
Figura 12 – Área experimental.....	34
Figura 13 – Sensores capacitivos de umidade do solo.....	36
Figura 14 – Módulo remoto.....	37
Figura 15 – Placa multiplexadora dos sensores.....	38
Figura 16 – Módulo mestre.....	38
Figura 17 – Inversor de frequência.....	39
Figura 18 – Módulo de controle do inversor.....	40
Figura 19 – Sinal transmitido na comunicação ModBus.....	41
Figura 20 – Sistema de filtragem e retrolavagem.....	42
Figura 21 – Esquemático da Ponte-H.....	43
Figura 22 – Módulo das válvulas.....	44
Figura 23 – Tela inicial do <i>software</i> de controle da irrigação.....	45
Figura 24 – Quadro de status do módulo mestre.....	46
Figura 25 – Quadro de controle automático.....	47
Figura 26 – Tela de configuração dos módulos remotos.....	48
Figura 27 – Campos de configuração dos módulos remotos.....	48
Figura 28 – Botões de transmissão de comandos.....	49
Figura 29 – Quadro de leitura dos sensores.....	50
Figura 30 – Histórico de leituras de umidade.....	51
Figura 31 – Tela de configuração do módulo de controle de bomba.....	52

Figura 32 – Quadro de controle do inversor.....	53
Figura 33 – Quadro de controle da retrolavagem .....	54
Figura 34 – Tela de configuração do módulo do cavalete de válvulas.....	55
Figura 35 – Quadro de configuração de válvula.....	55
Figura 36 – Acionamento de válvulas por limites de umidade .....	56
Figura 37 – Acionamento de válvulas pelo cálculo do tempo de irrigação.....	57
Figura 38 – Aba de controle manual da irrigação .....	58
Figura 39 – Módulo mestre instalado (à direita) e detalhe da instalação (à esquerda).....	59
Figura 40 – Área experimental .....	60
Figura 41 – Esquema de instalação de sensores no campo .....	61
Figura 42 – Módulos sensores instalados em campo .....	62
Figura 43 – Alimentação do módulo sensor.....	63
Figura 44 – Válvulas instaladas em campo em detalhe (acima) e no cavalete (abaixo). .....	64
Figura 45 – Instalação do módulo das válvulas (A) e detalhe da instalação (B).....	65
Figura 46 – Módulo de controle do inversor instalado em campo .....	66
Figura 47 – Monitoramento da Umidade do Solo .....	67
Figura 48 – Umidade do solo influenciada pelo controle automático. ....	68
Figura 49 – Falhas no sistema hidráulico .....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	<i>Alternate Current</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FDR	<i>Frequency Domain Reflectometer</i>
LEMA	Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola
NA	Normalmente Aberto(a)
NF	Normalmente Fechado(a)
CLP	Controlador Lógico Programável
PC	<i>Personal Computer</i>
RF	Rádio Frequência
RSSF	Redes de Sensores sem Fio
TDR	<i>Time Domain Reflectometer</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

## RESUMO

VASCONCELOS, Henrique Souza. Automação de Sistema de Irrigação em Malha Fechada Utilizando Rede Sem Fio de Sensores Capacitivos de Umidade do Solo. Orientador: Adunias dos Santos Teixeira. Conselheiros: Antônio Macílio Pereira de Lucena, Clemilson Costa dos Santos, Sérgio Daher.

A irrigação é uma das práticas que mais influencia na produção agrícola, demandando um elevado consumo de água, que é um recurso escasso e fundamental para preservação da vida. Assim, técnicas que visem à redução do consumo de água e energia por um sistema de irrigação, baseando-se na cultura do não desperdício, vêm sendo estudadas e aplicadas sob o nome de irrigação de precisão. O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um sistema de automação da irrigação em malha fechada baseado na medida de umidade do solo por sensores capacitivos FDR. A automação de um sistema de irrigação com a utilização de sensores permite um controle mais preciso do que aquele feito manualmente, pois permite a tomada de decisões rápidas e precisas sobre o quanto e quando irrigar. Para que esta seja possível, foi necessário construir dispositivos eletrônicos para ler os sensores em campo e controlar os diferentes pontos do sistema: estação de bombeamento e válvulas em hidráulicas. A rede de sensores sem fio (RSSF) foi a forma escolhida para a comunicação entre estes dispositivos, por dispensar cabos, o que facilita a instalação dos mesmos em campo. Para controlar e coordenar toda a rede foi desenvolvido um software de automação na linguagem Java, executado a partir de um computador pessoal (PC). Baseando-se na leitura dos sensores e em dados sobre o sistema de irrigação, o algoritmo calcula o tempo de aplicação de água no solo, ligando bombas e acionando válvulas remotamente. Além disso, o sistema verifica e armazena os dados da pressão hidráulica na casa de bombas, protegendo-se contra danos mecânicos. O sistema de automação foi montado em campo de forma a monitorar e controlar a umidade do solo em uma cultura de milho, sendo bem sucedido nesta tarefa. Alguns problemas no software foram solucionados à medida que surgiam, mostrando a necessidade de manutenção em um sistema de automação. O armazenamento da leitura dos sensores de pressão e umidade em um banco de dados fornece um histórico do funcionamento do sistema, podendo ser utilizado para uma avaliação criteriosa do mesmo.

**Palavras-chave:** RSSF. Automação da Irrigação. Irrigação de Precisão. Sensores FDR.

## ABSTRACT

VASCONCELOS, Henrique Souza. A closed-loop automatic irrigation system utilizing a wireless network of capacitance umidity sensors. Advisor: Adunias dos Santos Teixeira. Counselors: Antônio Macílio Pereira de Lucena, Clemilson Costa dos Santos, Sérgio Daher.

Irrigation is one of the most influencing practices on agricultural production, requiring a high water consumption, which is a scarce resource critical to life's preservation. Thus, techniques aimed at reducing energy and water waste by an irrigation system have been studied and applied under the name of precision irrigation. The main objective of this paper was to develop an automatic closed loop irrigation system based on the measurement of soil moisture by FDR capacitance sensors. An automatic irrigation systems allows a control which is far more precise than manual control, allowing fast and accurate decisions about how much and when to irrigate. For this to be possible, it was necessary to build electronic devices in order to read sensors in the crop field and control different points of the system: pumping house and hydraulic valves. A wireless sensor network (WSN) was chosen for communication between these devices. It allows a quick installation, since you don't have to pull cords from the controller to the sensors and actuators on the crop field. We developed an automation software in Java that monitors and coordinates the entire network, which is executed in a personal computer (PC). Based on sensor readings and data on the irrigation system, the algorithm computes for how long to water the soil, remotely activating water pumps and hydraulic valves. In addition, the software verifies and stores data about the hydraulic pressure at the pumping house, protecting it against mechanical damage. The automation system was assembled in the field in order to monitor and control soil moisture in a maize crop field, being successful in this task. Some software problems were solved as they arose, showing the need for maintenance of an automation system. Storing pressure and soil moisture sensor data in a database provides a history of soil water status, allowing further analysis and evaluation of the irrigation system.

**Keywords:** WSN. Irrigation Automation. Precision Irrigation. FDR sensors.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	15
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	15
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	15
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	16
<b>3.1</b>	<b>Sistemas embarcados</b> .....	16
<b>3.2</b>	<b>Redes de sensores sem fio</b> .....	16
<b>3.3</b>	<b>Agricultura de precisão</b> .....	18
<b>3.4</b>	<b>Teoria do controle</b> .....	20
3.4.1	Controle On/Off.....	22
3.4.2	Controle em níveis discretos.....	22
3.4.3	Controle contínuo.....	23
<b>3.5</b>	<b>Estratégias de automação na irrigação</b> .....	24
3.5.1	Métodos solo-água.....	24
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	29
<b>4.1</b>	<b>Visão geral do sistema</b> .....	29
<b>4.2</b>	<b>Algoritmo de controle</b> .....	30
<b>4.3</b>	<b>Área experimental</b> .....	33
<b>4.4</b>	<b>Plataforma de desenvolvimento do <i>software</i></b> .....	34
<b>5</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO <i>HARDWARE</i></b> .....	36
<b>5.1</b>	<b>Sensores capacitivos de umidade do solo</b> .....	36
<b>5.2</b>	<b>Módulo Sensor</b> .....	36
<b>5.3</b>	<b>Multiplexação dos sensores</b> .....	37
<b>5.4</b>	<b>Módulo mestre</b> .....	38
<b>5.5</b>	<b>Inversor de frequência</b> .....	39
<b>5.6</b>	<b>Módulo de controle do inversor</b> .....	40
<b>5.7</b>	<b>Módulo das válvulas</b> .....	42
<b>6</b>	<b><i>SOFTWARE</i> DESENVOLVIDO</b> .....	45
<b>6.1</b>	<b>Visão geral do <i>software</i></b> .....	45
<b>6.2</b>	<b>Módulos remotos</b> .....	47
6.2.1	Configuração dos módulos remotos.....	47
6.2.2	Aquisição de Dados.....	50

<b>6.3</b>	<b>Configuração do módulo de controle de bomba.....</b>	<b>52</b>
<b>6.4</b>	<b>Configuração do módulo do cavalete de válvulas.....</b>	<b>54</b>
<b>6.5</b>	<b>Controle manual.....</b>	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>ETAPA DE CAMPO.....</b>	<b>59</b>
<b>7.1</b>	<b>Instalação do módulo mestre.....</b>	<b>59</b>
<b>7.2</b>	<b>Instalação dos módulos sensores.....</b>	<b>60</b>
<b>7.3</b>	<b>Instalação do módulo das válvulas.....</b>	<b>63</b>
<b>7.4</b>	<b>Instalação do módulo da casa de bombas.....</b>	<b>65</b>
<b>7.5</b>	<b>Monitoramento e controle da irrigação.....</b>	<b>67</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>70</b>
<b>9</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>71</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A irrigação é uma das técnicas de manejo que mais influencia a produção agrícola (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008) e para seu sucesso econômico é necessário identificar três fatores básicos: quando, quanto e como irrigar. A escolha destes depende de fatores diversos, tais como o tipo da cultura, propriedades do solo e condições climáticas.

A utilização racional da água é um dos grandes desafios da agricultura irrigada, já que 69% do consumo de água doce do planeta se deve à irrigação (SIEBERT *et al.*, 2010). No atual cenário de aumento por demanda de alimentos, a manutenção deste recurso dependerá cada vez mais de técnicas capazes de reduzir desperdícios.

Na região do semiárido brasileiro, as técnicas de economia de água são imperativas, devido à má distribuição pluviométrica presente na região. O estado do Ceará, no anos de 2011, 2012 e 2013, está passando por um dos piores períodos de estiagem dos últimos 50 anos (FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 2013; ROCHA, 2013) e a racionalização da água é fundamental para enfrentar esta adversidade.

A irrigação de precisão tem por objetivo utilizar apenas a quantidade necessária de água para a cultura, aumentando a eficiência do uso da água. Para tanto, são necessárias técnicas e equipamentos capazes de determinar quanto e quando irrigar, baseando-se em informações do solo, planta, e ambiente. Tais dados devem ser monitorados através de sensores para que se possa intervir adequadamente na cultura, pois os mesmos fornecem informações precisas sobre o ambiente monitorado.

Devido à grande extensão de algumas áreas agrícolas, o monitoramento de sensores instalados no campo se torna caro e moroso. O custo com cabos, a dificuldade de instalação e obtenção de dados são empecilhos para o produtor que deseja monitorar sua propriedade. As redes de sensores sem fio (RSSF) destacam-se como alternativa para monitorar campos cultivados, reduzindo o custo com cabeamento, facilitando a instalação e atuando de forma pouco intrusiva no sistema (SANTOS *et al.*, 2008).

Ao se ter uma cultura completamente monitorada por sensores, pode-se utilizar os dados coletados para se automatizar o processo de aplicação de água. O manejo automático da irrigação pode substituir o manual sem prejuízos para a produção e, possivelmente, com redução no consumo de água através da determinação precisa do conteúdo de água no solo (QUEIROZ *et al.*, 2005). O principal objetivo da automação em irrigação é a otimização da

distribuição espacial e temporal da água, minimizando a relação custo do sistema/ganho na produção.

Na medida em que a frequência de irrigação aumenta, o controle da relação solo-água-planta torna-se mais crítico para o sistema de irrigação, seja ele manual ou automático. Um sistema que tenha de manter um nível preciso de água em solo arenoso necessitará de diversas irrigações diárias, para compensar as perdas por evapotranspiração. Assim, atrasos ou perturbações nos turnos de irrigação podem facilmente colocar a planta em situação de stress. Por estes fatores, o controle ideal da irrigação deve ser automático, redundante, robusto e capaz de responder rapidamente a mudanças no: ambiente, quantidade de água no solo ou evapotranspiração (AYARS; PHENE, 2007).

Para que o controlador possa se adaptar corretamente às condições do campo, é necessário que a umidade seja medida frequentemente, utilizando estes dados para adequar a aplicação de água em cada cultura. Este controle é chamado de controle em malha fechada. O controle em malha fechada é diretamente dependente das variáveis medidas ou calculadas por sensores no campo, medindo rapidamente mudanças que ocorrem nas mesmas e atuando para controlá-las. Apesar de sua maior complexidade, a malha fechada garante a capacidade de reação a eventos externos ao sistema de irrigação, tais como chuvas ou outras alterações no ambiente. O sistema de controle também deve garantir uma certa proteção aos componentes do sistema de irrigação evitando: sobrecargas na bomba e na tubulação, desperdícios por perda de carga ou danos no próprio sistema de controle. Desta forma, o objetivo deste trabalho é construir um *software* de controle da irrigação em malha fechada, que utilize uma RSSF para coleta de dados de sensores de umidade do solo. Adicionalmente, todos os dados de umidade do solo serão armazenados em um banco de dados para avaliação do sistema de controle e referência futura.

Este trabalho foi organizado na seguinte estrutura: o capítulo 2 trata dos objetivos do trabalho; o capítulo 3 traz uma revisão de literatura até o estado da arte do controle da irrigação; o capítulo 4 trata dos materiais utilizados e das técnicas de controle empregadas; o capítulo 5 trata do *hardware* utilizado e melhorado durante a execução do trabalho; o capítulo 6 descreve o funcionamento do *software* de controle desenvolvido; o capítulo 7 trata da implantação do sistema de controle em campo e de seus resultados; o capítulo 8 traz a conclusão e, finalmente, o capítulo 9 trata das considerações finais acerca do trabalho realizado e de possibilidades de expansão do mesmo.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Criar um sistema de automação em malha fechada para sistemas de irrigação pressurizada que utilize sensores e atuadores sem fio, inversores de frequência, válvulas *latching* e bombas de irrigação, aumentando a eficiência da irrigação.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Desenvolver um algoritmo de controle em malha fechada para o sistema de irrigação por gotejamento.
- Desenvolver uma plataforma de controle em que diferentes algoritmos possam ser testados e aprimorados, inclusive utilizando inteligência artificial.
- Acumular uma base de dados de medidas de umidade do solo.
- Integrar o algoritmo de controle com a rede de sensores e atuadores sem fio.
- Testar o sistema em campo durante o ciclo de uma cultura de milho.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão abordados conceitos básicos para o entendimento do trabalho a ser desenvolvido, tais como: sistemas embarcados; RSSF; o conceito de agricultura de precisão e como as tecnologias apresentadas podem ser utilizadas na irrigação de precisão. Finalmente, o problema da automação de sistemas será abordado, dando ênfase às formas de implementação de sistemas de irrigação automáticos.

#### 3.1 Sistemas embarcados

Sistema embarcado é uma combinação de *hardware* e *software*, e outras partes adicionais (mecânicas, eletromecânicas ou hidráulicas) projetadas para execução de tarefas específicas (BARR, 1999). Estão presentes dentro de equipamentos que precisem de inteligência como telefones celulares, fornos de micro-ondas ou máquinas fotográficas. Ao contrário dos computadores pessoais capazes de executar inúmeras tarefas, cada sistema embarcado é designado para uma função específica.

A utilização de sistemas embarcados é uma maneira barata de se integrar inteligência a dispositivos. Seu desenvolvimento tem tornando viável a implementação de uma grande variedade de equipamentos (LEE; HSIUNG, 2004). Os nós ou nós sensores, unidades remotas que compõem a RSSF, são vistos como um caso especial de sistemas embarcados.

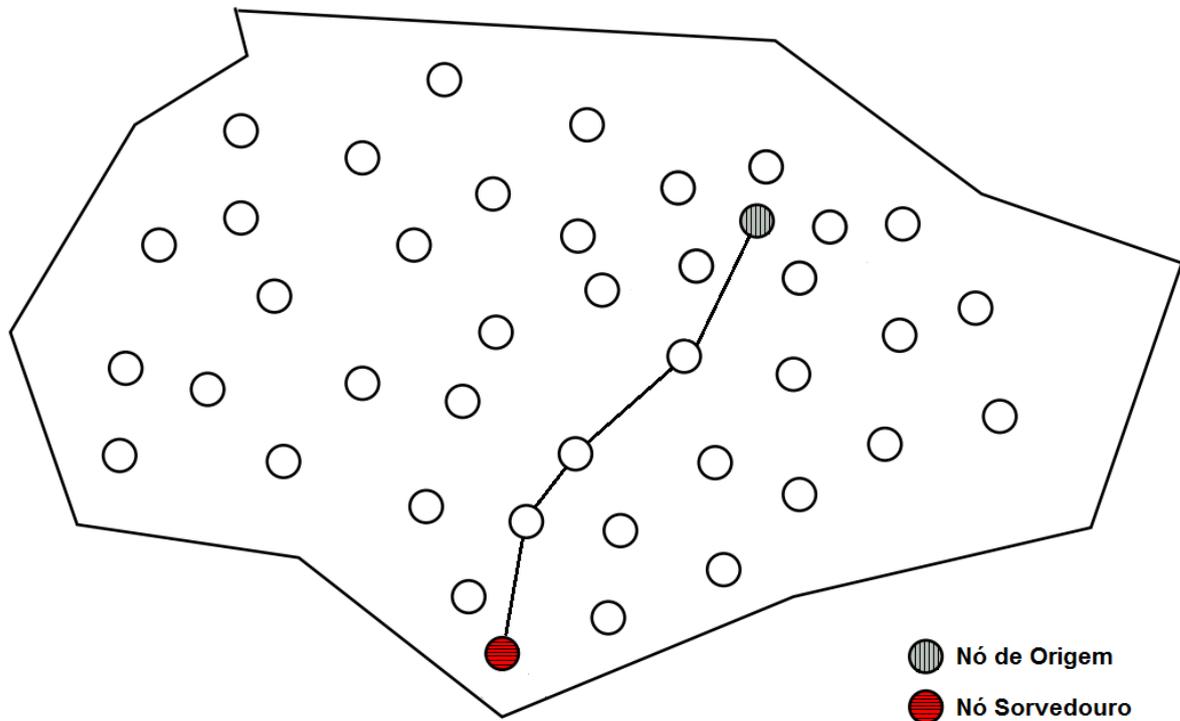
#### 3.2 Redes de sensores sem fio

Redes de sensores sem fio são redes formadas por nós sensores independentes capazes de comunicar-se mutuamente para um determinado fim (LOUREIRO, 2003). Um nó especial nas RSSF é chamado nó sorvedouro. É para este nó que fluem as informações dentro da rede. Um exemplo de RSSF está ilustrado na Figura 1. Neste tipo de rede, o Nó Sorvedouro representa um ponto onde as informações colhidas pela rede são processadas e armazenadas. É comum que este nó tenha um maior poder de processamento ou esteja ligado a equipamentos mais robustos, como um computador ou Controlador Lógico Programável (CLP).

Entretanto, as RSSF possuem algumas limitações, dentre elas a potência de transmissão dos nós da rede, o que limita a distância de comunicação entre dois nós específicos. Para que uma informação chegue de um Nó Origem até um Nó Sorvedouro, ela

precisa “saltar” entre diversos nós, processo chamado de *multi-hop* (múltiplos saltos) (VILLALBA *et al.*, 2009).

Figura 1 – Transmissão de informações em uma RSSF



Fonte: Adaptado de Al-Karaki e Kamal (2004).

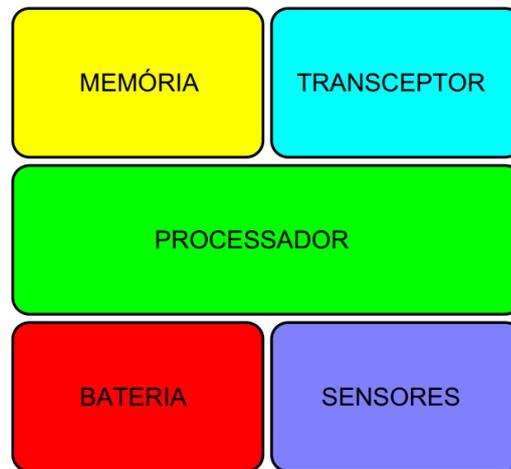
A comunicação entre os nós de uma RSSF é regida por um protocolo de comunicação também chamado de protocolo de roteamento. Os protocolos para RSSF visam minimizar o consumo de energia gasto pela rede ao transmitir a informação ao sorvedouro (WATTEYNE *et al.*, 2011). Pesquisas já definiram diversos padrões para os protocolos de comunicação (IEEE, 2006; HART, 2008; ISA, 2009). Porém, segundo Watteyne (2011), apesar destes esforços, nenhum destes padrões se tornou consenso na comunidade científica.

A unidade básica de uma RSSF é o módulo sensor, composto basicamente por transceptor, Memória, Processador, Bateria e Sensores (Figura 2). O tamanho do módulo do sensor, assim como seu custo, limita a quantidade de cada um desses recursos, possuindo pouca memória (128 kbytes a 1Mbyte), bateria limitada, pouco poder de processamento e transceptores com alcance limitado (SANTOS, 2008).

O principal componente de um módulo sensor são sensores, dispositivos responsáveis pelo monitoramento físico de um fenômeno ambiental, produzindo uma resposta

relativa às mudanças em condições físicas, tais como temperatura, pressão, radiação ou umidade do solo e outros (MEGERIAN *et al.*, 2002).

Figura 2 – Arquitetura do módulo sensor



Fonte: Santos (2008).

Sensores capacitivos do tipo FDR (*Frequency Domain Reflectometer*) foram utilizados neste trabalho para determinar a umidade do solo. A relação entre a capacitância medida pelo sensor e a umidade do solo é uma relação polinomial de 3º grau ou baseado em curvas exponenciais (CRUZ, 2009). Devido à sua limitação de processamento, os módulos sensores não trabalham diretamente com estas equações, delegando o trabalho a um computador com maior poder de processamento.

### 3.3 Agricultura de precisão

Agricultura de precisão é um conceito que propõe um conjunto de novas tecnologias direcionadas ao manejo da agricultura comercial em larga e média escala. Essa nova tecnologia de precisão envolve: computadores pessoais, sistemas de informações geográficas (SIG), sistema de localização por satélite, dispositivos de sensoriamento remoto, controle automatizado de máquinas e comunicação via internet.

A agricultura de precisão é uma estratégia de manejo que utiliza informações sobre o campo para tratar de necessidades específicas de parcelas dentro do mesmo. Nela se deve aplicar taxas precisas de fertilizantes e água, de modo a suprir apenas a necessidade da cultura, evitando desperdícios (MCLELLAN; FRIESEN, 1996). Diversas técnicas são utilizadas para a determinação destas taxas, abrangendo desde o sensoriamento remoto via satélite, até a utilização de sensores em campo.

Informações sobre o solo são necessárias para a agricultura de precisão. O conhecimento de fatores físicos e químicos do solo, tais como: compactação, resíduos da colheita, quantidade de nitrato de nitrogênio, salinidade, pH, etc. são imprescindíveis para a determinação correta da quantidade de insumos a serem aplicados. Muitos destes fatores não podem ser levantados por mapeamentos via satélite ou avião, tornando-se necessária a utilização de sensores de solo ou análise prévia no campo (MORAN *et al.*, 1996).

Nahry, Ali e Baroudy (2011), destacam a rentabilidade da agricultura de precisão em áreas heterogêneas. Aplicando técnicas de dosagem variada de fertilizantes e de água, controle de salinidade e rastreamento da produtividade, foi possível obter um acréscimo de 29.89% nos lucros de uma área irrigada por pivô central.

Dentre as técnicas de agricultura de precisão, destaca-se o controle da quantidade de água aplicada na cultura – chamado de irrigação de precisão. A irrigação de precisão utiliza tecnologias que permitem controlar a aplicação de água de forma precisa dentro do campo, permitindo tratamentos diferenciais de irrigação localizados (MCCARTHY; HANCOCK; RAINE, 2010). Trata-se de um conjunto de técnicas e equipamentos que proporcionam condições para o uso eficiente da água.

Para se alcançar completamente as metas da irrigação de precisão é importante considerar a variabilidade temporal e espacial de atributos do solo e do clima (HATFIELD, 2000). A maioria das técnicas de controle presume que um sistema não varia no tempo e tem uma dinâmica fixa a ser seguida (ZAKNICH, 2005). Pragas, estado de desenvolvimento da cultura, quantidade de sais no solo e o clima variam entre plantios e dentro do mesmo ciclo de plantio, alterando a quantidade ótima de água a ser fornecida para a cultura. Assim sendo, as técnicas de controle tem de ser adaptativas, modificando suas ações de acordo com o estado atual dos parâmetros que o regem (MCCARTHY; HANCOCK; RAINE, 2008; SMITH *et al.*, 2009).

A obtenção do sucesso em um sistema de irrigação de precisão está na definição do local e nas metas específicas que se deseja alcançar, por exemplo: redução dos custos com água e energia; minimização dos impactos ambientais; otimização do valor econômico da água aplicada na irrigação e aperfeiçoamento da produção (rendimento da quantidade e qualidade) (LEONARDI; ROTH, 2009).

O Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA) da UFC vem desenvolvendo trabalhos em irrigação de precisão com o desenvolvimento de um sensor capacitivo para medidas de umidade do solo (SILVA, 2005; SILVA *et al.*, 2005). Durante a calibração dos sensores, foi obtida uma relação exponencial entre o valor de saída do sensor e

o volume de água no solo (CRUZ *et al.*, 2010). O sensor capacitivo foi utilizado em campo para o manejo da irrigação em um plantio de melancia, resultando em um ganho de 16,18% a 26,57% na eficiência da aplicação da água (OLIVEIRA, 2008).

A RSSF foi introduzida no trabalho de Santos (2008), integrando praticidade e agilidade na coleta de dados dos sensores. Cruz (2009) validou este trabalho em campo, testando a coleta de dados em situações adversas como chuvas ou cobertura vegetal. O monitoramento e controle remoto (via internet) agregou praticidade ao sistema, permitindo ao gestor do sistema monitorar ou modificar parâmetros operacionais a qualquer momento (VASCONCELOS, 2011). Uma forma mais sofisticada de calcular o tempo da irrigação baseada em rede neurais foi desenvolvida. Este método foi testado na cultura da melancia, obtendo o mesmo rendimento que o método do balanço hídrico volumétrico (ROCHA NETO, 2012).

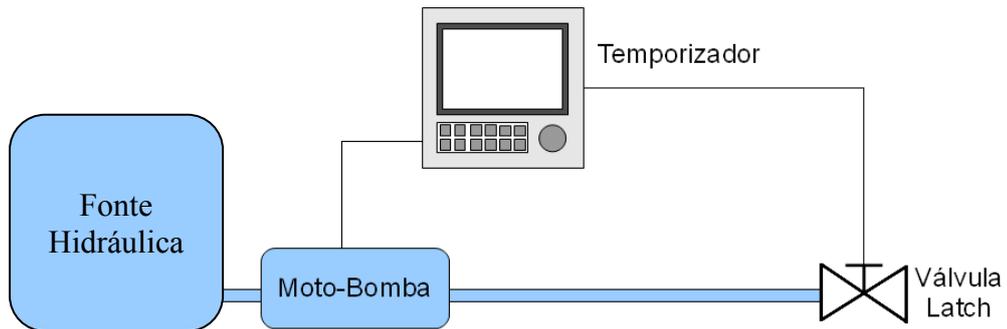
Um sistema de irrigação bem controlado deve otimizar a distribuição espacial e temporal da água. Tradicionalmente, a irrigação é dada por breves períodos de infiltração seguidos por longos períodos de redistribuição da água no solo e de evapotranspiração. Um sistema de automação deve decidir “quanto” e “quando” irrigar. Geralmente o sistema consiste em aplicar água até a capacidade de campo da zona radicular sempre que um déficit significativo de água for encontrado (AYARS; PHENE, 2007).

Como já citado, um sistema que lida com irrigações frequentes deve ser automático, redundante e robusto o suficiente para se adaptar às mudanças no clima e a possíveis falhas em seus componentes. Desta forma, automatizar a irrigação não se resume à escolha dos componentes físicos (válvulas, motores e bombas), mas de coletar e interpretar os dados do solo, da cultura e do clima e utilizá-los para agendar a irrigação baseado em uma estratégia de manejo já definida. Para controlar um sistema complexo como este, as técnicas de controle devem ser analisadas e a mais adequada delas escolhida para implantação.

### **3.4 Teoria do controle**

Os sistemas de controle podem ser divididos em duas grandes categorias: sistemas de malha aberta e sistemas de malha fechada. Em sistemas de controle de malha aberta “[...] não se mede o sinal de saída nem tampouco este sinal é enviado de volta para comparação com o sinal de entrada” (OGATA, 1998), ou seja, um sistema em malha aberta é incapaz de conhecer o resultado de sua atuação, já que não dispõe de sensores que possam medir o estado da variável controlada. A Figura 3 apresenta um sistema de controle em malha aberta.

Figura 3 – Sistema de controle em malha aberta

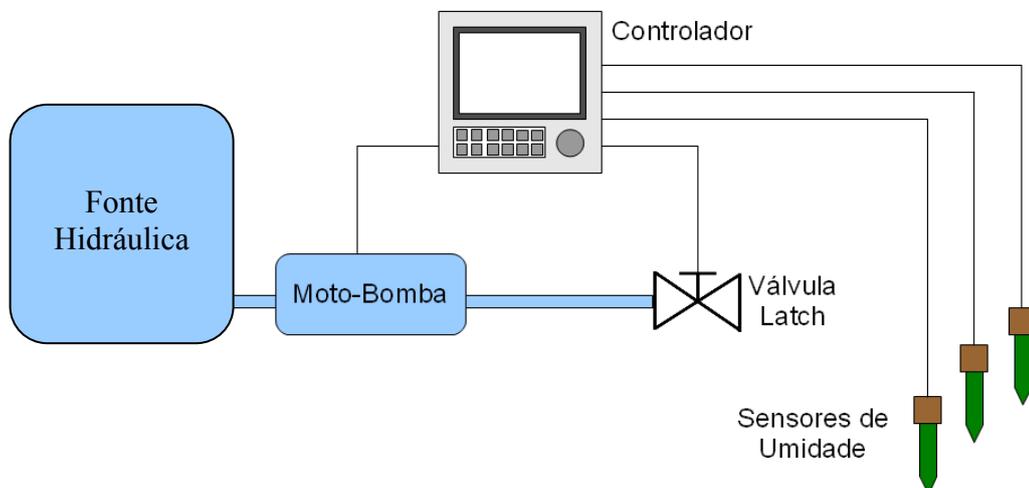


Fonte: Autor.

Um sistema baseado em temporizadores é um exemplo clássico de sistema de malha aberta (Figura 3). Nesse caso, o sistema aciona a bomba e a válvula baseado em horários previamente programados em intervalos predefinidos. O temporizador funcionará independente das condições do sistema e do ambiente. Dessa forma, eventos que poderiam alterar o turno de irrigação, como chuvas, passam despercebidos ao sistema de automação, havendo a necessidade de intervenção manual.

Um sistema de controle de malha fechada (também chamado de sistema de controle com retroação) é “um sistema que mantém uma relação preestabelecida entre a grandeza de saída e a grandeza de referência, comparando-as e utilizando a diferença como meio de controle [...]” (OGATA, 1998). A Figura 4 apresenta um sistema de controle em malha fechada.

Figura 4 – Sistema de controle em malha fechada



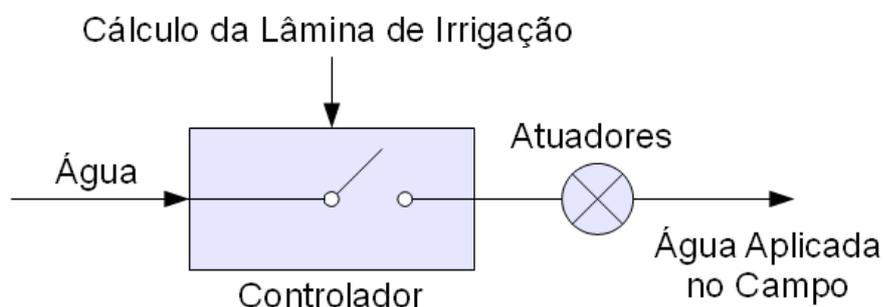
Fonte: Autor.

Um sistema de irrigação baseado em umidade do solo é um exemplo de sistema de controle de malha fechada (Figura 4). A entrada dos sensores de umidade serve de base para o algoritmo de controle, que busca manter a umidade do solo entre níveis predefinidos. Neste sistema, a bomba é acionada quando a umidade estiver abaixo de um ponto crítico, e interrompida quando a umidade atinge um nível satisfatório para o sistema. Eventos externos, como chuvas, não influenciam no desempenho do sistema, pois os sensores detectarão a ocorrência deste fenômeno, modificando os valores de entrada do algoritmo de controle.

### 3.4.1 Controle On/Off

O sistema de controle liga-desliga é o mais simples e o mais utilizado em irrigação. Como o próprio nome já exemplifica, existem apenas dois estados para o sistema, ligado ou desligado. A Figura 5 apresenta um controlador liga-desliga de um sistema de irrigação. Nesse caso, o cálculo da lâmina de irrigação serve de entrada para o controlador, que aciona o sistema por um tempo pré-determinado.

Figura 5 – Sistema de controle liga-desliga



Fonte: Adaptado de Ayars e Phene (2007).

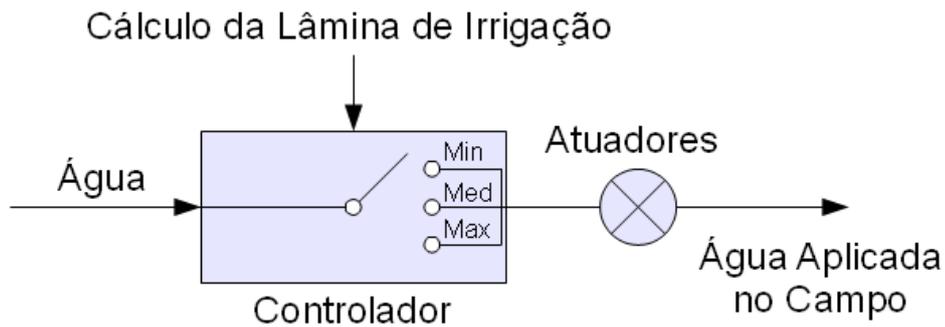
O controle liga-desliga não fornece um mecanismo para controle do volume de água aplicada. O tempo é a única forma de controlar essa quantidade, tornando o controle um pouco mais rústico. Devido à sua simplicidade é o mais fácil e menos custoso de implantar.

### 3.4.2 Controle em níveis discretos

O controle em níveis discretos é mais sofisticado que o controle liga-desliga. O controle do volume de água aplicado é controlado em níveis discretos. Esses níveis podem ser controlados alterando-se diferentes posições de uma válvula, utilizando um fluxômetro ou controlando a rotação de um motor através de um inversor de frequência.

A Figura 6 ilustra um sistema de controle discreto. Nele, são possíveis três níveis de aplicação de água Mínimo (**Min**), Médio (**Med**) e Máximo (**Max**). O sistema escolhe qual dos três níveis aplicar de acordo com decisões de projeto, fornecendo uma aplicação de água diferenciada e baseada em fatores fisiológicos da planta.

Figura 6 – Sistema de controle discreto



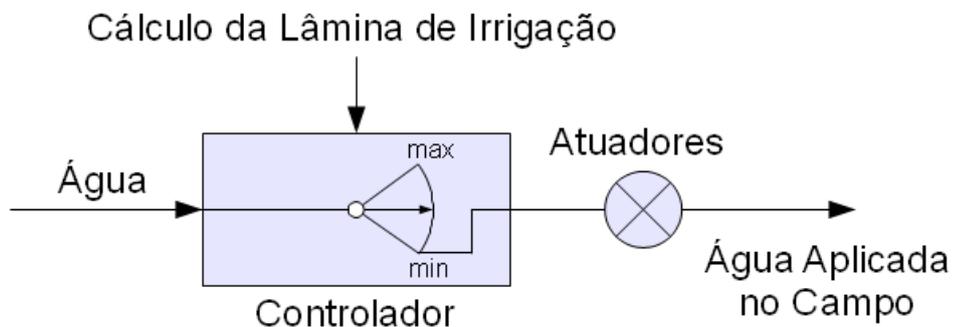
Fonte: Adaptado de Ayars e Phene (2007).

Por ser mais sofisticado, o sistema de controle discreto fornece uma melhor eficiência hídrica, caracterizando-se como um meio-termo entre o controle liga-desliga e o controle contínuo. Quanto mais níveis discretos o sistema possuir, mais ele se aproximará do controle contínuo.

### 3.4.3 Controle contínuo

O sistema de controle contínuo é o mais completo e complexo. Nele a quantidade de água aplicada ou o tempo de irrigação são controlados de maneira contínua, entre valores máximos (**max**) e mínimos (**min**) (Figura 7).

Figura 7 – Sistema de controle contínuo



Fonte: Adaptado de AYARS e PHENE (2007).

As formas de controlar o volume de água são as mesmas do controle discreto: fluxômetro, válvulas ou inversor de frequência. Com o controle contínuo pode-se obter uma melhor eficiência hídrica, utilizando métodos sofisticados para a obtenção do tempo de irrigação, como redes neurais (ROCHA NETO, 2012) ou lógica difusa (GUIFEN; LISONG, 2011).

### **3.5 Estratégias de automação na irrigação**

Uma estratégia ideal para a automação deve modificar o turno de irrigação analisando dados em tempo real como: umidade do solo, clima, estágio de desenvolvimento da cultura, capacidade de campo do solo e salinidade do solo. Porém, devido à complexidade de analisar todos estes fatores em tempo real, surgiram estratégias que utilizam um ou mais deles para determinar a evapotranspiração. Existem três grandes grupos de estratégias para automação na irrigação: Solo-Água, Planta-Água ou Clima-Planta.

Os métodos Planta-Água utilizam sensores caros e são mais adequados a culturas arbóreas. Eles se baseiam no estado da planta para determinar o momento de irrigar. A temperatura das folhas, umidade das folhas (MATESE *et al.*, 2009), diâmetro do tronco (CASADESÚS *et al.*, 2012) ou fluxo de seiva (FERNÁNDEZ *et al.*, 2011) podem servir de variável de controle para a automação.

Os métodos de Clima-Planta utilizam dados meteorológicos ou imagens de satélite para estimar a quantidade de água perdida pelas plantas. São métodos que lidam bem com irrigações de baixa frequência e em grandes áreas homogêneas. Usualmente são utilizados em conjunto com outros métodos para irrigações mais precisas (EARL; THOMAS; BLACKMORE, 2000; MCCARTHY; HANCOCK; RAINE, 2010; NAHRY; ALI; BAROUDY, 2011).

O sistema de controle apresentado neste trabalho é baseado em medidas da umidade do solo, portanto, se enfatizará este método no próximo tópico.

#### **3.5.1 Métodos solo-água**

O solo é composto por componentes gasosos, líquidos e sólidos. A quantidade de gás (ar) no solo é inversamente proporcional à quantidade de líquido (água) presente no mesmo, enquanto a parte do solo permanece aproximadamente constante. Um sistema de irrigação adequado deve balancear a quantidade de ar e água no solo, evitando stress hídrico na cultura, seja por excesso ou falta de água.

A quantidade de água retida difere bastante entre tipos diferentes de solo. A frequência de irrigação também deve variar de acordo com estas características. Em um solo argiloso, pode-se chegar a vários dias sem irrigar (NAHRY; ALI; BAROUDY, 2011) enquanto várias irrigações podem ser necessárias em um solo arenoso (CRUZ, 2009).

#### ***3.5.1.1 Medição do potencial matricial do solo***

O manejo baseado na medida do potencial matricial do solo é uma das técnicas mais antigas de se agendar a irrigação. Os tensiômetros (RICHARDS; GARDNER, 1936) são os equipamentos mais utilizados para esta medição, devido à sua simplicidade e facilidade de instalação. Com a medida do potencial matricial do solo, pode-se extrapolar a taxa de secagem do solo e determinar a data da próxima irrigação.

Na década de 1980 iniciaram-se as primeiras experiências com o controle automático utilizando tensiômetros. Estes sensores foram acoplados a microcontroladores (CARY; FISHER, 1983) e a computadores pessoais (THOMSON; THREADGILL, 1987) de modo que o cálculo do tempo e hora de irrigação passou a ser feito por um algoritmo, ao invés de um operador humano.

O tensiômetro deve ser colocado próximo à zona radicular da planta para o controle em malha fechada. Esta posição não poderá secar abaixo de um limite inferior determinado previamente. Quando o potencial matricial do solo se aproxima desse limite crítico, a irrigação é ativada (PHENE; ALLEE; PIERRO, 1989). Desde então, o tensiômetro tem sido utilizado em sistemas de automação diversos (SMAJSTRLA; LOCASCIO, 1996; QUEIROZ; BOTREL; FRIZZONE, 2008), sendo aprimorado para uma versão eletrônica – que possibilita sua integração em sistemas automáticos (COELHO; TEIXEIRA, 2004).

O tensiômetro é caracterizado por seu custo relativamente baixo. Ainda assim, existem esforços para reduzir mais este custo, tornando esta tecnologia acessível a pequenos produtores (MEDICI *et al.*, 2010). Os grandes problemas do tensiômetro residem em sua manutenção. Sem a devida manutenção logo os tensiômetros começam a apresentar falha, que deve ser tratada pelo algoritmo de controle. O acúmulo sucessivo destas falhas prejudica o resultado final, adicionando uma imprecisão no cálculo do tempo de irrigação.

#### ***3.5.1.2 Medição da umidade do solo***

Ao utilizar a umidade do solo como parâmetro para a automação, o tipo de solo e sua capacidade de campo são as bases para a determinação do tempo de irrigação. A umidade

atual do solo é utilizada como entrada para algoritmos que visam repor o teor de água no solo, como equações de balanço hídrico volumétrico. Atualmente duas tecnologias se destacam para esta medição, elas são a Reflectância no Domínio do Tempo (TDR – *Time Domain Reflectometry*) e a Reflectância no Domínio da Frequência (FDR – *Frequency Domain Reflectometry*).

O sistema TDR funciona medindo-se a velocidade com que uma onda eletromagnética se propaga em um meio, sendo a constante dielétrica do meio a maior influência nesta velocidade. Quanto maior a constante dielétrica, mais devagar a onda se move. Aproveita-se então da grande diferença entre a constante dielétrica do solo seco (3-5) e da água (80) para determinar o teor de água do solo (TOPP; DAVIS; ANNAN, 1980).

O sensor TDR apresenta uma ótima precisão desde o início de sua aplicação (LEDIEU *et al.*, 1986), podendo ser utilizado inclusive para determinar o perfil do molhamento (PELLETIER; TAN, 1993) ou medir a condutividade elétrica do solo (NOBORIO; MCINNES; HEILMAN, 1994). Contudo, estes trabalhos ainda não possibilitaram a automação em malha fechada baseada nos sensores TDR. Devido a seu alto custo e à complexidade dos equipamentos necessários para ler este sensor, ele vem sendo empregado apenas quando se necessita a umidade do solo com altíssima precisão.

Alguns exemplos do uso do TDR são: Avaliação da variação da umidade em um pomar (POLAK; WALLACH, 2001), avaliação da umidade em relação à irrigação por déficit (WANG; LIU; JENSEN, 2012) e avaliação de irrigação parcial na zona radicular (WANG *et al.*, 2012). Em todos estes casos o TDR foi utilizado apenas para avaliar a umidade ao longo de um período, sem fechar a malha de controle do sistema. A principal utilização do TDR se dá na área de pesquisa, pois os sistemas ainda não atingiram um custo e facilidade suficientes para que sejam utilizados em automação (AYARS; PHENE, 2007).

O sistema FDR também relaciona a capacitância do solo com um valor de umidade. Diferente do sistema TDR, que utiliza duas sondas e mede a velocidade que uma onda demora se propagar entre elas, o sistema FDR baseia-se na frequência de carga e descarga de um capacitor cujo dielétrico é o solo (Figura 8).

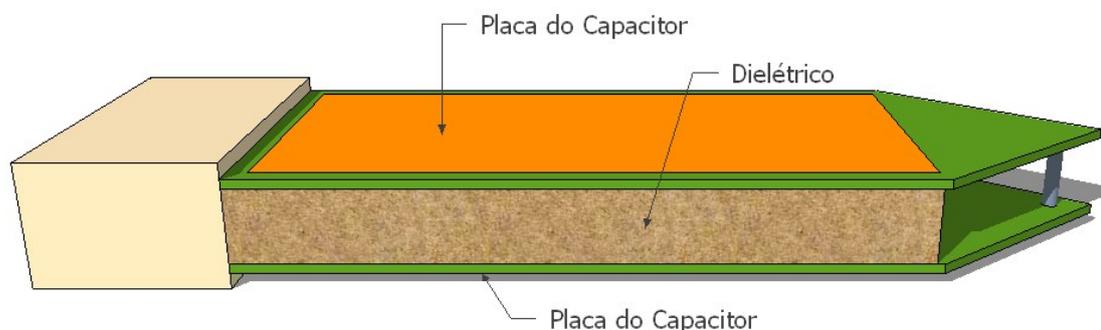
Um circuito oscilador é responsável por submeter este capacitor a ciclos de carga e descarga. A duração de cada um destes ciclos é inversamente proporcional à capacitância do sensor, que é definida pela Equação 1.

$$C \propto \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1)$$

Em que:

$C$  = capacitância,  $A$  = área das placas,  $d$  = distância entre as placas,  $\epsilon_r$  = constante dielétrica do meio e  $\epsilon_0$  = permissividade do vácuo.

Figura 8 – Sensor capacitivo de umidade do solo



Fonte: Autor.

No cálculo da capacitância pela Equação 1, apenas um valor é variável, correspondente à constante dielétrica do meio, já que a área das placas e a distância entre elas são fixas e determinadas no momento da construção do sensor. Assim sendo, a frequência de carga e descarga do capacitor depende diretamente do material entre as placas. Depois de instalado no solo, a quantidade de matéria sólida entre elas sofrerá pouca variação. A maior variação na constante dielétrica será provocada pela passagem ou acúmulo de água nesta região, relacionando a frequência com o teor de água no solo.

Os estudos com o FDR se desenvolveram atrelados a sistemas de controle. A possibilidade de medir a umidade do solo em pequenos intervalos de tempo foi utilizada para agendar o momento de irrigar (LUKANGU; SAVAGE; JOHNSTON, 1999). O tempo de irrigação, neste caso, foi calculado como o tempo necessário para o solo atingir a capacidade de campo.

A utilização destes sensores na automação da irrigação tem dado bons resultados. Porém, para um controle preciso da irrigação, uma grande densidade de sensores instalados no solo é necessária, de modo a detectar e lidar com diferentes propriedades físicas de uma área. Cadeias de sensores foram utilizadas com sucesso para medir precisamente a umidade em um campo de algodão, permitindo um agendamento da irrigação (VELLIDIS *et al.*, 2008).

As RSSF se agregaram aos sensores FDR para possibilitar uma coleta prática e rápida dos dados de muitos sensores ao longo do campo. A localização destes sensores é um parâmetro fundamental para o algoritmo de controle da irrigação. A utilização de GPS para obter um georeferenciamento de cada um dos sensores é uma solução aplicável, porém dispendiosa (KIM; EVANS, 2009). A maioria dos sistemas de controle define simplesmente

subáreas dentro do campo, tratando todos os sensores dentro desta subárea como possuindo uma só localização lógica (DURSUN; OZDEN, 2010).

Esta base teórica mostra que é possível utilizar sensores e atuadores em campo para se obter um sistema de irrigação automático e eficiente. A economia de energia e água fornecida por estes sistemas justificam sua implantação no campo.

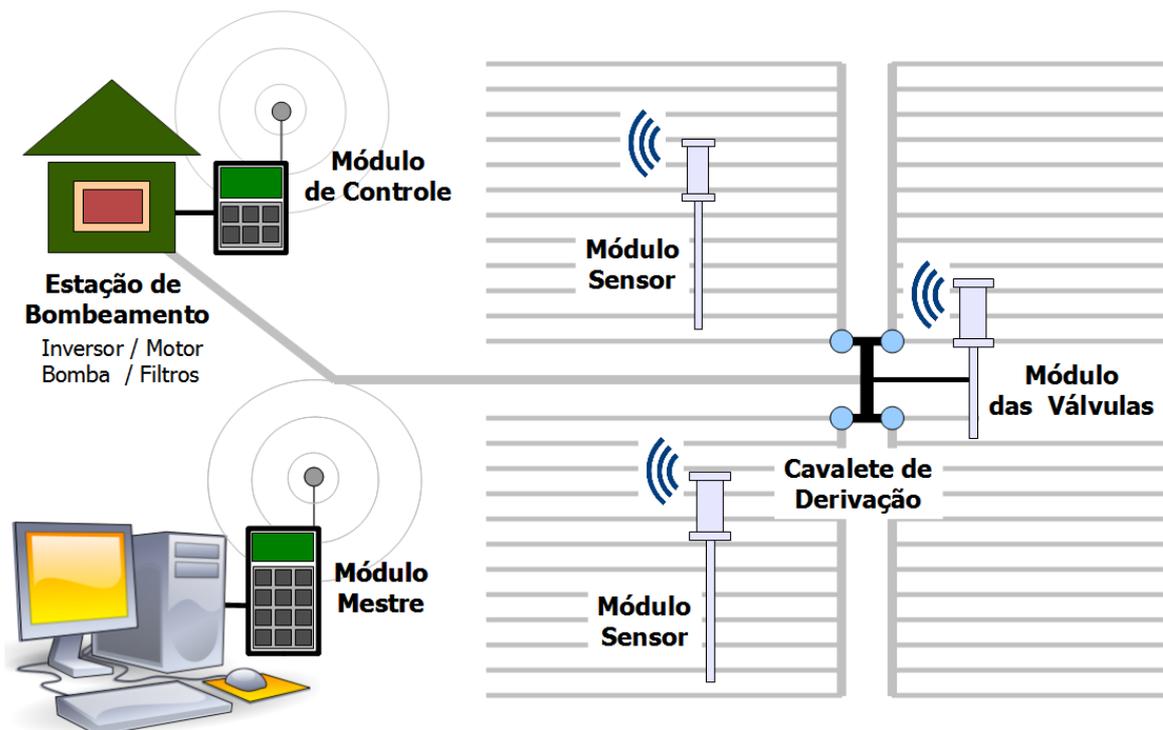
## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordadas as ferramentas e técnicas para a execução deste trabalho. O funcionamento de um sistema de irrigação será explanado, enfatizando-se as estratégias de controle utilizadas para manipular o mesmo.

### 4.1 Visão geral do sistema

O controle de um sistema heterogêneo como um sistema de irrigação não pode ser feita por apenas um equipamento. Sensores de umidade do solo, módulos de comunicação sem fio, módulos de controle, bombas hidráulicas, inversores de frequência e outros são necessários para o controle automático da irrigação. No sistema proposto, os algoritmos e interfaces de controle são alocados em um computador pessoal (PC), o que proporciona uma maior capacidade de processamento, boa quantidade de armazenamento, além de outras vantagens como comunicação via internet (Figura 9).

Figura 9 – Esquema de um sistema de automação da irrigação



Fonte: Autor.

A Figura 9 apresenta uma visão geral do sistema de automação proposto. O cálculo do tempo de irrigação e controle do sistema é centralizado, tendo o computador como

*cérebro* do sistema. É nele em que o software de controle é executado, coletando dados dos sensores e os processando para tomar decisões sobre quando e quanto irrigar. O uso do computador permite montar uma base dados e monitoramento do sistema, alertando o proprietário ou administrador sobre eventos anormais no mesmo (como mau funcionamento da bomba), ou simplesmente armazenando dados sobre: horários de ativação das bombas, tempo de irrigação de cada uma das áreas, umidade do solo ao longo do dia etc.

O Módulo Mestre é acoplado ao PC por uma conexão serial ou USB (*Universal Serial Bus*), ele é o nó raiz ou sorvedouro da RSSF, sendo necessário como interface de comunicação entre o PC e os módulos sem fio presentes no campo. É através do mestre que os comandos lógicos para abrir válvulas, ligar bombas ou ler sensores no campo são transformados em pacotes de rede, que por sua vez são transmitidos através dos módulos.

O Módulo de Controle está na casa de bombas e é responsável por acionar um inversor de frequência e controlar a velocidade de rotação do conjunto moto-bomba. Outra responsabilidade deste módulo é o monitoramento da pressão no sistema hidráulico, garantindo a pressão necessária para a irrigação.

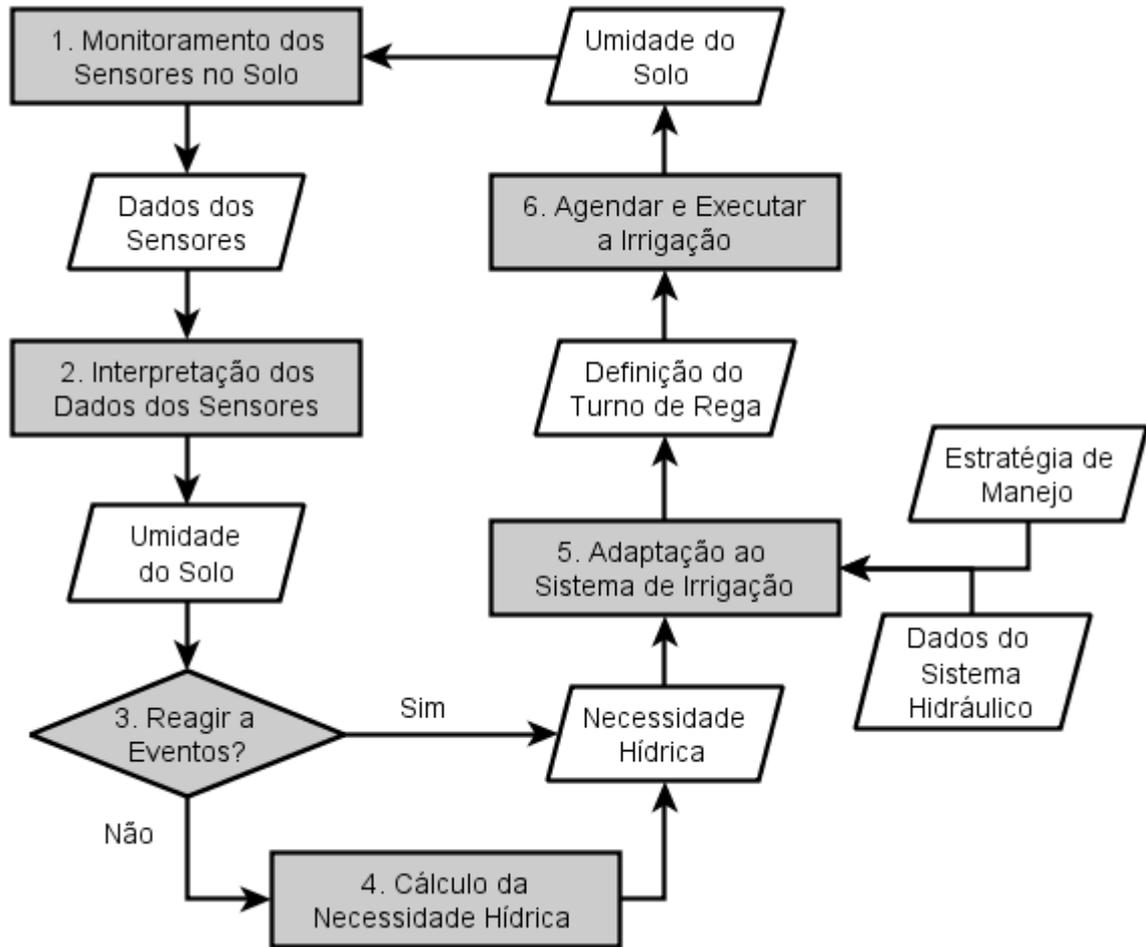
O Módulo das Válvulas se encontra no campo ao lado do cavalete de derivação, controlando as quatro válvulas que dividem a plantação em áreas de irrigação. Este módulo ainda dispõe de sensores de pressão que serão utilizados para monitorar a pressão de serviço após cada uma das válvulas, garantindo a vazão dos emissores.

Os Módulos Sensores serão instalados no campo, onde medirão a umidade do solo através dos sensores capacitivos FDR. Cada módulo é capaz de ler até três sensores, que podem ser instalados a diferentes profundidades, dependendo da cultura a ser monitorada. As informações dos sensores deverão ser enviadas para o módulo mestre periodicamente, fechando a malha do sistema de controle.

## **4.2 Algoritmo de controle**

O algoritmo de controle é parte fundamental de um sistema de automação, pois ele irá reger os outros componentes do mesmo. Casadesus *et al.*(2012) propuseram um algoritmo interessante e generalista para o controle em malha fechada de um sistema de irrigação por gotejamento em plantios arbóreos. Com algumas adaptações aplicadas ao algoritmo, pode-se adequá-lo a qualquer cultura, sistema de irrigação e/ou estratégia de manejo (Figura 10).

Figura 10 – Fluxograma de um algoritmo de controle da irrigação

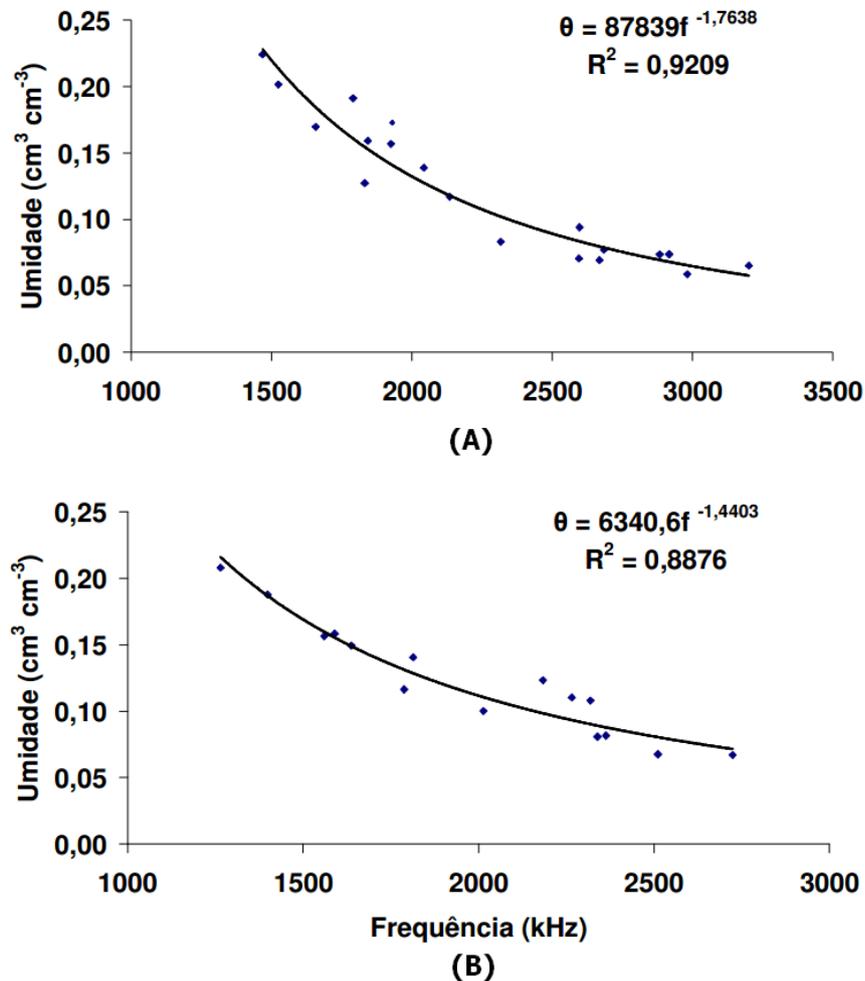


Fonte: Adaptado de Casadesus *et al.*(2012).

O passo 1 (Monitoramento dos Sensores no Solo) deve ser feito em intervalos pequenos (5 ou 10 minutos) para solos arenosos. Os sensores neste trabalho são do tipo FDR, e sua resposta é dada pela frequência de um sinal em onda quadrada. A leitura deste sinal é feita pelo módulo sensor, que conta a quantidade de pulsos a cada 200 ms e envia esta quantidade de pulsos para o computador. O sinal do sensor no solo utilizado varia de 1700 kHz (solo seco) a 800 kHz (solo encharcado).

No processo 2 (Interpretação dos Dados dos Sensores), traduz-se a leitura do sensor (kHz) para um valor de umidade do solo em base de volume ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ). Cruz (2009) elaborou uma equação potencial que relaciona tais fatores (Figura 11), sendo a calibração dos parâmetros da equação dependente das características físicas e químicas do solo. Os sensores deverão ser calibrados para cada tipo de solo em que serão instalados.

Figura 11 – Relação entre teor de água do solo e respostas dos sensores capacitivos FDR a 10 cm de profundidade (A) ou 30 cm de profundidade (B)



Fonte: Cruz (2009).

O 3º processo (Reagir a Eventos) é executado pelo cérebro do sistema, o computador. É neste momento que é verificado se ocorreram eventos adversos, como mau funcionamento de algum equipamento (válvula ou bomba) ou chuvas. Eventos são detectados por variações na umidade do solo e na pressão do sistema. Ao ocorrerem, o sistema de controle deve reagir adequadamente, pulando a etapa de cálculo da reposição de água.

O passo 4 (Cálculo da Necessidade Hídrica) é bem simples de ser calculado quando se utilizam os dados dos sensores de umidade do solo e conhecendo-se a capacidade de campo (Equação 2). A necessidade de irrigação, neste caso, será simplesmente a quantidade necessária para se passar da umidade atual ( $\theta_{\text{atual}}$ ) para a capacidade de campo.

$$\Delta\theta = \theta_{\text{CC}} - \theta_{\text{atual}} \quad (2)$$

Onde:  $\Delta\theta$  representa a necessidade hídrica do solo;  $\theta_{CC}$  é a umidade na capacidade de campo em  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ ;  $\theta_{\text{Atual}}$  é a umidade atual em  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ .

No processo 5 (Adaptação ao Sistema de Irrigação), deve-se definir o tempo de irrigação necessário para que o solo atinja a capacidade de campo. A necessidade hídrica juntamente com dados sobre o sistema hidráulico e a estratégia de manejo da cultura são o arcabouço necessário para que esta decisão seja tomada. Em sistemas de gotejo, o tempo de irrigação é definido por (3).

$$T_{(h)} = \frac{\Delta\theta_{(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})} Z_{(\text{mm})} EL_{(m)} EE_{(m)}}{Q_{(L/h)} E_a} \quad (3)$$

Onde: T representa o tempo de irrigação em horas;  $\Delta\theta$  é a necessidade hídrica em  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ ; EL é o espaçamento entre linhas em m; EE é o espaçamento entre emissor em m; Q a vazão por emissor em  $\text{L h}^{-1}$ ,  $E_a$  a eficiência de aplicação e Z a profundidade de aplicação da lâmina em mm.

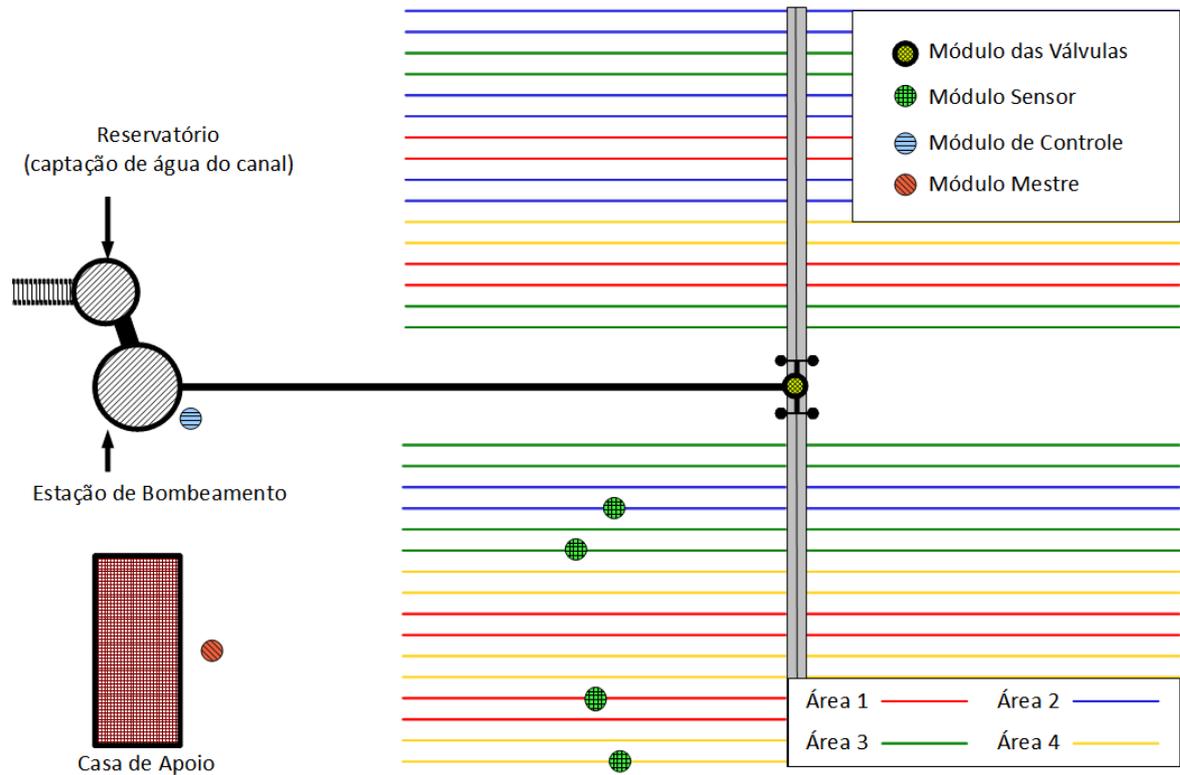
O passo 6 (Agendar a Execução da Irrigação) consiste efetivamente na aplicação de água no campo. Deve-se comandar os dispositivos de modo que a água seja aplicada no campo. Um comando com o tempo de irrigação deve passar do computador para o Módulo Mestre, que o enviará, via RSSF, para uma válvula a ser aberta no campo. Após isso, outro comando será enviado para o Módulo de Controle, que acionará a bomba através do inversor de frequência. Após o tempo calculado no passo anterior, o sistema deve desligar a bomba e fechar as válvulas em campo.

### 4.3 Área experimental

A área experimental utilizada neste projeto está localizada no Perímetro Irrigado do Baixo Acaraú, localizado no Estado do Ceará a 210 km da capital Fortaleza ( $3^{\circ}07'13''$  de latitude Sul e  $40^{\circ}05'13''$  de longitude Oeste). Conta com uma casa de apoio, uma casa de bombas e um campo cultivado de 1 hectare (Figura 12).

Na Figura 12 está esquematizada a distribuição dos módulos remotos no campo. O módulo mestre se encontra na casa de apoio, acoplado ao PC. O módulo de controle do inversor está na casa de bombas. Posicionados no campo, tem-se o Módulo das Válvulas e os Módulos Sensores. O Módulo das Válvulas está posicionado no centro da área experimental, enquanto os módulos sensores são distribuídos ao longo da plantação. Os módulos sensores devem ser aplicados em grande quantidade, para se ter a certeza de uma leitura correta da umidade do solo, mesmo com falha em um ou mais deles.

**Figura 12 – Área experimental**



Fonte: Autor.

A irrigação no lote experimental se dá da seguinte forma: a água do canal é estabilizada no reservatório, bombeada por um conjunto motor-bomba de 3 CVs através de uma adutora de PVC de 75 mm até um cavalete derivador dotado de quatro válvulas. O fluxo é então direcionado por quatro linhas de derivação de 66,0 m com tubos de PVC de 50 mm e 72 linhas laterais de 55 m. Tais linhas são formadas por tubos de polietileno de 17 mm dotados de gotejadores a cada 30 cm, com vazão de  $1,49 \text{ L h}^{-1}$  a uma pressão de serviço de 80 kPa. A lâmina de irrigação é definida mediante demanda do solo, para uma das quatro sub-regiões, caracterizadas por tratamentos diferenciados no manejo da irrigação. Por se tratar de uma área experimental, o sistema foi montado com a distribuição aleatória das linhas de gotejadores para cada tratamento.

#### 4.4 Plataforma de desenvolvimento do *software*

Um *software* de controle da irrigação deve ser geral o suficiente para trabalhar com diversos sistemas de irrigação pressurizada, como: aspersão, gotejamento ou micro aspersão. Além disso, cada lote terá diferentes especificações podendo, inclusive, ter mais de um tipo de cultura ligado ao mesmo sistema de distribuição de água. Todas estas variáveis

apontam para um *software* modular, multi-plataforma e com alta capacidade de expansão. A linguagem Java foi escolhida para o desenvolvimento deste trabalho por atender todas estas características, além de ser gratuita e de grande aceitabilidade no mercado.

Adicionalmente, precisa-se de um ambiente de desenvolvimento que seja adequado para a linguagem e que forneça ferramentas para agilizar o desenvolvimento do *software* de controle. Preferencialmente, esse mesmo sistema deve permitir ao desenvolvedor controlar a versão do *software* e construir interfaces gráficas de maneira visual. O IDE Eclipse possui todos estes fatores, acoplados através de plug-ins como: *jigloo* para construção de interfaces gráficas do usuário e *subclipse* para o controle de versão de *software*.

O armazenamento de dados de umidade do solo e pressão do sistema hidráulico é outro ponto a que este projeto se propõe. Para tanto, precisa-se utilizar um sistema de gerenciamento de banco de dados, permitindo um acesso tanto local quanto remoto à grande quantidade de dados que será acumulada ao longo do tempo. O banco de dados MySQL foi escolhido por também ser uma alternativa gratuita, rápida e de multi-plataforma. Por ser mantido pela mesma empresa do Java (Oracle), permite uma fácil integração entre aplicação e dados, evitando possíveis falhas na integração e comunicação entre eles.

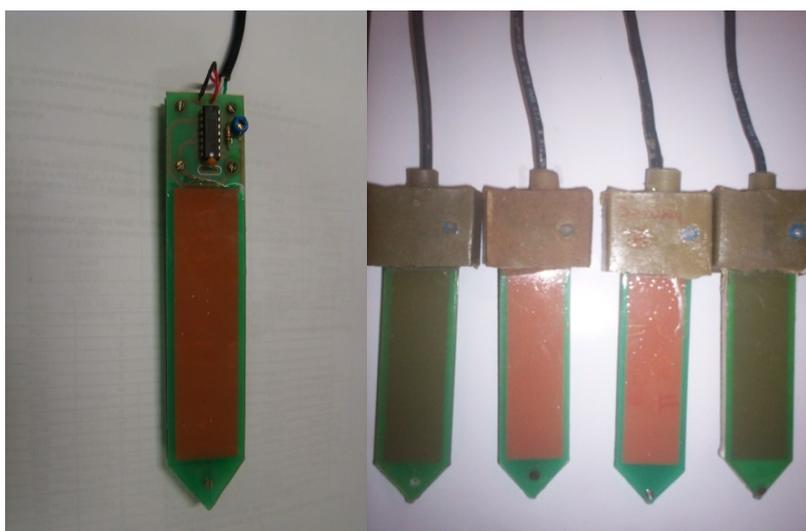
## 5 CARACTERIZAÇÃO DO *HARDWARE*

Este capítulo trata do *Hardware* utilizado e desenvolvido durante o trabalho. A maioria dos circuitos passou por mudanças e aperfeiçoamentos e estão aqui explanados na versão final que foi a campo.

### 5.1 Sensores capacitivos de umidade do solo

O Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA) da Universidade Federal do Ceará (UFC) desenvolveu um sensor capacitivo de umidade do solo de baixo custo (SILVA *et al.*, 2005) e o tem utilizado com êxito para manejo e controle da irrigação (SANTOS *et al.*, 2008; CRUZ *et al.*, 2010; ROCHA NETO, 2012). Os sensores são compostos por duas placas paralelas e um circuito de controle (Figura 13).

Figura 13 – Sensores capacitivos de umidade do solo



Fonte: Santos (2008).

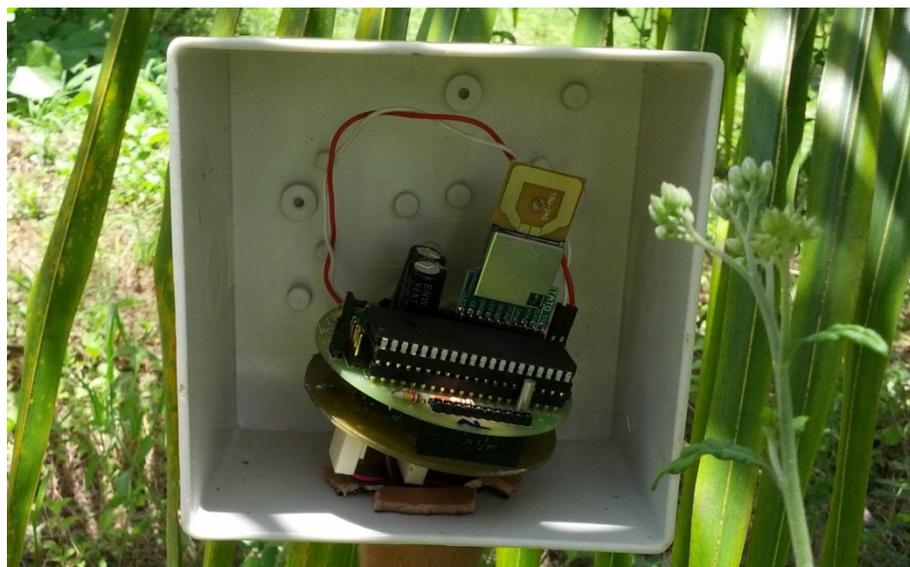
### 5.2 Módulo Sensor

O Sensor é composto de um módulo de comunicação remota e uma placa de multiplexação dos sensores. O módulo de comunicação é um dos elementos básicos para a transmissão de dados sem fio pelo sistema, contendo microcontrolador e transceptor. Os dados enviados via rádio são capturados pelo transceptor e tratados no microcontrolador, onde se transformam em comandos transmitidos por uma interface de *hardware* para comunicação com outros dispositivos (pinos de I/O, analógicos, alimentação etc.).

Seu trabalho acontece de maneira reativa, lendo sensores, transmitindo comandos ou dados apenas quando solicitado pelo módulo mestre. O protocolo utilizado para comunicação sem fio foi desenvolvido por Santos (2008) e utiliza um tamanho de pacote adequado ao *buffer* do transceptor (16 bytes). O pacote enviado ao módulo sempre contém algum comando, que definirá atividade atual do mesmo. O pacote de retorno consiste em uma resposta ao comando que pode ser uma confirmação de recebimento ou dados de sensores.

Nos intervalos ociosos o módulo trabalha em um estado de baixo consumo de energia denominado modo *sleep*, o que aumenta consideravelmente o tempo de vida da bateria. No campo, alguns dos módulos podem possuir uma fonte de alimentação solar para o carregamento contínuo de sua bateria, proporcionando uma sequência ininterrupta na coleta dos dados. A Figura 14 ilustra o módulo remoto.

Figura 14 – Módulo de comunicação remota



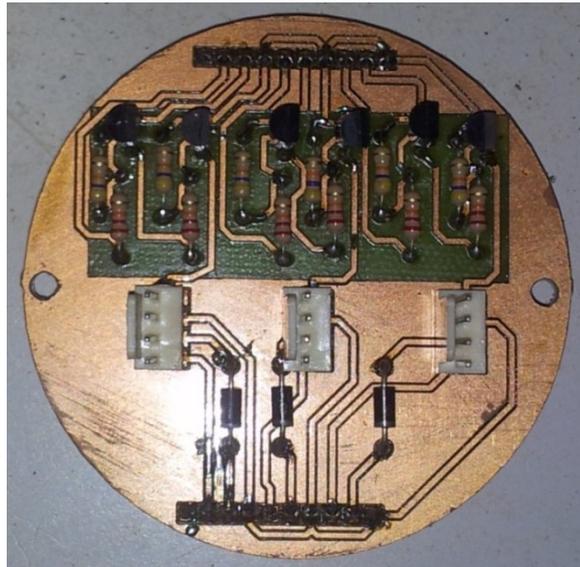
Fonte: Autor.

### 5.3 Multiplexação dos sensores

O módulo sensor é responsável pela leitura dos dados dos sensores em campo e consiste de uma placa do módulo remoto e uma placa de multiplexação de sensores. Para economizar energia, deve-se energizar os sensores apenas no momento da leitura, deixando-os ociosos no resto do tempo. Outra limitação é o sinal do sensor de umidade do solo, que só pode ser lido por dois pinos do micro utilizado. Assim, foi desenvolvida uma placa de multiplexação dos sensores, que é acoplada ao módulo remoto e alterna a alimentação de cada um deles (SANTOS, 2008).

A placa multiplexadora (Figura 15) tem capacidade de conectar até três sensores, permitindo monitorar as condições de umidade do solo em três diferentes perfis de profundidade. O conector utilizado tem 4 pinos, sendo dois para a alimentação, um para entrada de frequência do sensor de umidade do solo e uma outra entrada analógica, que pode ser utilizada para sensores de temperatura, umidade do ar, carga da bateria, etc.

Figura 15 – Placa multiplexadora dos sensores

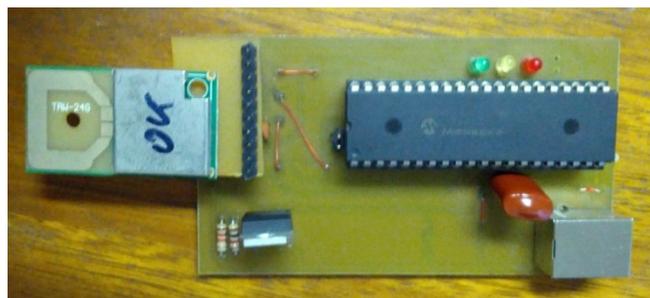


Fonte: Adaptado de Santos (2008).

#### 5.4 Módulo mestre

A estação base ou Módulo Mestre (Figura 16) tem a função de intermediar a comunicação entre os módulos remotos e o PC, seja enviando comandos ou colhendo dados dos sensores. Os comandos chegam ao Módulo Mestre através de uma conexão USB, que os envia na forma de pacotes de dados através da RSSF, estabelecendo uma comunicação com os módulos em campo.

Figura 16 – Módulo mestre



Fonte: Autor.

## 5.5 Inversor de frequência

Os inversores de frequência são equipamentos comumente utilizados na indústria cuja principal função é controlar a velocidade de um motor. Eles atuam reduzindo a frequência de entrada da rede elétrica (60 Hz) para uma frequência adequada à velocidade do motor naquele momento. Assim, é possível reduzir as perdas por energia excedente e, conseqüentemente, reduzir o consumo de energia do conjunto moto-bomba. A quantidade de energia economizada pode chegar a até 40% em alguns casos (CARVALHO *et al.*, 2000).

A economia de energia, por si só, já é justificativa para empregar o inversor em sistemas de irrigação de precisão. Entretanto, o inversor dispõe de mais vantagens como: controle de corrente máxima, aceleração e desaceleração (muito importante para economia de energia, já que evita o pico de tensão que ocorre ao se ligar um motor AC por partida direta), proteção elétrica do motor e fácil integração com sistemas de automação. Neste trabalho foi utilizado um inversor modelo VFD-E de 5 CV (Figura 17)

Figura 17 – Inversor de frequência

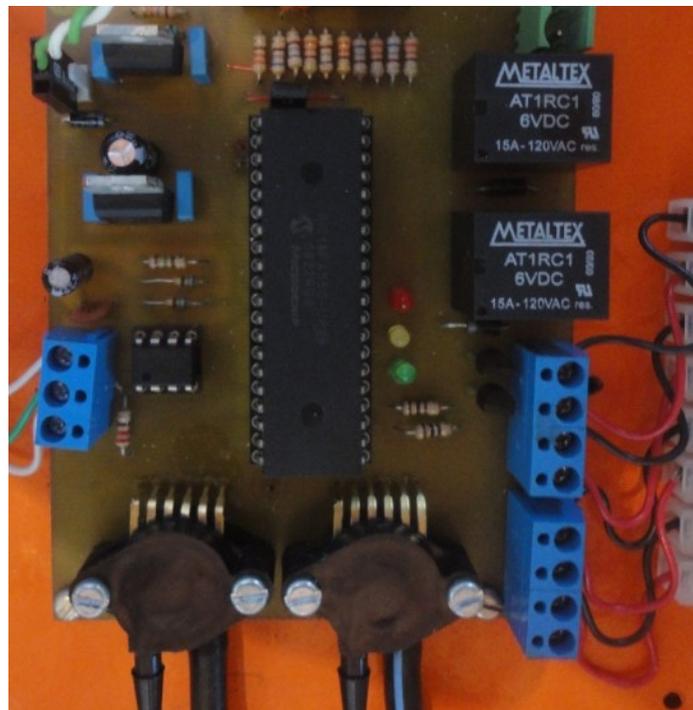


Fonte: Autor.

## 5.6 Módulo de controle do inversor

O Módulo de Controle do Inversor (Figura 18) é necessário para transformar os comandos que chegam através de RSSF em comandos para alterar a velocidade do conjunto moto-bomba. A comunicação entre o inversor e o módulo de controle é feita através do protocolo ModBus (RS485), projetado para situações em que existe muito ruído, como ambientes industriais. A placa de controle utiliza um Circuito Integrado SN75176 para o acoplamento do microcontrolador com o inversor de frequência, já que a tensão utilizada por cada um dos aparelhos é diferente.

Figura 18 – Módulo de controle do inversor

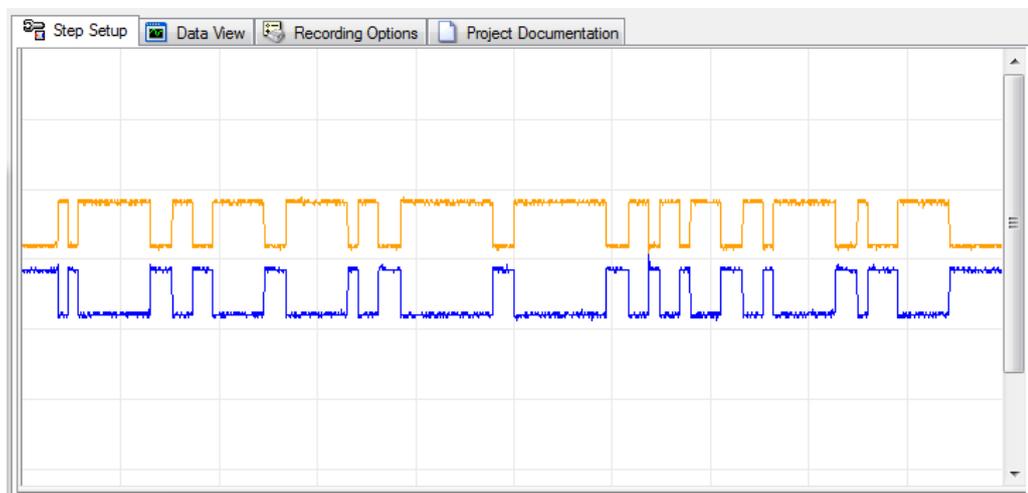


Fonte: Autor.

**O protocolo ModBus trabalha com o envio de dois sinais complementares que devem seguir preferencialmente em um cabo par-trançado entre os dispositivos, no caso, o inversor e a placa de controle (**

Figura 19). Os ruídos que surgirem no sinal são atenuados por essa configuração e são mais facilmente eliminados pelos comunicantes, permitindo uma grande distância entre os mesmos e boa imunidade a ruídos.

Figura 19 – Sinal transmitido na comunicação RS485



Fonte: Autor

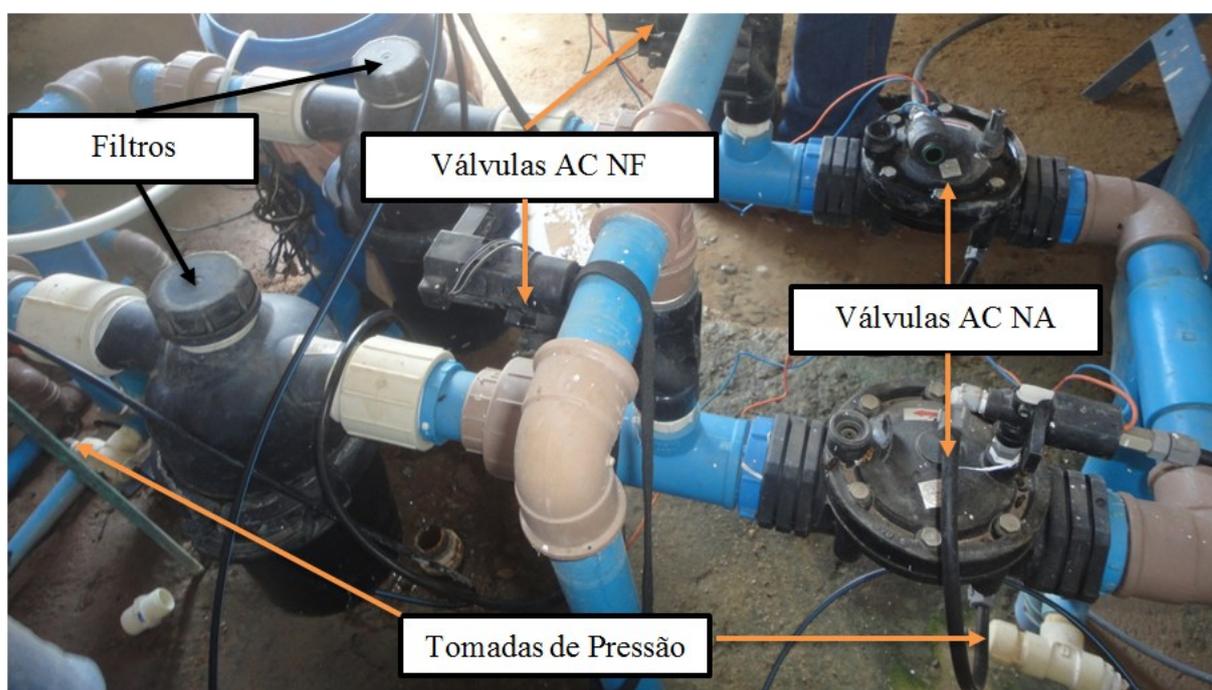
Através do Modbus, pode-se alterar qualquer um dos registrados do Inversor de Frequência, o que permite uma grande flexibilidade no controle do conjunto moto-bomba. Pode-se alterar a velocidade de rotação de um motor de 0 a 600 Hz, com um passo de 0.01 Hz. Por questões de segurança, um motor não deve passar de 60 Hz quando acoplado a um conjunto moto-bomba de irrigação, pois o excesso de velocidade pode causar danos às partes mecânicas do mesmo.

Para medir a pressão no recalque da bomba antes e depois do sistema de filtragem, o Módulo de Controle do Inversor dispõe de dois sensores MPX5500, capazes de medir uma pressão de 0 a 500 kPa. É importante conhecer a pressão após o sistema de filtragem para garantir que as válvulas e bombas tenham sido acionadas e que a velocidade de rotação atual do motor é suficiente para fornecer a pressão adequada no cavalete de derivação.

A diferença entre a pressão antes e após o sistema de filtragem é a perda de carga entre os filtros, que deve ser mantida dentro de limites aceitáveis. Uma perda de carga elevada denota um sistema de filtragem muito sujo, que precisa passar por um processo de limpeza para que tenha uma melhor eficiência. A limpeza comum exige a remoção dos filtros para manutenção, aumentando os gastos com mão de obra e criando a necessidade de se parar o sistema de irrigação para realização da limpeza. Em um sistema de automação, que se propõe a operar dias ou meses sem intervenção humana, a limpeza dos filtros deve ser automática, sendo necessário montar um sistema de retrolavagem.

As válvulas utilizadas na retrolavagem utilizam solenoides AC de 24 V, que controlam seu acionamento quando submetidos a uma corrente, cuja passagem é controlada pelo microcontrolador através de relés. As válvulas AC normalmente abertas (NA), permitem a passagem de fluxo até que a chave do sistema seja fechada, causando o fechamento da válvula, o oposto ocorre com as válvulas AC normalmente fechadas (NF). Para o sistema proposto, as válvulas NA foram instaladas antes dos filtros e controlam o fluxo normal do sistema, enquanto as válvulas NF controlam a saída da água utilizada na retrolavagem (Figura 20).

Figura 20 – Sistema de filtragem e retrolavagem



Fonte: NUNES *et al.* (2013)

O módulo de controle foi desenvolvido para atuar com dois filtros, configuração comum em sistemas de irrigação de pequeno porte. Assim, quando há necessidade de lavar um dos filtros, a água continua a passar pelo outro, mantendo um funcionamento ininterrupto do sistema de irrigação.

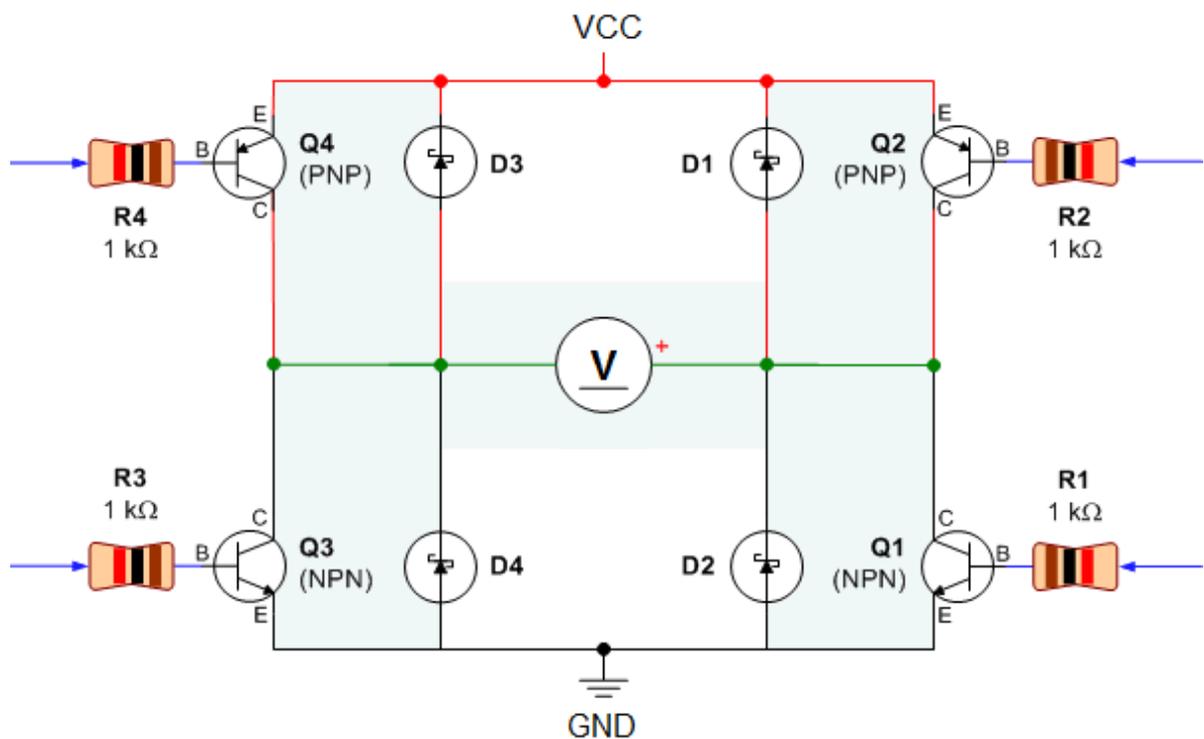
### 5.7 Módulo das válvulas

A última placa de circuito que será utilizada no experimento tem a função de controlar válvulas de irrigação do tipo *latching* e é chamada de Módulo das Válvulas. Um *latch* é um tipo especial de circuito que apresenta memória, e troca seu estado quando percebe uma mudança em seu sinal de entrada. As válvulas do tipo *latching* são válvulas hidráulicas

que possuem um solenoide que responde a pulsos de corrente contínua (DC). Aplicando a corrente em um sentido, abre-se a válvula, aplicando o sinal DC na polaridade inversa, fecha-se a válvula.

O controle de válvulas *latching* é um pouco mais complicado que o controle de válvulas AC, pois inverter uma corrente contínua não é um processo trivial. É necessário construir uma Ponte H, circuito clássico em eletrônica destinado ao controle de motores DC e aplicado no controle da abertura e fechamento das válvulas *latching* (Figura 21).

Figura 21 – Esquemático da Ponte-H



Fonte: Adaptado de COOK (2012).

O objetivo da ponte-H é fazer com que a corrente vá do ponto VCC (Alimentação) ao ponto GND (terra) passando pela válvula V. Para isso, utilizam-se os transistores Q1-4, que devem ser acionados nos pares: Q1-Q4 e Q2-Q3. Ao se acionar o par Q2-Q3, possibilita-se a passagem de corrente no sentido direto, onde a corrente positiva vindo de VCC entra no solenoide pelo polo positivo, abrindo a válvula. Já ao se acionar o par Q1-Q3 o oposto ocorre, a corrente positiva entra no solenoide através do polo negativo, provocando o fechamento da válvula.

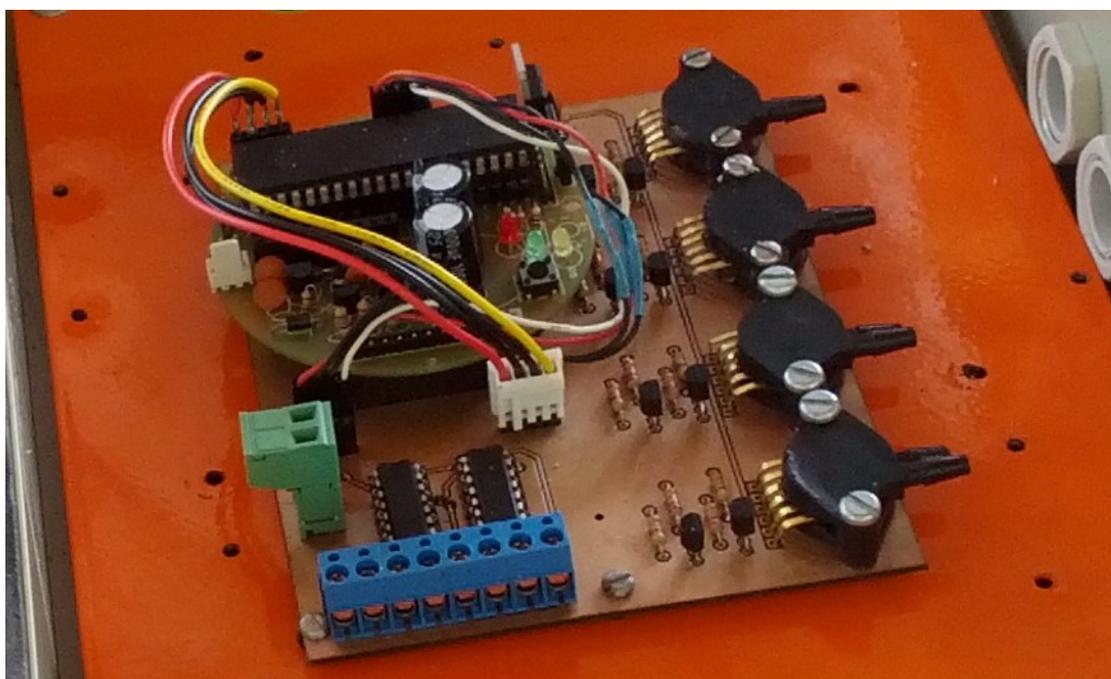
O CI L293D foi utilizado neste trabalho para o acionamento de válvulas, consistindo de quatro meias Ponte-H e capaz de controlar até duas válvulas. O máximo de corrente suportada pelo mesmo é de 600 mA em regime contínuo ou 1,2 A de corrente de pico

em até 100  $\mu$ s, sendo suficiente para os solenoides acionados no experimento. Válvulas *Latching* que necessitem de corrente mais elevada podem utilizar o CI L298, que já possui dissipadores de calor integrado e é capaz de suportar correntes de até 4 A.

As válvulas *latching* propiciam uma grande economia de energia, pois, ao contrário das válvulas tradicionais que precisam permanecer energizadas durante o tempo de irrigação, este tipo de válvula exige apenas um pulso de tensão para alternar seu estado entre aberto e fechado. Como a economia de energia é um fator preponderante em RSSF, as válvulas *latching* são ideais para o controle remoto, já que os módulos são alimentados por baterias e/ou painéis solares, possuindo disponibilidade limitada de energia.

A placa confeccionada pode acionar até quatro válvulas *latching*, valor escolhido por ser comum em cavaletes de derivação (Figura 22). Para a comunicação sem fio, utilizou-se o módulo remoto, demonstrando sua flexibilidade ao ser utilizado para o controle de diferentes equipamentos no sistema. Quatro sensores de pressão do modelo MPX5500 monitoram cada uma das válvulas em campo, verificando se as mesmas foram acionadas corretamente e se o sistema está realmente fornecendo a pressão necessária para a eficiência da irrigação.

Figura 22 – Módulo das válvulas



Fonte: Autor.

Todos estes equipamentos em conjunto permitem o controle total do sistema de irrigação, desde a leitura de umidade do solo, passando pelo bombeamento e chegando até as

válvulas em campo. A interligação de todos estes dispositivos é possível através de um *software* centralizado que os coordenará e garantirá a correta aplicação de água na planta.

## 6 SOFTWARE DESENVOLVIDO

Este capítulo apresenta o software de controle da irrigação desenvolvido nesta dissertação. A funcionalidade do *software* é explicada em detalhes, seguindo a sequência que um operador deverá seguir para configurar um novo sistema de irrigação.

### 6.1 Visão geral do *software*

O *software* de controle automático da irrigação está ilustrado na Figura 23. Uma abordagem baseada em abas foi escolhida, pois ajuda a modularizar o sistema, facilitar o desenvolvimento e posterior manutenção. A tela inicial, vinculada à aba “Status do Sistema”, exibe algumas informações importantes sobre o funcionamento e estado atual do *software*. Ela permite a troca do controle automático para o manual e disponibiliza botões para ativar as diferentes etapas do controle automático.

Figura 23 – Tela inicial do *software* de controle da irrigação



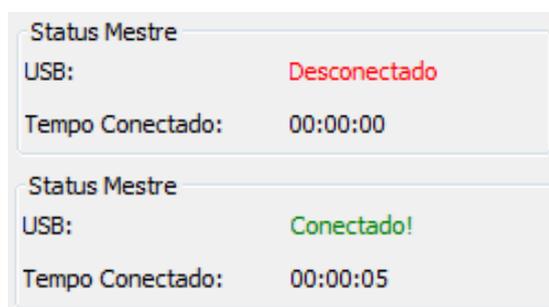
Fonte: Autor.

As outras abas ilustradas na Figura 23 contêm as demais funcionalidades do sistema. A aba “Módulos Sensores” trata do cadastro de módulos remotos e do envio de comandos para leitura dos sensores de umidade do solo. A aba “Bombas” trata do controle das estações de bombeamento do sistema e leituras de pressão. A aba “Cavaletes de Válvulas” trata dos cavaletes de derivação, permitindo sua ativação remota e também a leitura de

pressão. Por fim, a aba “Controle Manual” contém ferramentas para o controle manual rápido, projetado para ser de fácil utilização, mesmo para pessoal com pouco conhecimento técnico.

Ainda na aba Status do sistema, existem dois quadros: um de monitoramento do módulo mestre e outro para o controle automático do sistema. O estado do módulo mestre monitora se o mesmo está conectado ou não no PC. Caso o mestre esteja desconectado, nenhuma ação poderá ser tomada, já que todos os comandos do sistema têm de passar pela RSSF. Um campo no quadro Status Mestre exibe o estado atual da conexão USB e a quantidade de tempo desde que o módulo mestre foi conectado (Figura 24).

Figura 24 – Quadro de status do módulo mestre



Fonte: Autor

Para monitorar se o módulo mestre está ativo existe uma *thread daemon*<sup>1</sup> que verifica constantemente os dispositivos conectados ao computador, alertando às outras *threads* caso o encontre em alguma porta USB. A implementação se deu utilizando as diretivas USB HID (*Human Interface Design*), especificação do protocolo USB em que o dispositivo que é plugado ao PC se identifica diretamente com o sistema operacional através de um número único definido pelo fabricante.

O quadro de Controle Automático fornece uma forma simples e rápida de acionar a operação automática do sistema, e foi construído de modo a oferecer maior flexibilidade ao operador. Existem três funções que podem ser acionadas utilizando os botões presentes no mesmo: a leitura automática dos sensores de umidade do solo, leitura automática dos sensores de pressão e acionamento da irrigação (Figura 25). As duas primeiras podem ser ativadas independentemente, portanto, o operador pode decidir apenas monitorar o sistema sem ativá-lo automaticamente, como se daria em caso de monitoramento meteorológico.

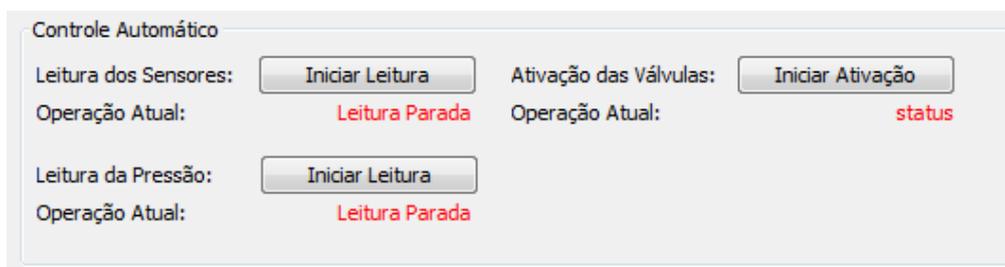
---

<sup>1</sup> Uma *thread* é uma linha de execução paralela em um programa de computador. Cada programa pode ter uma ou mais *threads*, abordagem muito comum quando se deseja trabalhar com subproblemas. A *thread daemon* é um tipo especial de linha de execução que trabalha em pano de fundo, ela serve para prover serviços a outras *threads* do mesmo programa.

A terceira função (Acionamento da Irrigação), também ilustrada na Figura 25, controla o acionamento de válvulas e bombas do sistema de irrigação. Ela opera com base na média de umidade dos últimos cinco minutos. Caso esta esteja abaixo de um valor preestabelecido, o sistema é acionado pelo tempo calculado pela Equação (3).

Para acionar o sistema de irrigação deve-se primeiramente abrir a válvula correspondente à área, após isso o inversor da bomba correspondente é acionado, enviando água para o sistema. O inversor de frequência permite esta forma de acionamento pois quebra a inércia do sistema de forma gradual, evitando picos de corrente ao se acionar o motor. O término da irrigação se dá após o intervalo de tempo estabelecido ou caso a capacidade de campo seja atingida antes do previsto, o que pode ocorrer em casos de precipitação.

Figura 25 – Quadro de controle automático



Fonte: Autor.

Antes de se controlar o sistema, efetuar a leitura dos sensores de umidade ou pressão, é necessário configurar o *software*, o que consiste em uma série de passos que vão desde o cadastro dos módulos responsáveis até a configuração do tipo de ativação de cada uma das válvulas. Estas etapas de configuração permitem que o *software* seja adaptável a diferentes propriedades que podem se diferenciar pelas culturas plantadas, quantidade de módulos remotos, quantidade de válvulas e quantidade de bombas hidráulicas. Apenas após a etapa de configuração, o programa terá condições de controlar corretamente a irrigação. A primeira etapa deste processo consiste em configurar os módulos remotos.

## 6.2 Módulos remotos

### 6.2.1 Configuração dos módulos remotos

Os módulos remotos são a base de funcionamento do sistema automático, já que a maior parte da comunicação entre os dispositivos é sem fio. Portanto, o primeiro passo para a configuração do sistema de controle é cadastrar os módulos que serão utilizados no campo. Esta função está presente na aba Módulos Sensores, que contém em sua parte superior os

dados de configuração dos módulos, logo abaixo, uma lista com todos os módulos já cadastrados e finalmente uma barra com botões para o controle do banco de dados de módulos do sistema (Figura 26).

Figura 26 – Tela de configuração dos módulos remotos

The screenshot shows the 'Módulos Sensores' configuration window in the IrrigAUTO application. It features several input fields for configuring a module, a table of existing modules, and a status bar at the bottom.

**Configuration Fields:**

- Nº Módulo: 34
- Tempo Soneca: 1
- Tempo Acordado: 5
- Tempo Acordado Est: 5
- Tempo Estabilização: 3
- Intervalo Auto: 4
- Novo Número: 34
- Sensores Ativos:
  - Sensor 1
  - Sensor 2
  - Sensor 3

**Sensor Data:**

- Sensor 1: 932 Hz
- Sensor 2: 1034 Hz
- Sensor 3: 0.0

**Module List Table:**

Número	T. Soneca	T. Acordado	T. Estendido	T. Estab.	T. Auto	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	ativo	configurado
34	1	5	5	3	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
36	1	5	5	3	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
42	1	5	5	3	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
43	1	5	5	3	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
61	1	5	5	3	3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
62	1	5	5	3	3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

**Buttons:** Inserir, Editar, Recarregar, Deletar, Salvar, Cancelar

**Status Bar:** Módulo Mestre Conectado!

Fonte: Autor.

Para se cadastrar um novo módulo, deve-se clicar no botão “Inserir”, presente na barra de botões inferior, o que tornará os campos de configuração editáveis. Assim, o usuário poderá inserir valores e configurar o módulo de acordo com a aplicação (Figura 27). Caso o módulo já esteja cadastrado, o botão “Editar” poderá ser utilizado: os campos de configuração ficarão editáveis, mas já contarão com os valores iniciais do módulo a ser editado. Após preencher os campos com valores adequados, deve-se clicar no botão salvar, o que gravará no banco de dados a configuração do módulo.

Figura 27 – Campos de configuração dos módulos remotos

This image shows a close-up of the configuration fields for a remote module. The fields are as follows:

- Nº Módulo: 34
- Tempo Soneca: 1 ms.
- Tempo Acordado: 5 ms.
- Tempo Acordado Est: 5 ms.
- Tempo Estabilização: 3 seg.
- Intervalo Auto: 4 min.

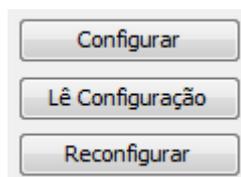
Fonte: Autor.

Cada um dos campos representa uma configuração do módulo: “Nº Módulo” é o identificador utilizado para cada módulo, que deve ser único, tendo o tamanho de 1 byte – variando de 0 a 255; “Tempo Soneca” corresponde à quantidade de tempo em milissegundos em que o módulo opera em modo de baixo consumo – *sleep*; “Tempo Acordado” representa a quantidade de tempo em que o módulo opera entre intervalos de baixo consumo; “Tempo Acordado Est” representa o tempo extra em que o módulo permanece ativo em caso de comunicação. Esta medida diminui a perda de dados na rede, pois o módulo passará mais tempo ativo enquanto estiver se comunicando; “Tempo Estabilização” é o tempo em segundos que o sensor de umidade do solo deverá permanecer ativo para que seu sinal de saída estabilize. O tempo de 3 segundos foi determinado como ótimo em laboratório; Finalmente, “Intervalo Auto” é o tempo em minutos entre leituras de umidade do solo, caso a função de leitura automática de umidade esteja ativa.

Para um bom funcionamento do sistema é essencial que o tempo em modo *sleep* e o tempo acordado sejam configurados de forma correta. Caso o tempo em modo *sleep* seja muito maior que o tempo acordado, o módulo terá dificuldades em se comunicar. O contrário provocaria um rápido decaimento na energia da rede, pois o módulo funcionaria muito tempo em modo de consumo elevado.

Como citado anteriormente, após clicar no botão salvar, os dados são salvos para o banco de dados. Resta agora transmiti-los via RSSF para os módulos em campo utilizando os botões à direita dos campos de configuração. O botão “Configurar” envia o comando para a configuração de um módulo que, por sua vez, grava em memória flash a nova configuração. O botão “Lê Configuração” envia um comando que solicita a configuração atual de um módulo, para conferência com a configuração armazenada no banco de dados. Por último o comando “Reconfigurar” configura um novo módulo com as mesmas configurações de um módulo já existente e deve ser usado em casa de falha do último (Figura 28).

Figura 28 – Botões de transmissão de comandos



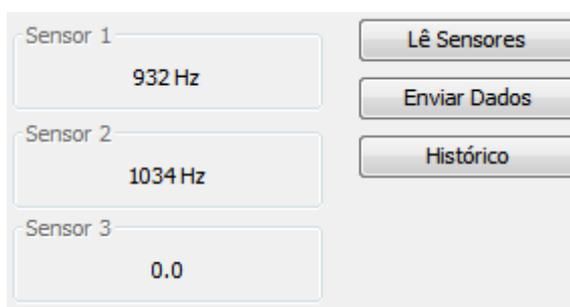
Fonte: Autor.

Cada módulo em campo deve ser configurado via software, assim a configuração no banco de dados corresponderá à configuração real do sistema. Os módulos remotos, agora configurados, servirão de base para a configuração dos outros componentes do sistema, já que a comunicação sem fio necessita dos mesmos.

### 6.2.2 Aquisição de Dados

A aquisição de dados é possível com todos os módulos cadastrados e configurados. À direita dos botões de configuração se encontra o quadro que exibe as últimas leituras de umidade de um determinado módulo sensor (Figura 29). O botão “Lê Sensores” envia um comando via RF para que o módulo em campo realize a aquisição de dados dos sensores de umidade do solo. Como esta leitura pode demorar mais que nove segundos (caso os três sensores estejam instalados), o comando de requisição de dados tem de ser separado do comando de leitura e é ativado pelo botão “Enviar Dados”. As leituras de umidade são então armazenadas também no banco de dados para posterior acesso através do botão “Histórico”.

Figura 29 – Quadro de leitura dos sensores



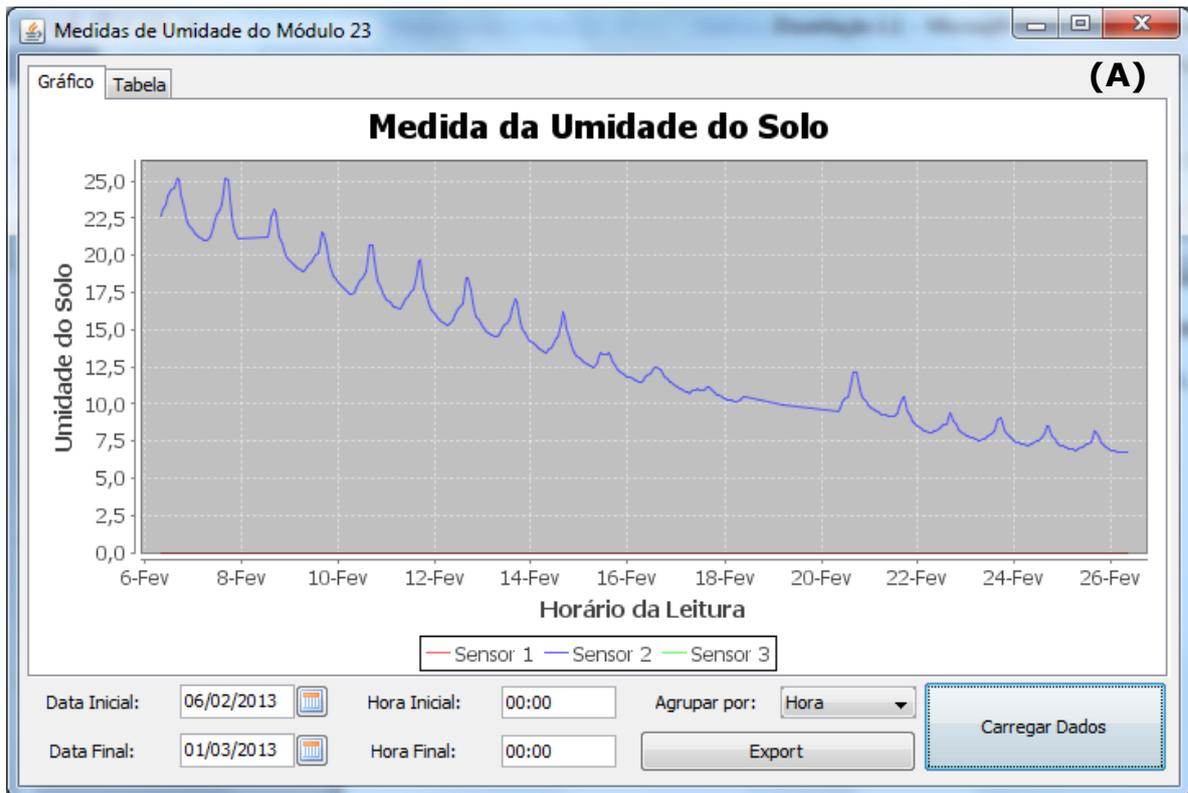
Fonte: Autor.

Ao clicar no botão “Histórico”, o usuário terá acesso a uma janela onde poderá acessar todos os dados colhidos por um módulo específico (Figura 30A). Nela, o usuário deve especificar o intervalo de tempo em que os dados estão contidos, utilizando os campos: “Data Inicial”, “Hora Inicial”, “Data Final” e “Hora Final”. Além disso, o usuário pode agrupar esses dados e ter uma média dos mesmos por: minuto, hora, dia, semana, mês ou ano. Os dados serão exibidos em um gráfico Umidade x Tempo, que pode ser manipulado ou salvo em figura pelo usuário.

Algumas vezes é necessário se ter o valor quantitativo dos dados, em vez de apenas observar o gráfico. Para tanto, existe uma aba chamada “Tabela” onde os dados utilizados para a criação do gráfico são exibidos (Figura 30B). Nela, é mostrado o número do

módulo, data da leitura e os dados dos sensores. Caso deseje transferir estes dados para outros programas, o usuário poderá clicar no botão “Export”, que cria uma planilha eletrônica do Microsoft Excel no computador. Finalmente, estes dados podem ser utilizados para uma análise estatística, criação de modelos de umidade do solo etc.

Figura 30 – Histórico de leituras de umidade



Medidas de Umidade do Módulo 23

Gráfico Tabela (B)

Número	dataLeitura1	Sensor 1	sensor 1	Sensor 2	sensor2	Sensor 3	sensor3
23	06/02/2013 10:00	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	23	<input type="checkbox"/>	0
23	06/02/2013 11:12	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	24	<input type="checkbox"/>	0
23	06/02/2013 12:00	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	24	<input type="checkbox"/>	0
23	06/02/2013 13:00	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	24	<input type="checkbox"/>	0
23	06/02/2013 14:01	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	25	<input type="checkbox"/>	0
23	06/02/2013 15:00	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	25	<input type="checkbox"/>	0
23	06/02/2013 16:00	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	25	<input type="checkbox"/>	0
23	06/02/2013 17:00	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	25	<input type="checkbox"/>	0
23	06/02/2013 18:00	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	24	<input type="checkbox"/>	0
23	06/02/2013 19:00	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	23	<input type="checkbox"/>	0
23	06/02/2013 20:00	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	23	<input type="checkbox"/>	0
23	06/02/2013 21:00	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	22	<input type="checkbox"/>	0
23	06/02/2013 22:00	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	22	<input type="checkbox"/>	0
23	06/02/2013 23:00	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	22	<input type="checkbox"/>	0
23	06/02/2013 08:10	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	23	<input type="checkbox"/>	0
23	06/02/2013 09:00	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	23	<input type="checkbox"/>	0

Data Inicial: 06/02/2013 Hora Inicial: 00:00 Agrupar por: Hora

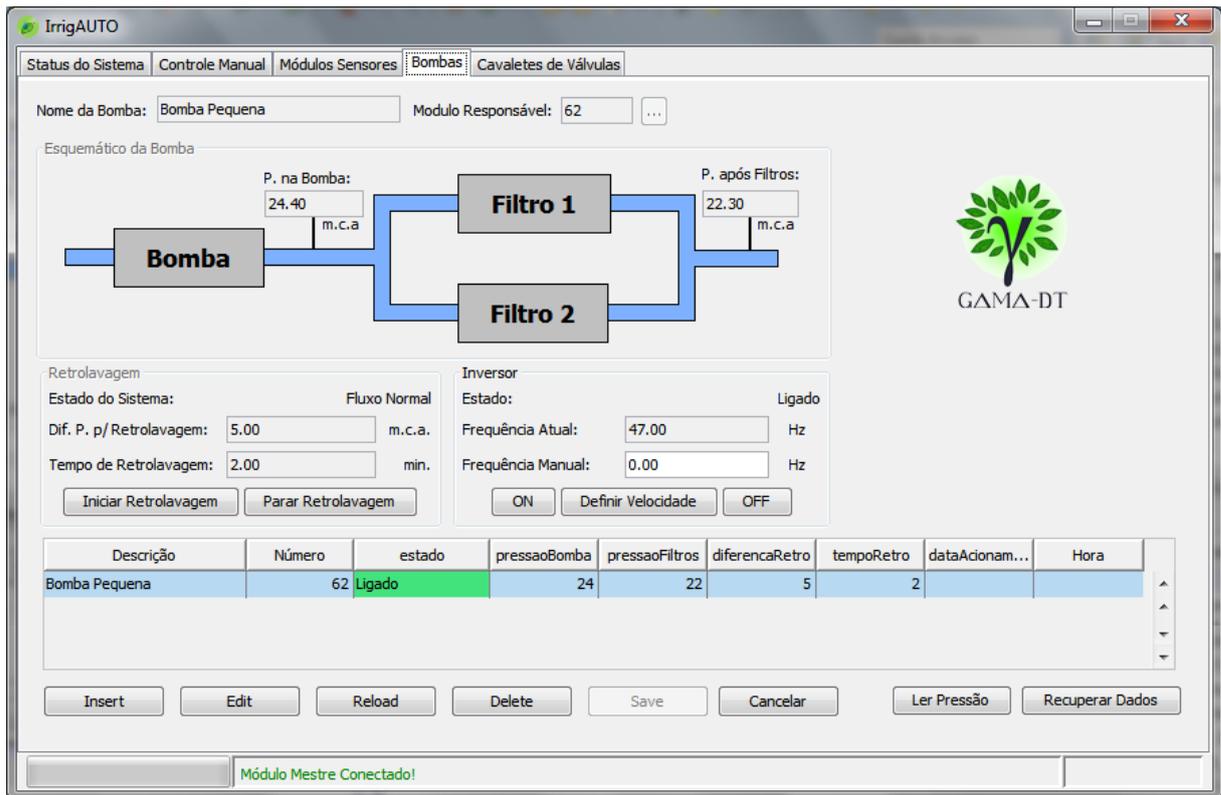
Data Final: 01/03/2013 Hora Final: 00:00 Export Carregar Dados

Fonte: Autor.

### 6.3 Configuração do módulo de controle de bomba

O método de cadastro de novos módulos controladores de bombas é similar ao utilizado para cadastrar novos módulos remotos, utilizando a barra inferior com os botões de inserção, edição e exclusão (Figura 31). Cada módulo cadastrado controlará um único conjunto moto-bomba, que pode estar ligado a até dois filtros e deve ser acoplado a um inversor de frequência. Os atributos de configuração são: “Nome da Bomba” – Identificador único daquele conjunto moto-bomba; “Módulo Responsável” – Número identificador do módulo controlador na RSSF. Quando cadastrado, o módulo de controle será mostrado em uma lista, logo acima dos botões de inserção/edição.

Figura 31 – Tela de configuração do módulo de controle de bomba



Fonte: Autor.

A leitura dos sensores de pressão é semelhante à leitura dos sensores de umidade do solo, com um comando para que o módulo leia os sensores, i.e. energize os mesmos e converta a saída analógica em valor digital. Outro comando para o retorno dos dados transmite o número digital do microcontrolador ao PC, que o converte em um valor de pressão em metros de coluna de água (m.c.a.) e o exibe nas caixas de texto correspondentes.

Para se ligar, desligar ou controlar a velocidade do conjunto moto-bomba existe um quadro chamado “Inversor”, que além de comandar o inversor de frequência exibe a última frequência enviada a uma bomba e se a mesma está ligada ou não (Figura 32). Ao se clicar em um dos botões, o *software* do computador enviará um comando ao módulo de controle de bombas que o repassará ao inversor através do protocolo ModBus. O botão “ON” transmite o comando de ligar o motor; O botão “OFF” envia o comando de desligar o motor, parando a irrigação; O botão “Definir Velocidade” força o motor a assumir uma frequência de rotação definida na caixa de texto “Frequência Manual”, que pode variar de 0 a 60Hz.

Figura 32 – Quadro de controle do inversor

Inversor	
Estado:	Ligado
Frequência Atual:	47.00 Hz
Frequência Manual:	0.00 Hz
<input type="button" value="ON"/> <input type="button" value="Definir Velocidade"/> <input type="button" value="OFF"/>	

Fonte: Autor.

O ultimo quadro presente na aba de controle da estação de bombeamento controla a retrolavagem dos filtros (Figura 33). Através dele é possível regular qual diferença de pressão deve ser atingida para que o sistema de retrolavagem seja acionado e quanto tempo cada filtro será submetido à reversão de fluxo. O *label* “Estado do Sistema” mostra se os filtros estão em retrolavagem ou no fluxo normal de funcionamento. Os botões “Iniciar” e “Parar Retrolavagem” fornecem uma alternativa manual para o acionamento da mesma, fazendo a limpeza quando o operador julgar necessário.

Figura 33 – Quadro de controle da retrolavagem

Retrolavagem	
Estado do Sistema:	Fluxo Normal
Dif. P. p/ Retrolavagem:	5.00 m.c.a.
Tempo de Retrolavagem:	2.00 min.
<input type="button" value="Iniciar Retrolavagem"/> <input type="button" value="Parar Retrolavagem"/>	

Fonte: Autor.

Com o cadastro das bombas do sistema, agora é possível e necessário cadastrar as áreas de irrigação, juntamente com suas respectivas válvulas e cavaletes responsáveis. Este trabalho é feito na aba “Cavaletes de Válvulas”.

#### 6.4 Configuração do módulo do cavalete de válvulas

O controle de válvulas é o que possui mais informações agregadas, pois, além de depender de uma bomba acoplada, é nele onde são definidas as áreas de irrigação, por meio das válvulas (Figura 34). Os dados do próprio cavalete são poucos, se limitando a configurações de sua identificação: Nome – identificador único do cavalete; Módulo – número do módulo remoto responsável por controlar o cavalete; Bomba – Nome da bomba que envia água para este cavalete, sendo necessário para identificar qual bomba acionar no momento da irrigação.

Figura 34 – Tela de configuração do módulo do cavalete de válvulas

Nome: Cavalete do Milho Módulo: 61 ... Bomba: Bomba Pequena ...

Válvula 1  
Nome: Milho 1  
P. Max. Válvula: 10 mca  
Pressão Atual: 0 mca  
Abrir Fechar

Válvula 2  
Nome: Milho 2  
P. Max. Válvula: 10 mca  
Pressão Atual: 9 mca  
Abrir Fechar

Válvula 3  
Nome: Milho 3  
P. Max. Válvula: 10 mca  
Pressão Atual: 0 mca  
Abrir Fechar

Válvula 4  
Nome: Milho 4  
P. Max. Válvula: 10 mca  
Pressão Atual: 0 mca  
Abrir Fechar

Último Acionamento:

Válvula 1  
Data: 06/07/2013  
Hora: 13:50  
Duração: 01:09:00  
Estado: Desligado

Válvula 2  
Data: 06/07/2013  
Hora: 10:57  
Duração: 00:37:23  
Estado: Ligado

Válvula 3  
Data: 06/07/2013  
Hora: 08:47  
Duração: 00:54:20  
Estado: Desligado

Válvula 4  
Data: 06/07/2013  
Hora: 14:47  
Duração: 00:12:54  
Estado: Desligado

Configurações Histórico

Cavalete	Acionamento	Número	Área 1	Estado 1	Área 2	Estado 2	Área 3	Estado 3	Área 4	Estado 4
Cavalete do Milho	Cálculo	61	Milho 1	Desligado	Milho 2	Ligado	Milho 3	Desligado	Milho 4	Desligado

Inserir Editar Recarregar Deletar Salvar Cancelar Ler Pressão Recuperar Dados

Módulo Mestre Conectado!

Fonte: Autor.

Quatro válvulas devem ser configuradas para cada cavalete, cada uma contendo os seguintes atributos: Nome – identificador da área irrigada; pressão máxima na válvula – para garantir que uma pressão excessiva não danifique o sistema hidráulico; Pressão Atual – campo utilizado para exibição ao se ler os sensores de pressão. Existem ainda dois botões que controlam o acionamento manual das válvulas: “Abrir”, que envia o comando para abrir uma válvula em campo e “Fechar”, que fecha a válvula em campo, interrompendo a irrigação.

Figura 35 – Quadro de configuração de válvula

Válvula 2

Nome: Milho 2

P. Max. Válvula: 10 mca

Pressão Atual: 9 mca

Abrir Fechar

Fonte: Autor.

O último passo para o controle da irrigação é definir a forma de acionamento de cada cavalete em campo a partir do botão “Configurações” na presente aba, que abre uma nova janela utilizada para definir os parâmetros de irrigação. A primeira forma de configurar a irrigação é manter os limites de umidade entre dois valores extremos (Figura 36). Nela são definidas as umidades máxima e mínima para cada válvula, assim como os módulos sensores que estão instalados naquela área.

Figura 36 – Acionamento de válvulas por limites de umidade

Fonte: Autor.

Controlar a irrigação por limites de umidade pode ser útil pela simplicidade de implementação, porém não é o melhor método quando se lida com culturas sensíveis à variação do nível de água. Este fato ocorre por existir um atraso entre a aplicação de água no solo e sua chegada à profundidade do sensor, causando uma aplicação excessiva de água. Assim sendo, recorre-se a métodos mais precisos para calcular o tempo de irrigação, como a utilização de modelos matemáticos.

A equação do balanço hídrico volumétrico foi escolhida para este trabalho e seus parâmetros devem ser salvos separadamente no banco de dados para cada uma das válvulas, já

que cada uma delas pode possuir sistemas de irrigação diferentes. Esta divisão entre válvulas é feita em abas, da mesma forma que a divisão entre funcionalidades do sistema. Em cada uma das abas encontra-se o valor dos parâmetros para a equação além dos módulos responsáveis por aquela área e da profundidade de cada um dos sensores (Figura 37).

Figura 37 – Acionamento de válvulas pelo cálculo do tempo de irrigação

Fonte: Autor.

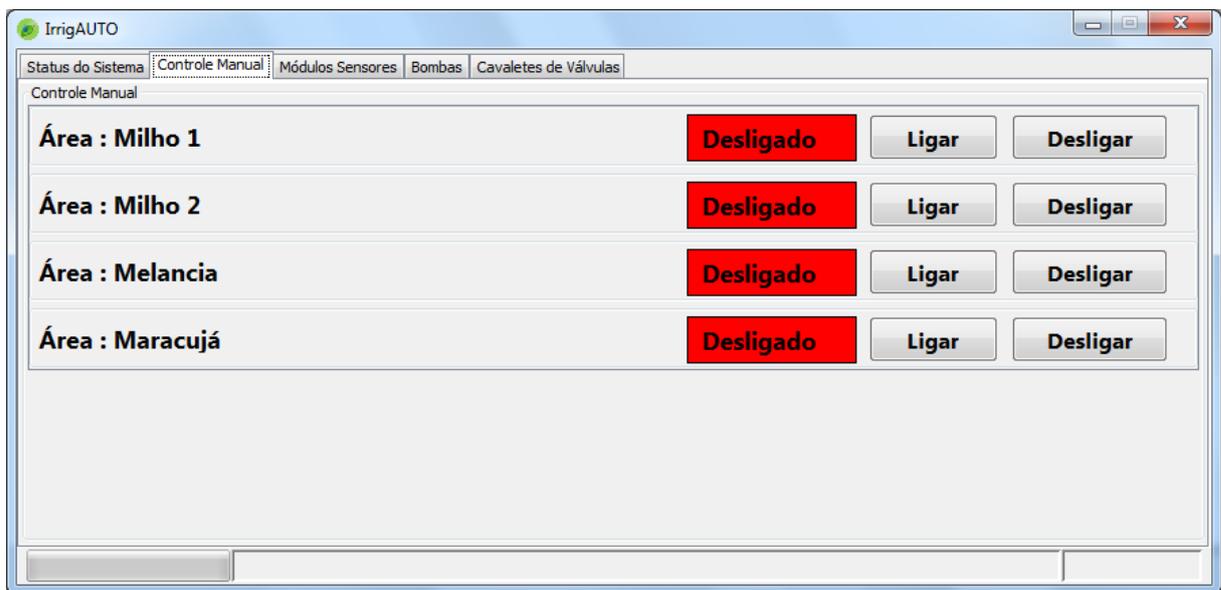
Com todo o sistema configurado, pode-se permitir um controle automático do mesmo. Porém, ainda pode ser necessário intervir no sistema manualmente, no caso de erros ou impossibilidade de utilizar sensores de umidade do solo. A intervenção manual deve ser simples para agilizar o treinamento do operador, sendo o técnico mais qualificado necessário apenas no momento da configuração do sistema e não no momento de ativá-lo.

## 6.5. Controle manual

A aba de “Controle Manual” foi construída pensando-se na simplicidade e facilidade de operação. Cada uma das áreas cadastradas na aba “Cavaletes de Válvulas” adicionará um item na lista de áreas de irrigação, ilustrada na Figura 38. Ao clicar no botão

“Ligar”, a válvula da área correspondente será aberta e, posteriormente, a bomba responsável por irrigar aquela área será acionada. Ao clicar no botão “Desligar” a válvula correspondente será fechada. Caso não haja nenhuma área a mais ativa, a bomba será desligada, caso contrário, a velocidade do motor será ajustada às outras áreas ainda ativas. Devido à grande variabilidade possível de sistemas de irrigação, as velocidades de ativação do motor foram fixadas no código para este trabalho em: 50 Hz para uma válvula, 57 Hz para duas e 60 Hz para três ou quatro áreas.

Figura 38 – Aba de controle manual da irrigação



Fonte: Autor.

Após estes todos estes passos o sistema pode ser implantado em campo, para validação de sua funcionalidade. A implantação é um processo rápido e dinâmico, podendo ser feita em duas etapas: uma para o monitoramento e outra para a automação.

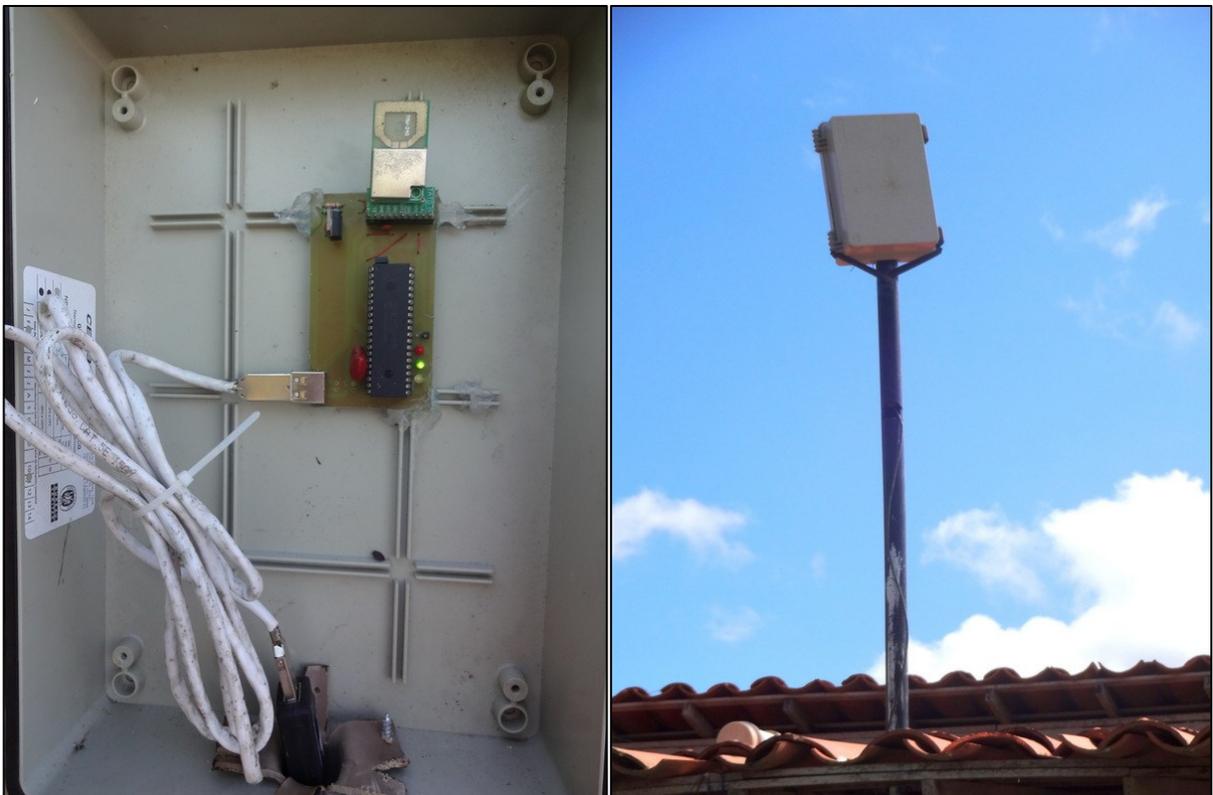
## 7. ETAPA DE CAMPO

Este capítulo descreve a instalação do sistema em campo e o resultado de seus testes. Mostra onde cada módulo foi instalado, as dificuldades enfrentadas e as soluções para possíveis problemas de instalação e manutenção do sistema.

### 7.1. Instalação do módulo mestre

A instalação do módulo mestre é o primeiro passo para a instalação do sistema como um todo. Devido à sua instalação externa, o módulo mestre deve ficar protegido das intempéries do ambiente, sendo fixado no interior de uma caixa de PVC vedada. Devido ao porte da cultura do milho (variedade Ag 1051) o mestre precisou ser instalado em uma posição mais elevada, de modo a facilitar a visada entre o mesmo e os outros módulos em campo, a aproximadamente quatro metros de altura. Para tanto, a instalação foi feita elevando o mestre acima da casa de apoio do lote, evitando barreiras criadas pela vegetação (Figura 39).

Figura 39 – Módulo mestre instalado (à direita) e detalhe da instalação (à esquerda)



Fonte: Autor.

A distância entre o módulo mestre e o computador gestor é de aproximadamente oito metros, tendo sido necessário o uso de um extensor USB de 10 m de comprimento. Este mesmo cabo é utilizado para a alimentação do módulo mestre, que funciona a partir dos 5 V fornecidos pela porta USB. Caso necessário, pode-se concatenar mais extensores USB para atingir uma melhor visada do campo. Após a instalação do mestre na casa de apoio, os módulos sensores podem ser instalados em campo, de forma a buscar uma ligação direta com o mestre.

## 7.2. Instalação dos módulos sensores

Os módulos sensores foram instalados em uma área de milho em fase final de seu ciclo no lote experimental. Nesta fase o milho está com um porte elevado, o que dificulta a transmissão do sinal. Além disso, existia uma plantação de coqueiros entre a casa de apoio e o campo monitorado, criando uma barreira adicional à transmissão de dados (Figura 40).

Figura 40 – Área experimental



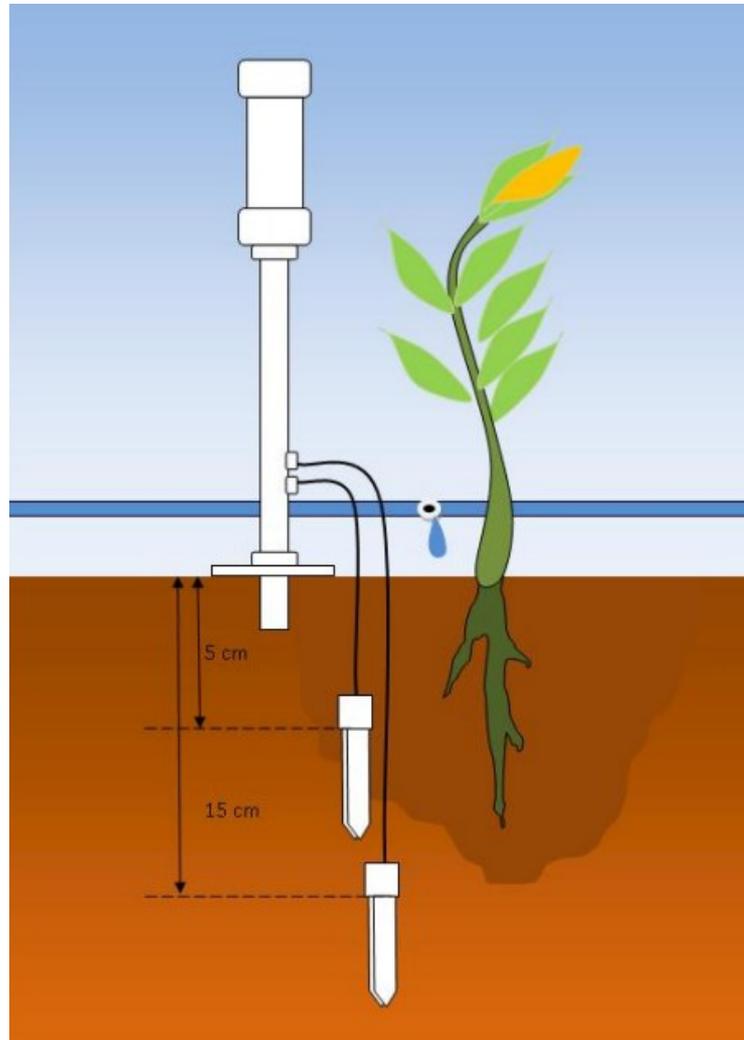
Fonte: Autor.

A instalação dos sensores em campo é influenciada por vários fatores: tipo da cultura, tipo de emissor, tipo do solo etc., sendo de vital importância que os sensores estejam instalados dentro da zona molhada do emissor e próximo à planta, pois só assim eles serão capazes de mensurar corretamente o estado da água no solo.

A principal influência da cultura na instalação dos sensores é quanto à profundidade de instalação, que varia de acordo com a profundidade da zona radicular. No caso do milho, foram instalados dois sensores: o primeiro com o elemento sensível a 5 cm de

profundidade, representando a zona de 5 a 15 cm e o segundo com o elemento sensível a 15 cm de profundidade, representando a zona de 15 a 25 cm (Figura 41). O cabo do sensor então sai do solo e segue até o módulo sensor através de um tubo de PVC.

Figura 41 – Esquema de instalação de sensores no campo



Fonte: Santos (2008).

Deve-se ressaltar que existe um atraso entre a instalação do sensor no solo e a estabilização de suas leituras. No primeiro momento, o sensor apresenta imprecisão em medir a umidade do solo ao seu redor, pois o solo no interior das placas não entrou em equilíbrio hidráulico com o solo no exterior do sensor. Uma alternativa encontrada para amenizar este problema é a aplicação de uma grande quantidade de água ao redor do sensor logo após sua instalação, criando um fluxo hídrico e homogeneizando a área cultivada.

Devido a altura da cultura do milho, é importante que os módulos sensores fiquem elevados, de modo a sofrer interferência mínima da vegetação. Porém, o cabo dos sensores

tem o tamanho máximo de 1,5 m, fazendo com que o módulo fique abaixo da cobertura vegetal. A solução encontrada foi aumentar o cabo do transeptor, elevando-o acima da cobertura vegetal.

Foram instalados quatro módulos em campo, um para cada área controlada, conforme ilustra a Figura 12. Uma caixa da PVC com encaixe selado faz a proteção dos módulos contra umidade, de modo a evitar a oxidação do circuito (Figura 42).

Figura 42 – Módulos sensores instalados em campo



Fonte: Autor.

Os módulos instalados em campo devem permanecer ativos por todo o ciclo de uma cultura, colhendo dados de umidade do solo frequentemente. Neste trabalho foi utilizada uma bateria de 12 V de chumbo-ácido e 7000 mAh para alimentar dois módulos sensores, capaz de manter os módulos funcionando com uma frequência de leitura dos sensores de três minutos por até dois dias. Porém, a autonomia energética dos módulos ainda está muito aquém do ciclo de vida da cultura do milho, de 60 dias. Para solucionar este problema painéis

solares de 5 Wp nominal (KYOCERA, 2013) foram instalados para manter a bateria carregada, prologando a vida útil do sistema indefinidamente. Cada painel fotovoltaico é conectado a um controlador de carga, localizado em uma caixa selada de PVC, que controla a corrente para a carga da bateria (Figura 43).

Figura 43 – Alimentação do módulo sensor



Fonte: Autor.

Com os módulos sensores instalados em campo, o sistema está pronto para monitorar a umidade do solo, podendo ser utilizado como uma RSSF de monitoramento ambiental. O próximo passo para o controle do sistema de irrigação foi a instalação dos atuadores na estação de bombeamento e no cavalete de válvulas.

### 7.3 Instalação do módulo das válvulas

O módulo das válvulas foi instalado no cavalete de derivação, que possui quatro válvulas hidráulicas, uma para cada área de irrigação. Para o controle remoto das válvulas, foram utilizados solenoides do tipo *latching*, sendo uma tomada de pressão instalada após cada uma delas (Figura 44).

Figura 44 – Válvulas instaladas em campo em detalhe (acima) e no cavalete (abaixo)



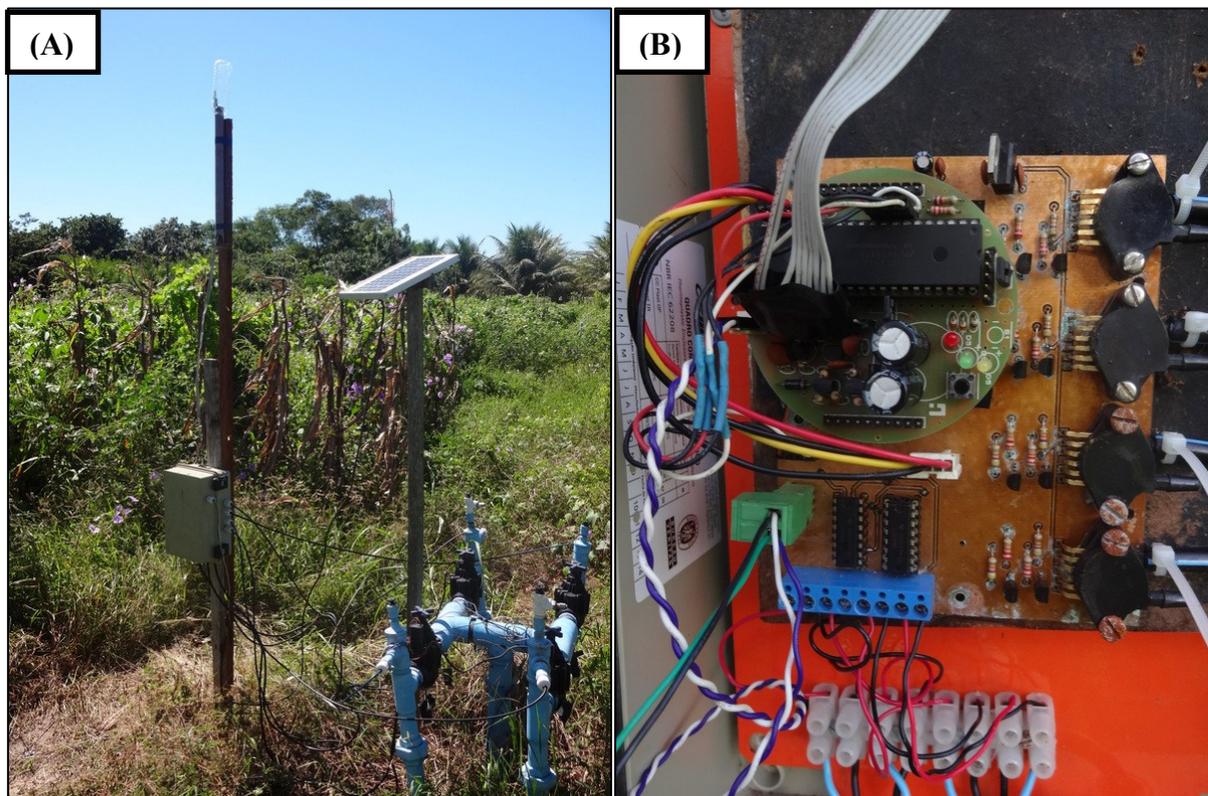
Fonte: Autor.

As tomadas de pressão foram instaladas no intuito de verificar se o acionamento de uma das válvulas foi bem sucedido. Ao se acionar uma válvula em campo, o operador pode solicitar a leitura de pressão do cavalete e verificar se a mesma mudou conforme esperado: aumentou com a abertura ou diminuiu com o fechamento da válvula.

O módulo das válvulas foi instalado de forma semelhante aos módulos sensores, em uma caixa de PVC selada com prensa-cabos para a passagem da fiação de controle dos solenoides e microtubos para medida de pressão (Figura 45A). O controle de alimentação, composto por bateria e controlador de carga, foi instalado no interior da mesma caixa que abriga o circuito do módulo. Mesmo com o selamento da caixa, percebeu-se oxidação dos componentes ao longo do tempo, demonstrando a necessidade de utilização de outros meios

para proteger o circuito contra a umidade, como sílica gel ou coberturas super-hidrofóbicas (Figura 45B).

Figura 45 – Instalação do módulo das válvulas (A) e detalhe da instalação (B)



Fonte: Autor.

Outros problemas ocorreram ao ativar os solenoides através de uma Ponte-H, devido ao alto dreno de corrente para mudança de estado da válvula, ocasionando danos físicos ao CI L293D. O acionamento foi reconfigurado para energizar a válvula por curtos intervalos de tempo (100 ms), diminuindo a energia dissipada pelo CI. Além disso, alguns resistores de *pull-down* foram adicionados, garantindo que o CI ficará em um estado inativo caso o módulo esteja desconectado.

Terminada a instalação do módulo das válvulas, o módulo da casa de bombas é o último necessário para o acionamento do sistema. Ele trabalhará em conjunto com o módulo das válvulas para fornecer água ao campo.

#### 7.4 Instalação do módulo da casa de bombas

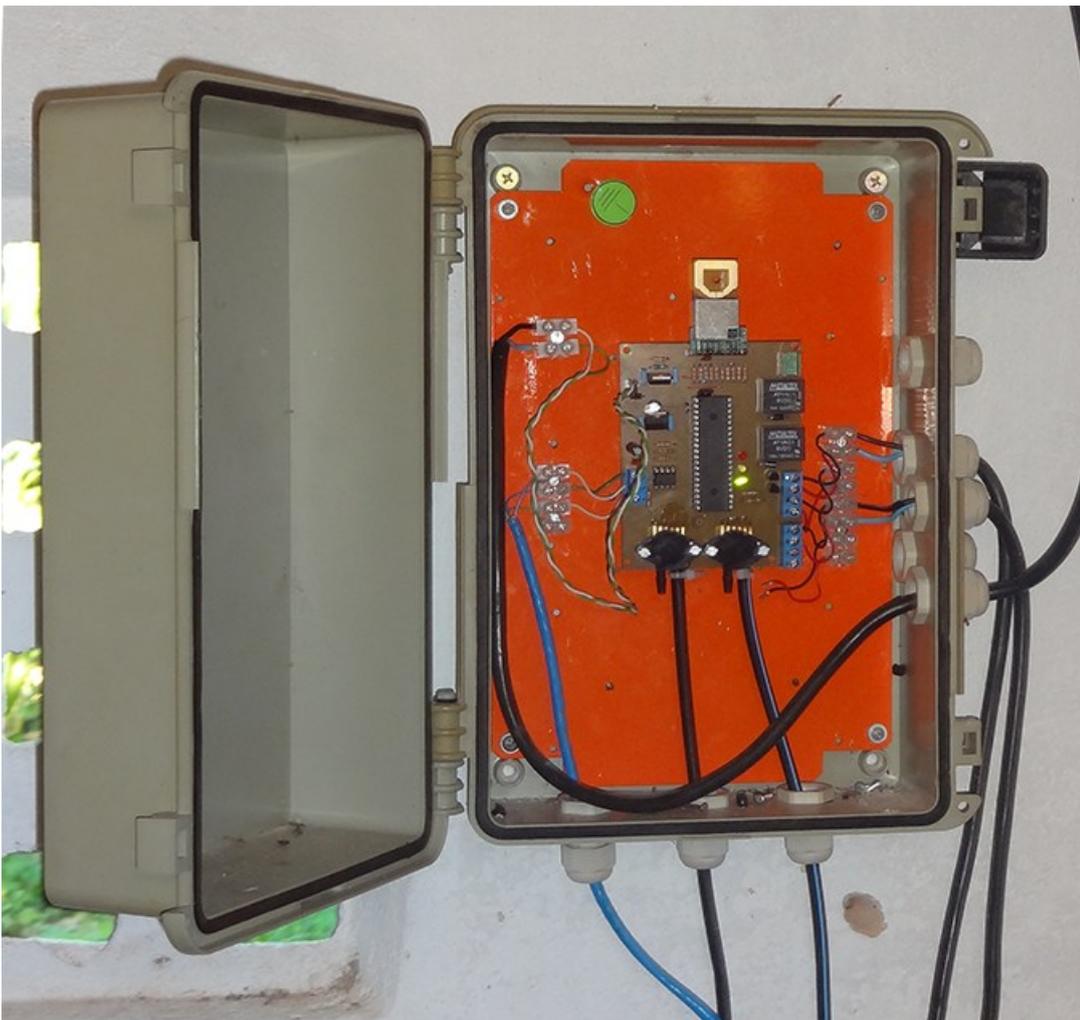
O módulo da casa de bombas possui uma instalação semelhante aos módulos em campo, porém, não há necessidade de alimentação por baterias, já que a rede elétrica encontra-se facilmente acessível. O módulo necessita de duas fontes de alimentação distintas,

uma de 12 V DC para a alimentação do circuito de controle e outra de 24 V AC para alimentação das válvulas utilizadas para a retrolavagem.

O módulo foi alocado em uma caixa de PVC selada, que por sua vez foi fixada na parede da estação de bombeamento. Devido à proximidade com a estação base, não foi necessário elevar o transceptor como realizado nos módulos em campo, fixando-se o mesmo na própria placa de circuito.

O módulo possui as seguintes conexões: dois microtubos que conectam a placa às tomadas de pressão antes e após os filtros; Um cabo de rede CAT-5 faz a ligação com o inversor de frequência; finalmente, os cabos para acionamento de fase das válvulas AC são conectados em pares, segundo o esquema de funcionamento já explicado no item 5.5 (Figura 46).

Figura 46 – Módulo de controle do inversor instalado em campo



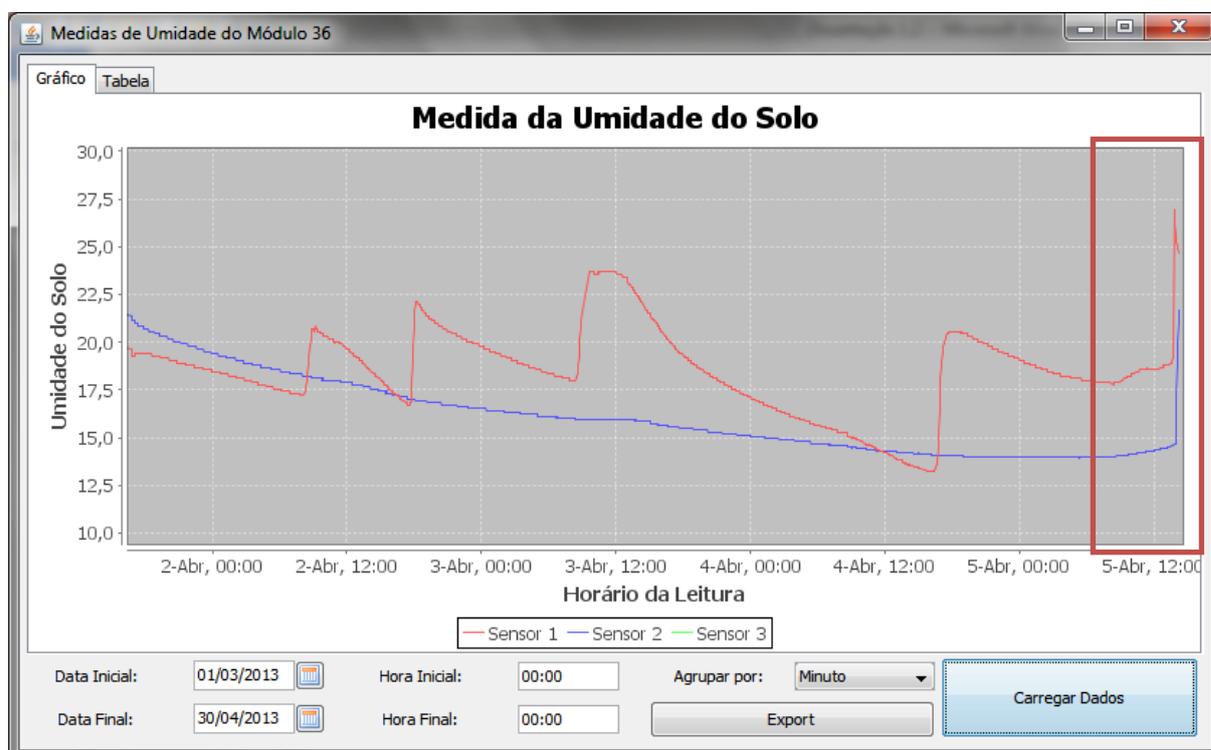
Fonte: Autor.

## 7.5. Monitoramento e controle da irrigação

O sistema foi instalado em campo em dois momentos distintos, um no período de chuvas, tendo sido utilizado para monitorar a umidade do solo e outro no período seco, para o controle da irrigação. Assim, pôde-se constatar a eficácia do sistema ao desempenhar ambas as funções.

O monitoramento do campo cultivado se deu de 2 a 5 de abril de 2013, tendo sido possível observar a dinâmica de água no solo (Figura 47). Neste primeiro momento, o controle automático não foi ativado, sendo a aplicação de água no solo feita por chuvas ou irrigações esporádicas. A primeira camada (5 a 15 cm), monitorada pelo sensor 1, foi a mais afetada pelos ciclos de chuva/irrigação, com umidade variando bastante ao longo dos dias. Já a segunda camada (15 a 25 cm), monitorada pelo sensor 2, foi pouco afetada pelas aplicações de água, mostrando que toda a água aplicada estava sendo absorvida pela planta na primeira camada. A segunda camada foi afetada apenas após uma forte chuva, no dia 5 de abril por volta de meio dia, mostrado pelo aumento brusco da umidade do solo na área destacada.

Figura 47 – Monitoramento da Umidade do Solo



Fonte: Autor.

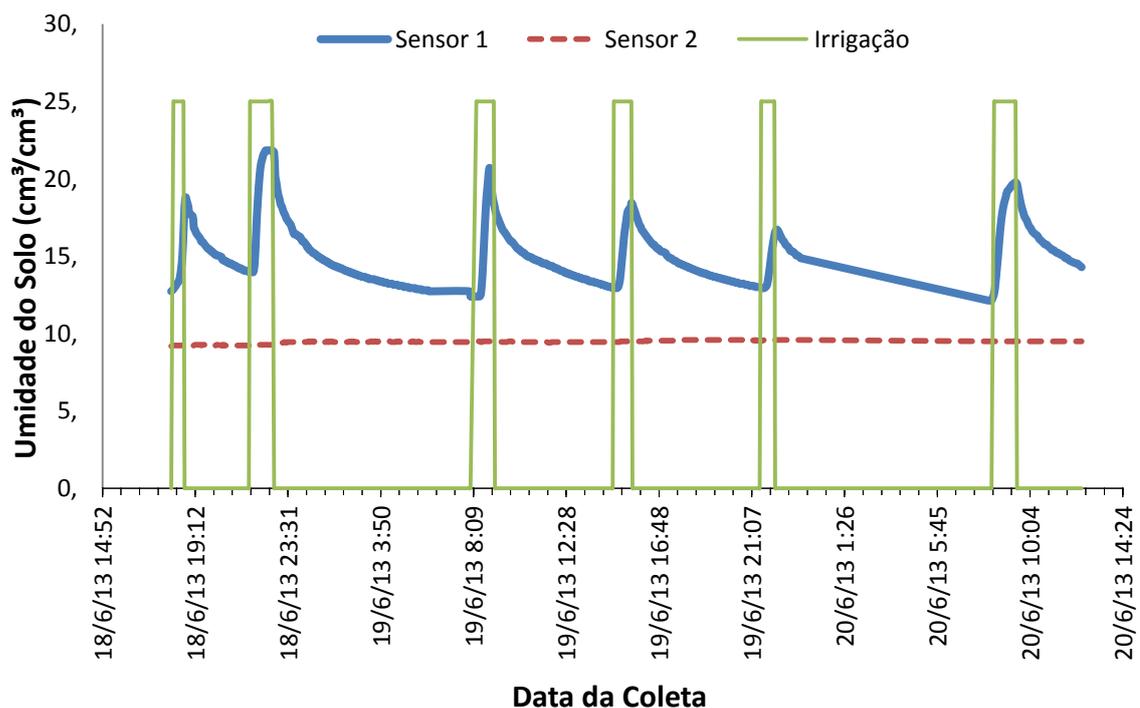
O *software* respondeu bem ao monitoramento contínuo da umidade do solo, tendo operado por três dias sem necessidade de reinício. Um problema de perda da comunicação USB surgiu ao se utilizar outros programas do PC ou outras funções do próprio *software*

concomitantemente. Modificações foram feitas no código para reduzir o número de acessos à porta USB, mas o problema persistiu. A solução encontrada foi manter uma comunicação permanente com o dispositivo USB, ao invés de se iniciar uma nova comunicação sempre que fosse necessário trocar mensagens. Esta alteração trouxe uma melhora significativa tanto na quantidade de falhas quanto no tempo de comunicação entre o PC e o módulo mestre.

A etapa de controle foi realizada do dia 18 ao dia 20 de junho de 2013, onde além de monitorar a umidade do solo, o *software* iniciou as irrigações sempre que necessário. Uma primeira irrigação foi realizada no início do experimento, de modo a verificar o tempo entre o início de abertura da válvula e a detecção da frente de molhamento pelo sensor 1, que foi de 12 minutos (Figura 48). Sucessivas observações determinaram um tempo entre 10 e 20 minutos para este sistema de irrigação.

A Figura 48 ainda ilustra as irrigações que ocorreram ao longo dos dias, sempre que a umidade atingida um ponto crítico de  $13 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . Algumas vezes a irrigação foi interrompida propositalmente a fim de se observar o efeito na umidade do solo. Percebeu-se que o crescimento da umidade do solo foi proporcional ao tempo de irrigação, e que a mesma começava a decair pouco após o fechamento das válvulas. A taxa de aumento da umidade mostrou-se elevada com o solo seco, decaindo à medida que o mesmo se aproximava da capacidade de campo.

Figura 48 – Umidade do solo influenciada pelo controle automático



Fonte: Autor.

Ao mesmo tempo em que o sensor 1 apresentou grande variação em sua resposta ao longo dos dias, pode-se observar que o sensor 2 teve apenas um leve acréscimo de umidade. Pode-se perceber que a segunda camada do solo estava aos poucos retendo água, até chegar à capacidade de campo, de mesma forma do obtido por Cruz (2009). Com os mesmos dados é possível notar que a água não é perdida por percolação profunda, já que se acumula na camada de 15 a 25 cm, onde ainda há raízes do milho.

A exemplo do que ocorreu no monitoramento, alguns problemas ocorreram no que diz respeito à robustez do sistema. Muitos são os componentes (tanto de *software* quanto de *hardware*) externos ao programa e suscetíveis a falhas: módulos sensores, baterias, biblioteca USB, banco de dados, válvulas hidráulicas, tubulação, etc. Muitos destes problemas não são diretamente identificáveis via software, como é o caso de uma tubulação furada que provoca uma perda de pressão inesperada e pode ocasionar uma detecção de umidade elevada por um sensor que se encontre nas proximidades do vazamento (Figura 49).

Figura 49 – Falhas no sistema hidráulico



Fonte: Autor.

Assim sendo, evidencia-se a necessidade de uma manutenção frequente no sistema, de modo a mantê-lo funcional. O software pode indicar indiretamente possíveis causas de erros, mas ainda é preciso um operador humano que perceba que algum problema está ocorrendo e intervenha no sistema quando necessário: reparando tubos, substituindo componentes de hardware, etc.

## 8 CONCLUSÃO

O sistema desenvolvido possibilitou o controle correto da umidade do solo, mantendo-a sempre dentro de limites aceitáveis para o bom desenvolvimento da cultura do milho. Com alteração de parâmetros ele deve ser capaz de controlar corretamente a irrigação para diferentes tipos de solo e de cultura.

O *software* é flexível o suficiente para o teste de novos algoritmos de controle, necessitando de novas funções na aba de configuração do acionamento de válvulas. Além disso, a base de dados de umidade do solo pode ser utilizada para o controle manual ou mesmo avaliação do consumo de água de uma cultura. Porém, o protocolo de comunicação sem fio ainda precisa ser melhorado, possibilitando um menor consumo de energia e uma melhor disponibilidade de comunicação.

Não foi possível testar o programa durante o ciclo completo de uma cultura de milho, devido ao tempo de execução do projeto. Porém, o sistema controlou corretamente a irrigação em um período de uma semana e pode ser utilizado por um maior intervalo de tempo, garantindo a quantidade correta de água para a cultura durante todo o ciclo.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os problemas que dependem de software foram resolvidos na medida em que surgiam, tornando o sistema cada vez mais robusto, o que é essencial para um *software* que se propõe a operar dias sem supervisão. Porém, um sistema de grande porte necessita de muito tempo de teste até que esteja relativamente livre de erros. Tais testes devem ser feitos com o sistema já em operação, pois somente a utilização pelo usuário final em campo fará com que o sistema esteja submetido a todas as variáveis, revelando erros que poderiam passar despercebidos no laboratório.

O monitoramento ambiental é uma possibilidade de expansão do sistema, visto que o mesmo se comportou de maneira adequada para monitorar a umidade do solo. Outros sensores podem ser acoplados nos módulos para medir temperatura, pressão atmosférica, umidade relativa do ar, etc. Assim, é possível montar uma base de dados para avaliação: do consumo hídrico de uma cultura; da temperatura em uma casa de vegetação ou viveiro de aves; distribuição da chuva ao longo de um pivô central, etc.

A existência de problemas é algo esperado em um sistema de *software* de grande porte, o que não inviabiliza sua utilização. A complexidade do controle de um sistema tão heterogêneo quanto um sistema de irrigação é um grande desafio que deve ser superado por etapas, com um problema sendo corrigido a cada momento. Todos os seus componentes devem ser testados individualmente e em grupo, de modo que a falha de um deles não inviabilize o funcionamento do sistema como um todo.

Ao se introduzir eletrônica e sistemas automáticos em campo cria-se novos desafios para os produtores, sendo a necessidade de mão de obra qualificada um deles. Novos conhecimentos deverão ser absorvidos por seus operadores, além de atrair e fixar mão de obra qualificada para o meio rural. Um sistema de automação pode ajudar os produtores em áreas mais remotas a se familiarizarem cada vez mais com as novas tecnologias, ajudando-os a quebrar preconceitos e barreiras quanto à informática.

## REFERÊNCIAS

- AL-KARAKI, J. N.; KAMAL, A. E. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. **Wireless Communications, IEEE**, v. 11, n. 6, p. 6-28, 2004. ISSN 1536-1284.
- AYARS, J. E.; PHENE, C. J. Automation. In: FREDDIE R. LAMM, J. E. A. e FRANCIS, S. N. (Ed.). **Developments in Agricultural Engineering**: Elsevier, v. Volume 13, 2007. p.259-284. ISBN 0167-4137.
- BARR, M. **Programming Embedded Systems in C and C++** O'Reilly 1999. ISBN 1-56592-354-5.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. Viçosa: UFV, 2008. 625 p.
- CARVALHO, J. D. A.; MELLO, C. R. D.; JÚNIOR, R. A. B.; REINATO, C. H.; SANTANA, M. J. D. UTILIZAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO PARA CONTROLE DE VAZÃO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 51-56, 2000.
- CARY, J. W.; FISHER, H. D. Irrigation Decisions Simplified With Electronics And Soil Water Sensors. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 47, n. 6, p. 1219-1223, 1983 1983.
- CASADESÚS, J.; MATA, M.; MARSAL, J.; GIRONA, J. A general algorithm for automated scheduling of drip irrigation in tree crops. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 83, n. 0, p. 11-20, 2012. ISSN 0168-1699.
- COELHO, S. L.; TEIXEIRA, A. D. S. AVALIAÇÃO DO TENSÍMETRO ELETRÔNICO NO MONITORAMENTO DO POTENCIAL MATRICIAL DE ÁGUA NO SOLO. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 3, p. 536-545, 2004.
- COOK, D. **H-Bridge Motor Driver Using Bipolar Transistors** 2012.
- CRUZ, T. M. L. **Estratégia de Monitoramento e Automação em Sistemas de Irrigação Utilizando Dispositivos de Comunicação em Redes de Sensores Sem Fio**. 2009. 84 p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Agrícola, UFC, Fortaleza.
- CRUZ, T. M. L.; TEIXEIRA, A. D. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; SANTOS, C. C. D.; OLIVEIRA, A. D. S. D.; DAHER, S. Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 1, p. 33-45, 2010. ISSN 0100-6916.
- DURSUN, M.; OZDEN, S. A prototype of PC based remote control of irrigation. 2010 International Conference on Environmental Engineering and Applications (ICEEA) 2010. Tampa Bay. **Anais...** 10-12 Sept. 2010. p.255-258.
- EARL, R.; THOMAS, G.; BLACKMORE, B. S. The potential role of GIS in autonomous field operations. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 25, n. 1-2, p. 107-120, 2000. ISSN 0168-1699.

FERNÁNDEZ, J. E.; MORENO, F.; MARTÍN-PALOMO, M. J.; CUEVAS, M. V.; TORRES-RUIZ, J. M.; MORIANA, A. Combining sap flow and trunk diameter measurements to assess water needs in mature olive orchards. **Environmental and Experimental Botany**, v. 72, n. 2, p. 330-338, 2011. ISSN 0098-8472.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, F. **Fevereiro, março e abril: chuvas ficam 46,4% abaixo da normal**. Fortaleza 2013.

GUIFEN, C.; LISONG, Y. Research of irrigation control system based on fuzzy neural network. *Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC)*, 2011. **Anais...** 19-22 Aug. 2011. p.209-212.

HART, C. F. S. **DDL Specifications**. Hart Field Communication Specifications 2008.

HATFIELD, J. L. Precision agriculture and environmental quality: challenges for research and education. **National Workshop Precision Agriculture and the Environment: Research Priorities of the Nation**, 2000.

IEEE. **Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)**. IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements 2006.

ISA, I. S. O. A. **Wireless Systems for Automation: Process Control and Related Applications**. ISA-100.11a-2009 2009.

KIM, Y.; EVANS, R. G. Software design for wireless sensor-based site-specific irrigation. **Comput. Electron. Agric.**, v. 66, n. 2, p. 159-165, 2009. ISSN 0168-1699.

KYOCERA. KS5T - HIGH EFFICIENCY POLYCRYSTALLINE PHOTOVOLTAIC MODULE. 2013. Disponível em: <[http://www.selectsolar.co.uk/uploads/asset\\_file/KS5%20Kyocera%20panel.pdf](http://www.selectsolar.co.uk/uploads/asset_file/KS5%20Kyocera%20panel.pdf)>.

LEDIEU, J.; DE RIDDER, P.; DE CLERCK, P.; DAUTREBANDE, S. A Method of Measuring Soil Moisture by Time-Domain Reflectometry. **Journal of Hydrology**, v. 88, n. 3-4, p. 319-328, 1986.

LEE, T.-Y.; HSIUNG, P.-A. Embedded software synthesis and prototyping. **Consumer Electronics, IEEE Transactions on**, v. 50, n. 1, p. 386-392, 2004. ISSN 0098-3063.

LEONARDI, S.; ROTH, G. **Defining precision irrigation: A new approach to irrigation management**. Research Bulletin, p. 4. 2009

LOUREIRO, A. A. F. **Redes de Sensores Sem Fio XXI** Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - Mini Curso, Natal-RN 2003.

LUKANGU, G.; SAVAGE, M. J.; JOHNSTON, M. A. Use of sub-hourly soil water content measured with a frequency-domain reflectometer to schedule irrigation of cabbages. **Irrigation Science**, v. 19, n. 1, p. 7-13, 1999. ISSN 0342-7188.

MATESE, A.; DI GENNARO, S. F.; ZALDEI, A.; GENESIO, L.; VACCARI, F. P. A wireless sensor network for precision viticulture: The NAV system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 69, n. 1, p. 51-58, 2009. ISSN 0168-1699.

MCCARTHY, A. C.; HANCOCK, N. H.; RAINE, S. R. Towards evaluation of adaptive control systems for improved site-specific irrigation of cotton., National Conference of Irrigation Australia Limited, 2008. Melbourne, Australia. **Anais...** 20–22 de Maio. p.8 pp.

MCCARTHY, A. C.; HANCOCK, N. H.; RAINE, S. R. VARIwise: A general-purpose adaptive control simulation framework for spatially and temporally varied irrigation at sub-field scale. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 70, n. 1, p. 117-128, 2010. ISSN 0168-1699.

MCLELLAN, J. F.; FRIESEN, L. Who needs a 20 cm precision farming system? , Position Location and Navigation Symposium, 1996., IEEE 1996, 1996. 22-26 Apr 1996. p.426-432.

MEDICI, L. O.; ROCHA, H. S. D.; CARVALHO, D. F. D.; PIMENTEL, C.; AZEVEDO, R. A. Automatic controller to water plants. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 6, p. 727-730, 2010.

MEGERIAN, S.; KOUSHANFAR, F.; VELTRI, G.; POTKONJAK, M. Exposure in wireless sensor networks: theory and practical solutions. **Wireless Networks**, v. 8, n. 5, 2002. ISSN 1022-0038.

MORAN, M.; CLARKE, T.; QI, J.; PINTER JR, P. Madmac: a Test of Multispectral Airborne Imagery As a Farm Management Tool **Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings** 1996.

NAHRY, A. H. E.; ALI, R. R.; BAROUDY, A. A. E. An approach for precision farming under pivot irrigation system using remote sensing and GIS techniques. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 4, p. 517-531, 2011. ISSN 0378-3774.

NOBORIO, K.; MCINNES, K. J.; HEILMAN, J. L. Field measurements of soil electrical conductivity and water content by time-domain reflectometry. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 11, n. 2–3, p. 131-142, 1994. ISSN 0168-1699.

NUNES, K. G.; VASCONCELOS, H. S.; TEIXEIRA, A. S.; OLIVEIRA, T. T.; NETO, O. C. R. MICROCONTROLADOR APLICADO NA AUTOMAÇÃO DA RETROLAVAGEM DE FILTROS PARA IRRIGAÇÃO. In: SBEA, S. B. D. E. A.-. XLII - Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA, 2013. Fortaleza - CE - Brasil. **Anais...** SBEA.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1998.

OLIVEIRA, A. D. S. D. **Avaliação do Sensor de umidade TOPDEA no Manejo da Irrigação**. 2008. 71 p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Agrícola, UFC, Fortaleza.

PELLETIER, G.; TAN, C. S. Determining Irrigation Wetting Patterns Using Time Domain Reflectometry. **HortScience**, v. 28, n. 4, p. 338-339, April 1993 1993.

PHENE, C. J.; ALLEE, C. P.; PIERRO, J. D. Soil matric potential sensor measurements in real-time irrigation scheduling. **Agricultural Water Management**, v. 16, n. 3, p. 173-185, 1989. ISSN 0378-3774.

POLAK, A.; WALLACH, R. Analysis of soil moisture variations in an irrigated orchard root zone. **Plant and Soil**, v. 233, n. 2, p. 145-159, 2001. ISSN 0032-079X.

QUEIROZ, T. M. D.; BOTREL, T. A.; FRIZZONE, J. A. Desenvolvimento de software e hardware para irrigação de precisão usando pivô central. **Engenharia Agrícola**, v. 28, p. 44-54, 2008. ISSN 0100-6916.

QUEIROZ, T. M. D.; CARVALHO, J. D. A.; RABELO, G. F.; ANDRADE, M. J. B. Avaliação de Sistema Alternativo de Automação da Irrigação do Feijoeiro em Casa de Vegetação. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, 2005.

RICHARDS, L. A.; GARDNER, W. Tensiometers For Measuring The Capillary Tension Of Soil Water. **Agron. J.**, v. 28, n. 5, p. 352-358, 1936 1936.

ROCHA NETO, O. C. **Proposta de Software para Controle e Monitoramento de Sistema de Irrigação Através de Rede de Sensores Sem Fio**. 2009. 49 p. Monografia (Graduação). Departamento de Engenharia Agrícola, UFC, Fortaleza.

\_\_\_\_\_. **Rede Neural Artificial Aplicada ao Manejo da Irrigação**. 2012. 111 p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Agrícola, UFC, Fortaleza.

ROCHA, T. Ceará enfrenta a 7ª pior seca dos últimos 55 anos. **Diário do Nordeste**. Fortaleza. 30 de Maio de 2013. Disponível em: <<http://diariodonordeste.globo.com/materia.asp?codigo=1273431>>. Acesso em: 31 de Maio de 2013.

SANTOS, C. C.; TEIXEIRA, A. D. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; DAHER, S.; BARROSO, G. C. A wireless system for remote monitoring soil moisture and temperature., Brazilian Congress of Agricultural Engineering, 2008. City Iguassu Falls. **Anais...** Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2008.

SANTOS, C. C. D. **Sistema de Sensoriamento Remoto de Umidade e Temperatura do Solo para Irrigação de Precisão**. 2008. 129 p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Elétrica, UFC, Fortaleza.

SIEBERT, S.; BURKE, J.; FAURES, J. M.; FRENKEN, K.; HOOGEVEEN, J.; DÖLL, P.; PORTMANN, F. T. Groundwater use for irrigation – a global inventory. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 14, n. 10, p. 1863-1880, 2010. ISSN 1607-7938.

SILVA, I. O. **Desenvolvimento de um sensor capacitivo para o monitoramento de umidade do solo**. 2005. 86 p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Agrícola, UFC, Fortaleza.

SILVA, I. O.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFISTULA, F. J. F.; LEÃO, R. A. O. Development of a capacitive sensor for monitoring soil moisture. 2005 ASAE MEETING, 2005. Tampa Bay, Florida. **Anais...** Proceedings of the 2005 ASAE Meeting, 2005.

SMAJSTRLA, A. G.; LOCASCIO, S. J. Tensiometer-controlled, drip-irrigation scheduling of tomato. **Applied engineering in agriculture**, v. 12, n. 3, p. 315-319, 1996.

SMITH, R. J.; RAINE, S. R.; MCCARTHY, A. C.; HANCOCK, N. H. Managing spatial and temporal variability in irrigated agriculture through adaptive control. **Australian Journal of Multi-disciplinary Engineering**, v. 7, n. 1, p. 79-80, 2009. ISSN 1448-8388.

THOMSON, S. J.; THREADGILL, E. D. Microcomputer control for soil moisture-based scheduling center pivot irrigation systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 1, n. 4, p. 321-338, 1987. ISSN 0168-1699.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. **WATER RESOURCES RESEARCH**, v. 16, n. 3, p. 574, 1980.

VASCONCELOS, H. S. **Web Embarcada em Redes de Sensores Sem Fio para Monitoramento e Atuação Remota em Sistema de Irrigação Agrícola**. 2011. 37 p. Monografia (Graduação). UFC, Sobral.

VELLIDIS, G.; TUCKER, M.; PERRY, C.; KVIEN, C.; BEDNARZ, C. A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 61, n. 1, p. 44-50, 2008. ISSN 0168-1699.

VILLALBA, L. J. G.; OROZCO, A. L. S.; CABRERA, A. T.; ABBAS, C. J. B. Routing Protocols in Wireless Sensor Networks. **Sensors**, 2009. ISSN 1424-8220.

WANG, Y.; LIU, F.; JENSEN, C. R. Comparative effects of deficit irrigation and alternate partial root-zone irrigation on xylem pH, ABA and ionic concentrations in tomatoes. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 5, p. 1907-1917, 2012.

WANG, Z.; KANG, S.; JENSEN, C. R.; LIU, F. Alternate partial root-zone irrigation reduces bundle-sheath cell leakage to CO<sub>2</sub> and enhances photosynthetic capacity in maize leaves. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 3, p. 1145-1153, February 1, 2012 2012.

WATTEYNE, T.; MOLINARO, A.; RICHICHI, M. G.; DOHLER, M. From MANET To IETF ROLL Standardization: A Paradigm Shift in WSN Routing Protocols. **Communications Surveys & Tutorials, IEEE**, v. 13, n. 4, p. 688-707, 2011. ISSN 1553-877X.

ZAKNICH, A. **Principles of Adaptive Filters and Self-learning Systems**. 2005. ISBN 978-1-85233-984-5.