

Luís Fernando Caparroz Duarte

**Sistema Automatizado Georreferenciado Sem Fio
para Irrigação Localizada
Auxiliado por Sensor de Umidade do Solo**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira

Campinas, SP
2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

D85s Duarte, Luís Fernando Caparroz
Sistema automatizado georreferenciado sem fio para irrigação localizada auxiliado por sensor de umidade do solo / Luís Fernando Caparroz Duarte. –Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientador: Elnatan Chagas Ferreira.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de, Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Controle automático - Instrumentação. 2. Instrumentação. 3. Sistemas de comunicação sem fio. 4. Agricultura de precisão. 5. Solo - Umidade. I. Ferreira, Elnatan Chagas. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Automated georeferenced wireless system for localized irrigation aided by soil moisture sensor.
Palavras-chave em Inglês: Automatic control - Instrumentation, Instrumentation, Wireless communication systems, Precision agriculture, Soil - Humidity
Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.
Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica
Banca Examinadora: José Antonio Siqueira Dias, Tulio Assunção Ribeiro
Data da defesa: 03/05/2010
Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Luís Fernando Caparroz Duarte

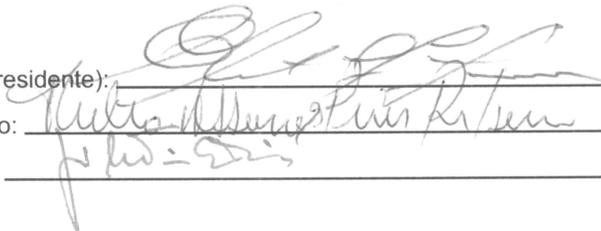
Data da Defesa: 3 de maio de 2010

Título da Tese: "Sistema Automatizado Georreferenciado Sem Fio para Irrigação Localizada Auxiliado por Sensor de Umidade do Solo"

Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira (Presidente):

Prof. Dr. Túlio Assunção Pires Ribeiro:

Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias:



Resumo

A preocupação com o futuro dos recursos hídricos e o valor agregado dos produtos da agricultura de precisão leva os produtores agrícolas a procurarem formas mais inteligentes e precisas do manejo da água. Neste trabalho apresenta-se uma proposta de um sistema automatizado georreferenciado de irrigação localizada baseado em leitura de sensor de umidade do solo, que visa baixo custo e é independente de uma rede de comunicações atuante em tempo integral ou de uma central de processamento.

Neste trabalho foi desenvolvido um Módulo de Irrigação Localizada Inteligente, que atua de acordo com o processamento das informações obtidas pelo sensor de umidade do solo. Também foram desenvolvidos um Módulo Programador responsável pela entrada dos dados e programação dos módulos de irrigação e um Módulo Acionador para Bombas d'Água, que liga e desliga a bomba d'água de acordo com a programação dos módulos de irrigação. Os módulos, que atuam de forma independente, são programados por comunicação sem fio, baseada no Simpliciti, um protocolo de comunicação sem fio de código aberto da Texas Instruments.

Palavras-chave: Instrumentação eletrônica, Irrigação localizada, Comunicação sem fio, Agricultura de precisão, Controle de umidade do solo.

Abstract

Concerns about the future of the water resources and the value of precision agriculture products takes the farmers to look for more intelligent and precise ways to manage the water. This work presents a proposal of an automated georeferenced localized irrigation system aided by soil moisture sensor, that aims for low cost and is independent of a sensor network or a processing central.

In this work it was developed an Intelligent Localized Irrigation Module, that actuates according to the informations acquired by the soil moisture sensor. It was also developed a Programming Module, responsible for the data entry and the irrigation modules programming and a Water Bomb Actuator Module, that turns on and off the water bomb according to the irrigation modules program. The independent working modules are programmed wirelessly, based on Simpliciti, an open source wireless protocol from Texas Instruments.

Keywords: Electronic instrumentation, Localized irrigation, Wireless communication, Precision agriculture, Soil moisture control.

Agradecimentos

Aos meus pais Luiz Fernando e Joana e aos meus irmãos Zé, Nana e Du, pelo grande apoio e carinho dedicados a mim nesse período.

Ao professor Dr. Elnatan Chagas Ferreira, pela orientação, atenção e confiança em meu trabalho.

Ao professor Dr. José Antônio Siqueira Dias, pela oportunidade a mim concedida e pelo auxílio prestado neste trabalho.

À secretária Ester, aos colegas e amigos do departamento que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao amigo Wellington Roque pela parceria no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Nuncio Perrella e a Texas Instruments pelas amostras dos componentes cedidas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Departamento de Eletrônica e Microeletrônica da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da UNICAMP (DEMIC), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao [NMC]: Andre Nobre, Daniel Fassa, Leonardo Terra, Marcelo Botelho, Marcos Teixeira, Raoni Ciasca, Ricardo Pini e Victor Miller, pela fraternal amizade e companheirismo.

E a Jamile Paschoalloto, pelo amor, comprometimento e fidelidade ao longo destes anos.

Aos meus pais, irmãos e amigos.

"Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem"
– Lex Parsimoniae

Sumário

| | |
|---|-------------|
| Lista de Figuras | x |
| Lista de Tabelas | xii |
| Glossário | xiii |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Objetivo | 2 |
| 2 Irrigação Localizada | 3 |
| 2.1 Introdução | 3 |
| 2.2 Vantagens e desvantagens | 4 |
| 2.3 Componentes do sistema | 4 |
| 2.4 Tipos de sistemas de irrigação localizada | 6 |
| 2.4.1 Irrigação por gotejamento | 6 |
| 2.4.2 Irrigação sub-superficial | 7 |
| 2.4.3 Irrigação por borbulhamento | 8 |
| 2.4.4 Irrigação por micro-aspersão | 8 |
| 2.5 Irrigação Inteligente | 9 |
| 3 Automação da Irrigação | 11 |
| 3.1 Introdução | 11 |
| 3.2 Sensores de umidade do solo | 11 |
| 3.2.1 Método gravimétrico | 11 |
| 3.2.2 Método capacitivo | 12 |
| 3.2.3 Método resistivo | 12 |
| 3.2.4 Reflectometria no domínio do tempo | 13 |
| 3.2.5 Método de condutividade térmica | 13 |
| 3.3 Comunicação entre sensores e atuadores | 13 |
| 3.3.1 Rede sem fio | 14 |
| 3.3.2 Rede de sensores | 15 |
| 3.3.3 Protocolos Proprietários | 16 |
| 3.4 Módulos Independentes | 17 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Irrigação Localizada Automatizada por Módulos Independentes | 18 |
| 4.1 | Proposta do Sistema | 18 |
| 4.2 | Desenvolvimento do Sistema | 19 |
| 4.2.1 | Descrição dos módulos do Sistema | 20 |
| 4.2.2 | Programação dos módulos | 27 |
| 4.2.3 | Descrição do <i>hardware</i> desenvolvido | 31 |
| 4.3 | Funcionamento do Sistema | 41 |
| 4.4 | <i>Firmware</i> | 42 |
| 4.4.1 | <i>Firmware</i> do MABA | 42 |
| 4.4.2 | <i>Firmware</i> do MILI | 44 |
| 4.4.3 | <i>Firmware</i> do MP | 44 |
| 5 | Resultados e Discussões | 47 |
| 5.1 | Teste da programação em visada direta | 47 |
| 5.2 | Teste da programação em campo | 47 |
| 5.3 | Considerações sobre o sistema | 49 |
| 6 | Considerações Finais | 50 |
| 6.1 | Conclusão | 50 |
| 6.2 | Sugestão de trabalhos futuros | 50 |
| | Referências bibliográficas | 52 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Distribuição da umidade no solo em sistemas localizados. | 3 |
| 2.2 | Organização de um sistema de irrigação localizada. | 5 |
| 2.3 | Esquema de um cabeçal de controle. | 6 |
| 2.4 | Cultura beneficiada pelo uso da irrigação por gotejamento. | 7 |
| 2.5 | Vista de uma lateral sub-superficial, evidenciando o formato do bulbo molhado. | 8 |
| 2.6 | Irrigação por borbulhamento em um campo gramado. | 8 |
| 2.7 | Micro-aspersor rotativo. | 9 |
| 2.8 | Micro-aspersor estacionário. | 9 |
| 3.1 | Resposta de um sensor resistivo medida a 25°C. | 12 |
| 3.2 | Irrigação localizada com central de controle conectada por fios | 14 |
| 4.1 | Sistema formado pelos módulos MABA, MILIs e MP. | 19 |
| 4.2 | Tela 1 - Abertura do programa. | 21 |
| 4.3 | Tela 2 - Adicionar ou Remover Módulo. | 22 |
| 4.4 | Tela 3 - Programação dos Módulos. | 23 |
| 4.5 | Tela 4 - Mapa de Programação. | 24 |
| 4.6 | Tela 5 - Menu de configurações do aplicativo. | 24 |
| 4.7 | Tela 6 - Informações do GPS. | 25 |
| 4.8 | Tela 7 - Logs. | 25 |
| 4.9 | Fluxograma do aplicativo Sissenagri. | 26 |
| 4.10 | Fluxograma do aplicativo Sissenagri. | 27 |
| 4.11 | Mensagens trocadas entre os módulos quando o módulo encontrado faz parte do grupo que receberá programação. | 29 |
| 4.12 | Mensagens trocadas entre os módulos quando o módulo encontrado não faz parte do grupo que receberá programação. | 29 |
| 4.13 | Mensagens enviadas pelo Sissenagri ao MP. | 30 |
| 4.14 | Mensagem 0 - Interrogar sensor. | 30 |
| 4.15 | Mensagem 1 - Dispensar sensor. | 30 |
| 4.16 | Mensagem 2 - Programar primeira parte. | 31 |
| 4.17 | Mensagem 3 - Programar segunda parte. | 31 |
| 4.18 | Mensagem 4 - Programar novo ID. | 31 |
| 4.19 | Diagrama de blocos do sistema. | 32 |
| 4.20 | Parte inferior do circuito que forma o núcleo do sistema. | 33 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.21 | Parte superior do circuito que forma o núcleo do sistema. | 36 |
| 4.22 | Face superior do núcleo de controle e comunicação. | 37 |
| 4.23 | Face inferior do núcleo de controle e comunicação. | 37 |
| 4.24 | Esquema elétrico do MABA. | 38 |
| 4.25 | PCB do MABA. | 38 |
| 4.26 | Esquema elétrico do MILI. | 39 |
| 4.27 | PCB do MILI. | 40 |
| 4.28 | Esquema elétrico do MP. | 41 |
| 4.29 | Face superior do MP. | 42 |
| 4.30 | Face inferior do MP. | 42 |
| 4.31 | Fluxograma do <i>firmware</i> do MABA. | 43 |
| 4.32 | Fluxograma do <i>firmware</i> do MILI. | 45 |
| 4.33 | Fluxograma do <i>firmware</i> do MP. | 46 |
| 5.1 | Cenário de teste. | 48 |
| 5.2 | Mapa do cenário de teste. | 48 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Classificação da qualidade da água de irrigação de acordo com o potencial de entupimento. | 5 |
| 2.2 | Variação da pressão, vazão e intensidade de precipitação para os tipos de micro-aspersores. | 9 |
| 3.1 | Tecnologias sem fio e características associadas. | 15 |
| 3.2 | Aplicações potenciais de diferentes serviços. | 16 |
| 3.3 | Comparação entre os principais protocolos de rede proprietários. | 17 |
| 4.1 | Pinagem da barra de pinos P5. | 33 |
| 4.2 | Pinagem da barra de pinos P1. | 34 |
| 4.3 | Pinagem da barra de pinos P2. | 34 |
| 4.4 | Pinagem da barra de pinos P3. | 35 |
| 4.5 | Pinagem da barra de pinos P4. | 35 |

Glossário

- ACLK *Auxiliar Clock* - *Clock Auxiliar*
- ADC *Analog-to-Digital Converter* - Conversor analógico-digital
- CD *Compact Disk*
- CI Circuito Integrado
- CSS *Chirp Spread Spectrum* - Espalhamento espectral por chirlo
- DEMIC Departamento de Eletrônica e Microeletrônica
- DSSS *Direct Sequence Spread Spectrum* - Espalhamento espectral por sequência direta
- FEEC Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
- GPS *Global Positioning System* - Sistema de posicionamento global
- ID *IDentity* - Identidade
- IDE (*Integrated Development Environment* - Ambiente Integrado de Desenvolvimento
- IO *Input and Output* - Entrada e saída
- JTAG *Joint Test Action Group*
- LAN *Local Area Network* - Rede local
- MABA Módulo Acionador para Bombas d'Água
- MILI Módulo de Irrigação Localizada Inteligente
- MP Módulo Programador
- PC *Personal Computer* - Computador Pessoal
- PCB *Printed Circuit Board* - Placa de circuito impresso
- PCS *Personal Communications System* - Sistema de comunicação pessoal
- PDA *Personal Digital Assistant* - Assistente pessoal digital

RF *Radio Frequency* - Frequência de rádio

RFID *Radio Frequency IDentification* - Identificação por Rádio Frequência

RTC *Real Time Clock* - Relógio de tempo real

SBW *Spy-Bi-Wire*

SISSENAGRI Sistema de Sensoriamento Agrícola

SMA *SubMiniature type A*

SMCLK *Secondary Master Clock* - Clock Mestre Secundário

SMD *Surface Mount Device*

SPI *Serial Peripheral Interface* - Interface Periférica Serial

UART *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*

UNICAMP Universidade Estadual de Campinas

USART *Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter*

WLAN *Wireless Local Area Network* - Rede local sem fio

Capítulo 1

Introdução

Melhorar a eficiência da agricultura e reduzir seu impacto ambiental são necessidades cada vez mais expressivas no meio agrícola. Para alcançar resultados satisfatórios na proteção do meio ambiente sem deixar de buscar por patamares mais elevados de produtividade, é necessária a utilização de técnicas avançadas para o manejo das culturas.

A agricultura de precisão vem sendo cada vez mais estudada e desenvolvida, com o uso da tecnologia da informação para processar dados específicos de áreas geograficamente referenciadas.

Esta técnica agrícola se baseia no princípio da variabilidade espacial do solo e do clima e usa tecnologia da informação para processar informações de áreas geograficamente referenciadas e interferir nestas áreas de acordo com suas necessidades individuais, a fim de estabelecer condições ideais às espécies cultivadas.

É notório que grande parte dos esforços no estudo da agricultura de precisão se concentram na aplicação espacialmente variável de fertilizantes e pesticidas. Como apresentado no trabalho [1], os resultados do uso eficiente de pesticidas trazem uma grande economia dos insumos empregados evitando o desperdício, protegendo o meio ambiente pela minimização do uso dos agrotóxicos e aumentando a lucratividade. Não obstante, encontram-se também os estudos na aplicação de fertilizantes, cujo objetivo principal é a melhoria do rendimento da cultura.

No que se refere ao uso dos recursos hídricos, o uso não otimizado da água na irrigação, além de ser um problema muito sério por si só, pois diminui consideravelmente os recursos hídricos disponíveis, contribui para a erosão do solo e gera gastos com energia elétrica. Esta prática inadequada gera despesas com fertilizantes e defensivos agrícolas, possibilita a contaminação do lençol freático e de cursos naturais d'água e contribui para a erosão do solo.

O manejo de irrigação é uma prática que visa a adoção de critérios na aplicação da água como a determinação do momento e da quantidade de água empregada a cada irrigação. Esta prática vem sendo adotada em trabalhos como em [2] e [3] e tem como resultado o suprimento das necessidades hídricas das plantas e a garantia do uso racional da água, energia elétrica e insumos agrícolas, obtendo alta produtividade com menor impacto ambiental.

Sabe-se que o solo possui diferentes características físico-hídricas em sua extensão. Em certas regiões a água aplicada pode percolar mais agilmente áreas arenosas e alagar áreas argilosas. Estudos realizados [4] mostram a necessidade de se conhecer os atributos físico-hídricas do solo em áreas extensas onde há a possibilidade de haver grande variabilidade significativa destes atributos. Para isso, exige-se uma grande quantidade de pontos amostrais, o que resulta na necessidade de uma

grande quantidade de sensores. Espera-se que o custo da implementação destes sensores seja compensado com a economia no uso de agrotóxicos, fertilizantes, água e energia elétrica, porém, para que essa compensação seja possível na prática, os sensores e demais equipamentos envolvidos devem ter preços acessíveis.

Em uma cultura comercial não só o solo possui variação espacial, mas em alguns casos, também as plantas. Plantas danificadas ou adoecidas podem ser substituídas através do replantio e as novas plantas podem não possuir as mesmas necessidades hídricas das demais a seu redor. Há ainda casos, como no paisagismo, onde diferentes espécies com necessidades hídricas muito divergentes dividem uma mesma área. A aplicação da agricultura de precisão no manejo da irrigação permite evitar o desperdício da água, além de prover o bom desenvolvimento da cultura irrigada.

O custo dos equipamentos requeridos para este trabalho podem inviabilizar a implementação desses sistemas. Neste foco, as soluções de baixo custo recebem um interesse maior por parte dos agricultores e pesquisadores. Ganham ainda mais força quando o retorno financeiro cobre com folga os investimentos necessários para sua implantação.

Sistemas eletrônicos dependem de energia elétrica para seu funcionamento. Levar energia a uma grande quantidade de sensores espalhados por uma vasta área monitorada pode não ser uma tarefa trivial. Esta dificuldade se agrava quando incluímos elementos como unidades de controle e atuadores no campo. O modo de transmissão dos dados entre os sensores de umidade do solo, as unidades de controle e os atuadores também é uma questão importante para implementação de um sistema de irrigação inteligente. Embora os meios cabeados possam ser usados para levar energia e transmitir informações entre os elementos da rede, estes tem custos elevados por empregar fios e possuem outras desvantagens como a baixa flexibilidade e necessidade de proteção contra intempéries.

Embora soluções inteligentes para o desenvolvimento da irrigação na agricultura de precisão baseadas no uso de rede de dados para intercomunicação dos sensores de umidade do solo, atuadores e controladores tenham sido propostas [5, 6, 7], a implementação destas redes de dados é bastante difícil de ser implementada na prática, pois o consumo de energia elétrica para manter os elementos da rede se comunicando é considerável e existe uma severa limitação do número de nós quando se trata de rede sem fio, por exemplo, uma rede do tipo ZigBee [8].

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de irrigação localizada automatizado, referenciado geograficamente e auxiliado por sensores de umidade do solo.

Este sistema deve operar com baixo consumo de energia elétrica.

É desejável que o equipamento desenvolvido seja modular e que o núcleo de controle possibilite sua aplicação em outros contextos de pesquisa e desenvolvimento, além de ter baixo custo ao ponto de ser passível de aplicação na prática.

Capítulo 2

Irrigação Localizada

2.1 Introdução

Com a finalidade de se obter um melhor aproveitamento do uso da água e evitar desperdícios, a irrigação localizada é uma técnica que vem sendo fortemente adotada. Este tipo de irrigação apresenta um grande potencial para uso mais racional e otimizado do recursos hídricos.

A exemplo das principais culturas que se beneficiam da irrigação localizada podemos citar abacate, citros, uva, morango, tomate, flores e hortaliças. Este tipo de irrigação também é empregado em projetos de paisagismo.

Esta técnica consiste em distribuir a água em baixa pressão através de uma rede de encanamentos e mangueiras, aplicando-a em pequenas quantidades diretamente na região da zona radicular das plantas onde ocorre a maior concentração de raízes, de forma previamente padronizada. Desta forma, somente uma fração da superfície do solo é molhada, conforme apresentado na Fig. 2.1 [9].

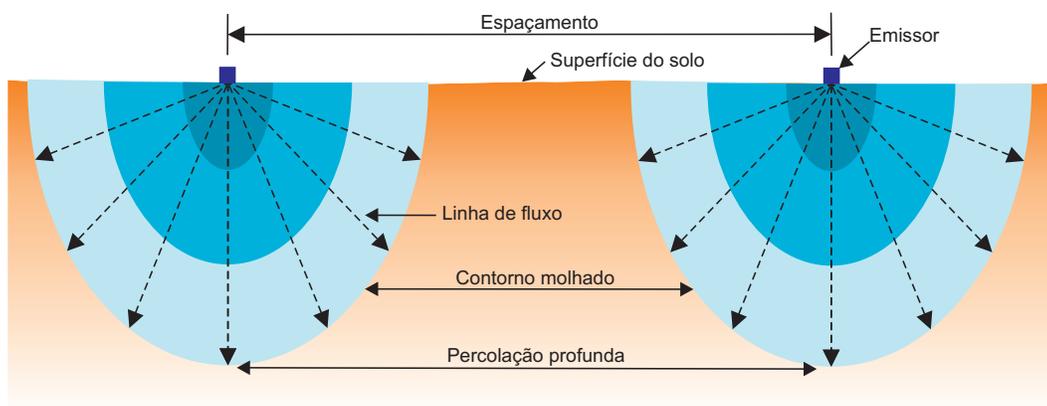


Fig. 2.1: Distribuição da umidade no solo em sistemas localizados.

2.2 Vantagens e desvantagens

A principal vantagem dos sistemas de irrigação localizada é permitir um melhor aproveitamento hídrico ao irrigar apenas a área ao redor da planta. Assim, diminui a evaporação direta da água do solo para a atmosfera e reduz perdas por percolação profunda, escoamento superficial e por ventos.

Não obstante, esta técnica também apresenta uma série de outras consequências favoráveis. Como opera em baixas pressões e vazões, é econômica em relação ao consumo de energia elétrica necessária para sua utilização e também em relação aos equipamentos empregados como bombas que não necessitam de grande potência e, relação a outros sistemas de irrigação como aspersão por pivô central e irrigação por superfície.

Como o sistema mantém a umidade razoavelmente constante, ele propicia aumento da produtividade, melhorando a qualidade do produto e reduz o perigo de salinização do solo.

Possibilita a aplicação de produtos químicos (fertilizantes, inseticidas, fungicidas) na água de irrigação, o que acarreta na redução de mão-de-obra e da quantidade de insumos e aumenta a eficiência de aplicação destes produtos. Como não molha a parte aérea das plantas, facilita o controle fitossanitário.

Além dos fatores acima mencionados, existe também a possibilidade de ser automatizado, o que permite manter os níveis de umidades no solo extremamente otimizados, aumentando a produtividade, elevando a qualidade do produto e utilizando os recursos hídricos de uma maneira racional e econômica.

Quando comparado a outros sistemas, a irrigação localizada apresenta um elevado custo inicial além da necessidade de manutenção periódica, pois pode apresentar problemas de entupimento devido ao pequeno diâmetro dos emissores.

Se o sistema não for bem dimensionado hidráulicamente, a uniformidade de distribuição dos emissores pode ser afetada. Isso acontece principalmente em áreas declivosas, onde emissores que operam com baixos valores de pressão podem ter variações de vazão significativas.

2.3 Componentes do sistema

Conforme ilustrado pela Fig. 2.2 [10], o sistema de irrigação localizada é composto por estação de bombeamento, cabeçal de controle, linhas principais, linhas de derivação, linhas laterais, válvulas e emissores.

Na irrigação localizada a água inicia seu fluxo a partir do reservatório através da sucção executada pela estação de bombeamento. De acordo com o projeto e tipo de reservatório, esta estação é normalmente composta por bomba submersa (tipo sapo) ou centrífuga.

O cabeçal de controle, que é constituído por medidores de vazão, válvulas de controle de pressão, registros, manômetros, sistema de filtragem e injetor de fertilizantes, fica situado no início da linha principal logo após a moto-bomba e constitui uma das principais partes de um sistema de irrigação localizada (Fig. 2.3).

Enquanto os medidores de vazão junto com as válvulas de controle de pressão, registros e manômetros permitem o controle do volume d'água aplicado, o sistema de filtragem controla a qualidade da água evitando entupimentos garantindo que não haja má distribuição da água ao longo das linhas.

É comum encontrarmos o uso de controladores de pressão e vazão em vários pontos do sistema de

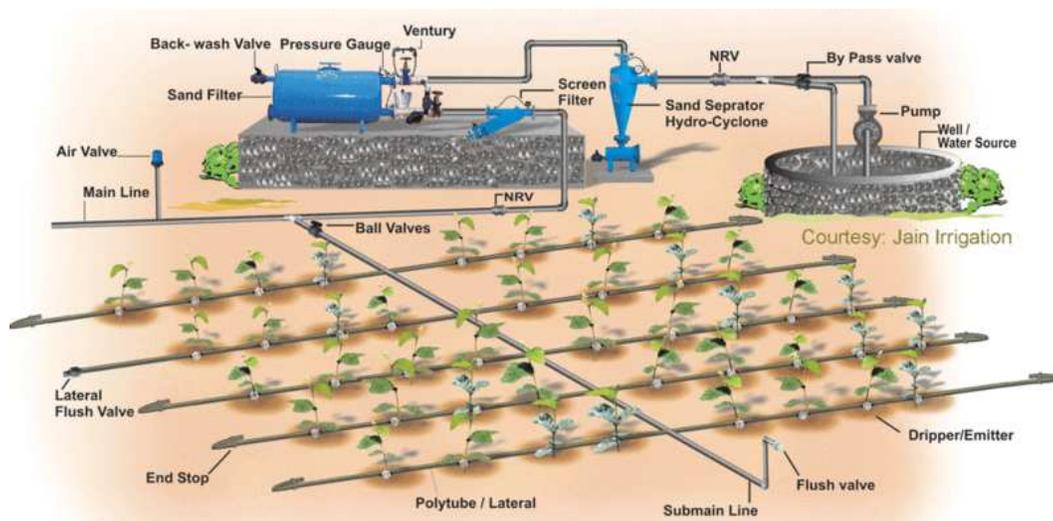


Fig. 2.2: Organização de um sistema de irrigação localizada.

irrigação localizada, já que este opera em baixas pressões. Desta forma é possível manter um melhor controle da pressão de todo o sistema, acarretando assim uma melhor uniformidade de distribuição de água e uma irrigação mais inteligente.

O sistema de filtragem pode utilizar filtros de areia, tela, disco e hidrociclones, sendo que a seleção dos elementos filtrantes depende da qualidade da água empregada na irrigação e leva em conta fatores químicos físicos e biológicos como classificados na Tab. 2.1.

Tab. 2.1: Classificação da qualidade da água de irrigação de acordo com o potencial de entupimento.

| Fator | Perigo de entupimento | | |
|------------------------------------|-----------------------|-------------|--------|
| | Pequeno | Médio | Grande |
| Físico | | | |
| - Sólidos em suspensão | 50 | 50-100 | 100 |
| Químico | | | |
| - pH | 7,0 | 7,0-8,0 | 8,0 |
| - Sólidos dissolvidos | 500 | 500-2000 | 2000 |
| - Manganês (máx ppm) | 0,1 | 0,1-1,5 | 1,5 |
| - Ferro (máx. ppm) | 0,1 | 0,1-1,5 | 1,5 |
| Sulfeto de hidrogênio (máx. ppm) | 0,5 | 0,5-2,0 | 2,0 |
| Biológico | | | |
| - População de bactéria (máx. ppm) | 10000 | 10000-50000 | 50000 |

Devido à importância que a fertirrigação adquiriu no cenário da irrigação, embora não obrigatório, é comum a instalação de um sistema injetor de fertilizantes antes das linhas de distribuição. Estes sistemas permitem a aplicação de fertilizantes solúveis na água de irrigação e auxiliam a minimizar os custos com mão-de-obra e insumos, além de permitir um melhor aproveitamento dos fertilizantes pela planta.

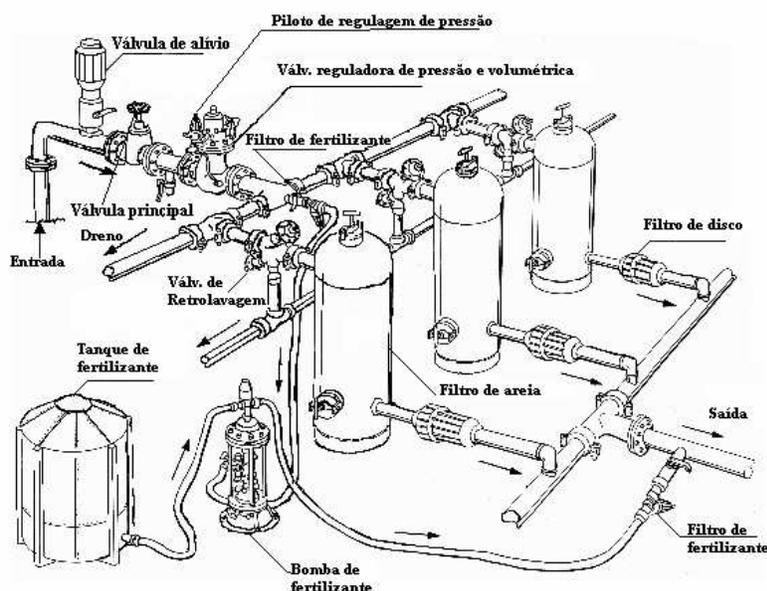


Fig. 2.3: Esquema de um cabeçal de controle.

Após sair do cabeçal de controle, a água é conduzida até as linhas de derivação pela linha principal. Esta tubulação pode ser instalada na superfície ou enterrada para facilitar a movimentação de maquinário agrícola nas proximidades do cabeçal de controle. Estas linhas são de polietileno, PVC ou metal galvanizado.

As linhas de derivação que recebem a água da linha principal se derivam em linhas laterais onde encontram-se os emissores, que são dispositivos que fornecem uma pequena vazão uniforme para aplicação de água sob taxa constante.

2.4 Tipos de sistemas de irrigação localizada

A irrigação localizada pode ser subdividida em irrigação por gotejamento, irrigação sub-superficial, irrigação por borbulhamento (*bubbler*) e irrigação por micro-aspersão.

2.4.1 Irrigação por gotejamento

Na irrigação por gotejamento a aplicação de água é feita através de tubos perfurados com orifícios de pequeno diâmetro ou por gotejadores. A Fig. 2.4 apresenta uma cultura beneficiada pelo uso da irrigação por gotejamento.

Os gotejadores são peças baratas, resistentes e compactas que são conectadas às tubulações flexíveis mantendo-se na linha, sobre a linha ou no prolongamento das linhas laterais e foram desenvolvidas para fornecer uma vazão relativamente baixa, constante e uniforme de água. Normalmente eles trabalham sob pressão constante na faixa entre 5 e 30 m.c.a permitindo uma vazão que pode variar entre 2 e 20 l/h.



Fig. 2.4: Cultura beneficiada pelo uso da irrigação por gotejamento.

Como regra de qualidade no dimensionamento da linha lateral, a variação da vazão entre o primeiro e o último gotejador na linha lateral não deve exceder 10% da vazão média dos gotejadores ao longo da linha.

Os principais tipos de gotejadores são microtubos, gotejador com longo percurso integrado, gotejador tipo orifício, tubos perfurados e microgotejadores.

Os microtubos consistem em um pedaço comprido de tubulação de pequeno calibre, o qual é inserido diretamente na linha lateral. A vazão do microtubo varia em função da pressão disponível na linha lateral, do comprimento e do diâmetro do microtubo que pode variar entre 0,5 e 1,5 mm na parte interna. Também conhecidos como espaguete, foram os precursores da irrigação por gotejamento.

Gotejadores com longo percurso integrado são baseado no mesmo princípio dos microtubos, porém apresentam maior uniformidade e menor susceptibilidade a danos mecânicos. Nestes o longo percurso do fluxo foi concentrado em peças compactas através de espiral ou labirintos e assim são mantidos inseridos na própria linha lateral.

Gotejadores tipo orifício propiciam a liberação da água através de orifícios com diâmetros muito pequenos. Estes existem em diversos modelos e são normalmente conectados sobre a linha.

Assim como os gotejadores com longo percurso os gotejadores tipo tubos perfurados, ou tubogotejadores, são mantidos fundidos na própria tubulação da linha lateral e aplicam a água através de emissores. Podem ser classificados de acordo com o número de seções de fluxo (câmaras simples ou duplas) e com relação ao tipo de sistema de controle de vazão (orifício, labirinto e capilar).

2.4.2 Irrigação sub-superficial

Também conhecida como irrigação por gotejamento sub-superficial ou IGS, este tipo de irrigação é realizada por emissores enterrados que aplicam a água diretamente na zona radicular das plantas. Esta técnica protege as linhas da luz solar e dos possíveis danos causados pelo manejo de maquinário agrícola além de ter comprovada economia de água pois menor quantidade de água é perdida por evaporação e percolação profunda. Porém, não permite a possibilidade se verificar com facilidade o funcionamento dos emissores ou o movimento de água na tubulação, possui uma instalação mais onerosa e dificulta reparos e manutenção.

O princípio de funcionamento da IGS se baseia no fato de que as forças capilares são mais fortes

quanto menos saturado estiver o solo e que em alguns momentos elas são maiores que a força gravitacional. Assim, quando a água é aplicada em pequenos volumes e com grande frequência evita-se que muita água seja percolada. A Fig. 2.5 evidencia o formato do bulbo molhado devido a este princípio.



Fig. 2.5: Vista de uma lateral sub-superficial, evidenciando o formato do bulbo molhado.

2.4.3 Irrigação por borbulhamento

Como um sistema de irrigação localizada, a irrigação por borbulhamento fornece pequenas vazões de água às plantas. Seu nome deriva do borbulhamento da água provocado pela liberação do ar na tubulação pois funciona com a aplicação de água e ar em baixas pressões por pequenos orifícios, como nos emissores usados em gotejamento, embora no caso da irrigação por borbulhamento as vazões nos borbulhadores são maiores. Esta técnica baixa sensibilidade ao entupimento dos emissores, embora não seja tão eficiente quanto as técnicas citadas anteriormente. A Fig. 2.6 mostra a irrigação por borbulhamento em operação em um campo gramado.



Fig. 2.6: Irrigação por borbulhamento em um campo gramado.

2.4.4 Irrigação por micro-aspersão

Esta técnica se destaca dos outros sistemas por exigir mínima filtração e normalmente possuir menor requerimento de manutenção. Ela também permite visualizar com facilidade a distribuição d'água na superfície do solo e oferece menores riscos de entupimento, pois o diâmetro dos emissores

é maior do que dos gotejadores. Neste tipo de irrigação localizada a aplicação de água é feita por aspersão que ocorre na forma de jatos de gotas pequenas ou por névoa ou neblina.

Para aspergir a água são usados emissores denominados micro-aspersores e estes podem ser classificados como rotativos ou estacionário, este último também conhecido como aspersor do tipo *spray*, podendo a água ser aplicada sobre ou abaixo da folhagem dependendo da cultura e características do projeto. As figuras 2.7 e 2.8 demonstram o funcionamento destes emissores.



Fig. 2.7: Micro-aspersor rotativo.



Fig. 2.8: Micro-aspersor estacionário.

Os micro-aspersores estacionários não possuem movimento de rotação e são interessantes por permitir projetos para áreas irregulares. Já os micro-aspersores rotativos variam tanto em função da precipitação, dimensão das gotas, número de bocais e padrão de distribuição de água como também com a pressão de serviço e vazão. Normalmente o movimento dos micro-aspersores é produzido por mecanismos de reação ao impacto da água e em alguns casos também pode possuir engrenagens.

A Tab. 2.2 mostra a variação de vazões, pressão de serviço e intensidade de aplicação de água por ambos os tipos de micro-aspersores.

Tab. 2.2: Variação da pressão, vazão e intensidade de precipitação para os tipos de micro-aspersores.

| | Micro-aspersores rotativos | Micro-aspersores estacionários |
|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Pressão de serviço (kgf/cm^2) | 1-4 | 1-2,5 |
| Vazão (l/h) | 20-100 | 50-70 |
| Precipitação de água (mm/h) | 2-30 | 12-100 |

2.5 Irrigação Inteligente

Visando um melhor gerenciamento dos recursos hídricos, os sistemas agrícolas irrigados vem se apresentando como grande beneficiado da aplicação da tecnologia da informação com foco em automação.

O principal interesse deste gerenciamento é a correta programação da irrigação, buscando o fornecimento de uma quantidade ideal de água às plantas para prevenir o estresse hídrico e, ao mesmo tempo, evitar o desperdício. Desta forma tem como resultados: o aumento da produção, a melhora na qualidade do produto e a diminuição de gastos e do impacto ao meio ambiente.

Para que este trabalho se torne possível, é necessário fazer uso de sensores para medições dos atributos ligados ao solo, planta e atmosfera. Uma grande quantidade de parâmetros como o tipo de

cultura, estágio do crescimento, condições climáticas do ambiente e disponibilidade de água no solo são levados em consideração no cálculo da exata quantidade de água requerida em cada aplicação. Como estes parâmetros variam espacial e temporalmente, as ações a serem tomadas só serão ótimas quando levarem em conta os parâmetros daquele ponto naquele momento, ou seja, essas informações devem ser adquiridas e processadas em tempo real para cada ponto amostral existente.

Realizar esta tarefa de forma manual em uma área consideravelmente vasta, se não for impossível, levaria muito tempo e consumiria muito recurso humano, o que a torna inviável. A viabilização deste trabalho é, então, garantida através do uso de técnicas de microprocessamento, dispositivos eletrônicos, sensores e atuadores [11].

O capítulo 3 apresenta maiores informações sobre a automação da irrigação.

Capítulo 3

Automação da Irrigação

3.1 Introdução

Existem hoje diversos aparelhos que realizam o monitoramento da umidade, constante elétrica e temperatura no solo. Porém, a maioria se restringe a trabalhos de pesquisas, por possuir custo elevado e requerer conhecimento e treinamento para sua utilização no campo. No entanto, os pesquisadores vêm buscando cada vez mais por técnicas e equipamentos mais simples e eficazes, capazes de tornar o sistema de irrigação mais eficiente. A expectativa é que com o tempo estas técnicas e equipamentos se popularizem, ganhem escala e passem a auxiliar não só os pesquisadores mas também os produtores rurais.

No caso de investigações relacionadas à variação espacial e temporal, as medições automáticas requerem registros georreferenciados de atributos solo.

Estes sistemas dependem de sensores, sendo que o tipo de sensor mais importante empregado na irrigação inteligente é o sensor de umidade do solo.

3.2 Sensores de umidade do solo

Existem diversos métodos para medir a umidade do solo, que podem ser realizados direta ou indiretamente.

Inicialmente veremos o método gravimétrico, que é um método de medida direta. Posteriormente apresentaremos algumas formas de medidas por métodos indiretos. Os métodos indiretos são considerados mais adequados para determinação instantânea da umidade relativa do solo.

3.2.1 Método gravimétrico

O método gravimétrico consiste em recolher uma amostra do solo e comparar seu peso ou volume no instante da colheita e secagem total em uma estufa. Desta forma é possível determinar sua umidade gravimétrica (u) relacionando a massa de água com a massa de sólidos da amostra ou a umidade volumétrica (θ) relacionando o volume de água contido na amostra e o volume da amostra.

A necessidade de colheita de amostras e a demora de várias horas para se obter resultado (período necessário para garantir que a amostra esteja seca) dificultam o seu uso na prática.

3.2.2 Método capacitivo

Este método estima a quantidade de água no solo por meio da medida da constante dielétrica do solo que varia de acordo com a quantidade de água presente. Para realizar esta medida são usados dois eletrodos implantados no solo e através da injeção de um sinal de excitação de frequência conhecida é possível medir a impedância do circuito por ele formado [12].

Como a constante dielétrica não varia linearmente em função da quantidade de água no solo, este método requer linearização da resposta e calibração cautelosa, não só na instalação, como também durante seu tempo de uso, tendo em vista que a estabilidade de sua calibração a longo prazo é questionável em virtude da dinâmica do solo e do próprio deterioramento dos materiais empregados na fabricação dos sensores que sofrem oxidação com o tempo.

3.2.3 Método resistivo

O método resistivo usa um meio higroscópico como um polímero condutor, sal ou um substrato tratado para medir variações da impedância elétrica destes elementos, que varia de acordo com a quantidade de água neles presente.

Normalmente os sensores resistivos consistem em eletrodos metálicos entremeados ao meio higroscópico. Estes sensores não são puramente resistivos, pois os efeitos capacitivos modificam a variação da impedância.

A mudança incremental na impedância é tipicamente uma função exponencial inversa da umidade [13] [13] e assim como o método capacitivo, este método requer linearização da resposta e calibração. A Fig. 3.1 apresenta a variação típica da resistência de um sensor resistivo em função da umidade, a uma temperatura constante.

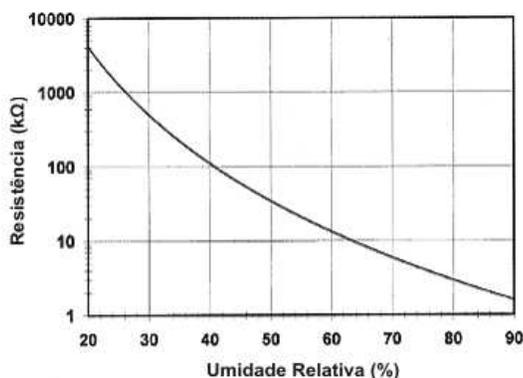


Fig. 3.1: Resposta de um sensor resistivo medida a 25°C.

A dificuldade de se usar esse método para medir a umidade do solo é que o solo sofre variações dinâmicas em sua resistência, pois tanto a correção de fatores químicos do solo quanto a irrigação modificam a concentração de sais e alteram os resultados das medidas de resistividade, aumentando as margens de erro e diminuindo a precisão com o passar do tempo. Assim como o método capacitivo, os sensores resistivos devem sofrer constantes calibrações ao longo de sua vida útil.

3.2.4 Reflectometria no domínio do tempo

A técnica de reflectometria no domínio do tempo, ou TDR, permite adquirir a medida da quantidade de água presente no solo em função da velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em hastes condutoras envoltas pelo solo monitorado. Esta técnica determina a constante dielétrica (Ka) ao medir o tempo de propagação da onda eletromagnética através de um cabo coaxial até a extremidade da haste (sonda), onde parte da onda é refletida de volta ao emissor, pela equação:

$$t = \frac{2LK a^{0,5}}{c} \quad (3.1)$$

na qual:

L = o comprimento do sensor [m];

Ka = constante dielétrica do meio;

c = velocidade da luz no vácuo $299.792.458 [ms^{-1}]$;

t = tempo [s] de propagação entre o início e o final do sensor.

Rearranjando a Eq. 3.1, temos:

$$Ka = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (3.2)$$

O termo $ct/2$ da Eq. 3.2 é conhecido como comprimento aparente da sonda e é representado por La . Assim, ao medir La obtemos Ka e conhecendo Ka temos como estimar a umidade volumétrica do solo comparando com uma tabela obtida a partir de dados de campo ou de laboratório.

A dificuldade de se utilizar essa técnica é que ela, além de cara, pelo equipamento empregado, é dependente do tipo de solo (mineral ou orgânico), de materiais magnéticos e requer calibração trabalhosa [14].

3.2.5 Método de condutividade térmica

Também conhecido como método de dissipação de calor, este método consistem em utilizar um elemento aquecedor capaz de irradiar uma quantidade de energia térmica específica ao solo enquanto um segundo elemento sensível a variação de temperatura faz a leitura da temperatura no exato instante anterior a irradiação térmica e após um período pré-definido. Desta forma, o sensor de temperatura irá acusar uma variação da temperatura em função da quantidade de água presente no solo para uma quantidade fixa de energia irradiada.

A grande vantagem deste método é que seu funcionamento não sofre interferência da condutividade elétrica e trabalhos que utilizam a variação da temperatura para determinar o valor da umidade do solo apresentam bons resultados [15], [16] e [17].

3.3 Comunicação entre sensores e atuadores

Em um sistema de irrigação automatizado as informações colhidas pelos sensores devem chegar até uma unidade de processamento para que esta possa interpretar os dados obtidos e em seguida

enviar os comandos de atuação para os aspersores de acordo com sua programação em função dos dados recebidos.

Há duas formas de se realizar esta tarefa. Uma delas, talvez a mais simples, é utilizar fios metálicos para interligar os equipamentos. Desta forma, a fiação metálica pode transmitir as informações e também manter alimentados energeticamente os equipamentos. A figura 3.2 ilustra o uso de fios na comunicação entre os elementos responsáveis pela irrigação automatizada.

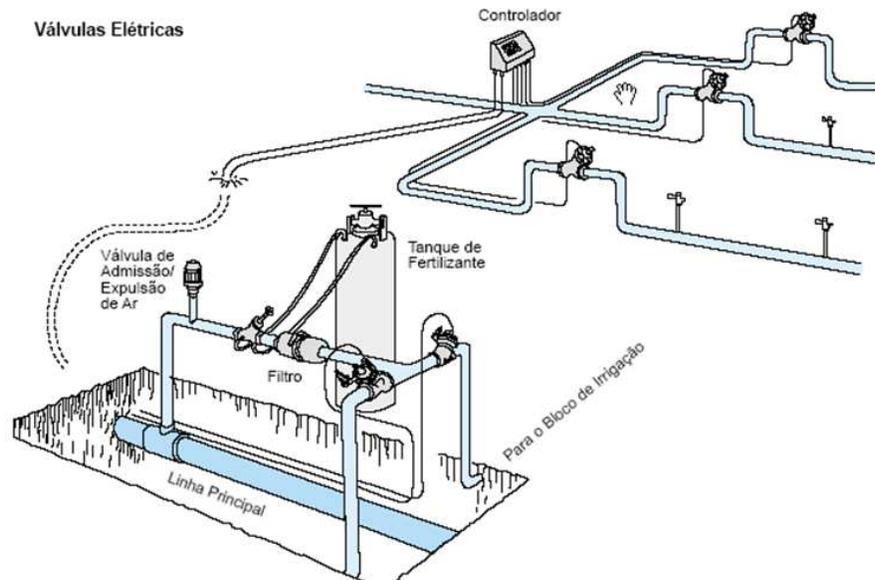


Fig. 3.2: Irrigação localizada com central de controle conectada por fios

Outra forma é a utilização de ondas eletromagnéticas (RF) para transmitir as informações. Embora esta técnica evite os problemas da utilização de cabos metálicos, ela não possui eficiência para manter os equipamentos energizados, o que leva os pesquisadores e desenvolvedores a procurarem alternativas como o uso de baterias e células fotovoltaicas.

Independente do método empregado, a comunicação entre os sensores, unidades de processamento e atuadores caracterizam uma rede de sensores e pelo fato das redes sem fio apresentarem forte vantagem frente as redes cabeadas como mobilidade e versatilidade, além das já citadas acima, estas encontram-se no foco de nosso estudo.

3.3.1 Rede sem fio

As redes sem fio são sistemas que permitem a comunicação de forma ordenada entre duas ou mais entidades computacionais sem a necessidade do uso de cabos. Esta comunicação é normalmente feita por equipamentos que usam ondas de rádio, mas também pode se realizar por meio de infravermelho ou laser não guiado.

As redes sem fio tem utilização nas mais diversas áreas e se mostra eficaz em situações onde deseja-se ter mobilidade e necessita-se de acesso imediato a informações. As tabelas 3.1 e 3.2 [18] apresentam características de várias tecnologias sem fio e suas aplicações.

Tab. 3.1: Tecnologias sem fio e características associadas.

| Tecnologia | Serviços e Características | Área de Cobertura | Limitações | Exemplos de Sistemas |
|---------------------|--|--------------------------|------------------------------|--|
| Celular | Voz e dados através de telefones portáteis | Contínua | Largura de banda muito baixa | Telefones celulares, PAD's e Palm Pilots |
| WLAN | LAN tradicional com interface sem fio | Somente ambientes locais | Alcance limitado | NCRs Wave LAN e ALTAIR |
| GPS | Determina posição tridimensional | Qualquer lugar do mundo | Custo elevado | GNSS, NAVSTAR e GLONASS |
| PCS por satélite | Principalmente para mensagens | Quase todo o mundo | Custo elevado | Iridium e Teledesic |
| Redes <i>Ad hoc</i> | Grupo de pessoas que compartilham dados | Similar a LAN | Alcance limitado | Bluetooth e Zigbee |
| Redes de sensores | Sensores pequenos sem fio | Pequena | Alcance limitado | Automação e aplicações de defesa civil e militar |

3.3.2 Rede de sensores

Uma definição encontrada na literatura para rede de sensores é a de uma rede sem fio formada por um grande número de sensores pequenos e imóveis plantados numa base *ad hoc* para detectar e transmitir alguma característica física do ambiente. A informação contida nos sensores é agregada numa base central de dados [18].

Uma rede *ad hoc* é entendida como uma rede local sem fio onde os dispositivos são parte da rede somente quando eles estão suficientemente próximos para que seja possível realizar transmissões. Desta forma não há infra-estrutura fixa e a informação é passada ponto a ponto usando múltiplas rotas.

Sob o enfoque de sistemas distribuídos, uma rede de sensores pode ser definida como uma classe particular de sistemas distribuídos, onde as comunicações de baixo nível não dependem da localização topológica da rede [19].

Desta forma, possui características particulares, como a utilização de recursos restritos de energia, topologia de rede dinâmica e uma grande quantidade de nós.

Dessas características, a quantidade de nós em uma rede de sensores é possivelmente a mais problemática. Aumentar o número de sensores resulta num maior número de informações trafegando na rede. Se o aumento dessa carga excede a capacidade da rede, em termos de acesso ao meio sem fio compartilhado, gera congestionamento. Um aumento do número de nós ativos pode afetar o desempenho e conseqüentemente o funcionamento da rede. O trabalho [8] mostra como a quantidade

Tab. 3.2: Aplicações potenciais de diferentes serviços.

| Tecnologias sem fio | Área de Aplicação |
|-----------------------------------|---|
| Celular | Serviços no campo, segurança pública, controle de estoque, transportadoras e atividades de linhas aéreas. |
| WLAN | Lojas varejistas, serviços de saúde, tele-diagnósticos, estudantes, restaurantes, escritórios, indústria manufatureira e estoque. |
| GPS | Pesquisa, agência de aluguel de carros e esportes. |
| PCS | Multimídia e Telemetria |
| Redes <i>Ad hoc</i> e de Sensores | Sensores de ambiente, máquinas de prognóstico, detecção de pontes quebradas, condições das estradas e sensores biológicos |

de nós influencia no desempenho da rede sem fio.

Para tratar desta questão os protocolos de rede encontram-se em constante evolução. Um dos padrões de rede sem fio que vem ganhando força na área de rede de sensores é o IEEE 802.15.4. Este define padrões de camada física e de controle de acesso ao meio e forma a base na qual se apóiam os protocolos comerciais ZigBee e 6LoWPAN. O IEEE 802.15.4 tem foco em baixo custo, baixas taxas de comunicações e baixo consumo de energia e visa cobrir um alcance de dez metros a uma velocidade de 250kbit/s, modulando em espalhamento espectral (DSSS ou CSS) e atuando em uma das três possíveis faixas de frequência não licenciada:

- 868.0-868.6 MHz: usado na Europa, permite um canal de comunicação.
- 902-928 MHz: usado na América do Norte, permite até trinta canais de comunicação.
- 2400-2483.5 MHz: usado em todo o mundo, num total de dezesseis canais comunicação.

No Brasil este padrão opera na faixa de 2400-2483.5 MHz, conhecida popularmente como faixa de 2.4 GHz.

3.3.3 Protocolos Proprietários

De acordo com o tipo de sensoriamento ao qual estão empregadas, as redes de sensores podem possuir necessidades distintas no que se refere a mobilidade, velocidade de comunicação, alcance, dinâmica de comunicação, roteamento, entre outras.

Em condições onde os sensores permanecem imóveis, algumas das funcionalidades como criptografia pesada, roteamento em múltiplas rotas, sincronização de tempo e auto-organização que compõem protocolos mais complexos podem não ser estritamente necessária para o funcionamento do sistema.

Nestes casos é possível optar pelo uso de protocolos mais enxutos, que solicitam o uso de *hardware* mais simples, com menor poder de processamento e menos memória, permitindo diminuir consideravelmente o custo dos sensores.

É neste ponto que se encaixam os protocolos de rede proprietários como SynkroRF, MiWi e Simpliciti que se baseiam no padrão IEEE 802.15.4, mas por não incorporarem muitas funcionalidades são considerados leves. A tabela 3.3 mostra uma comparação entre eles.

Tab. 3.3: Comparação entre os principais protocolos de rede proprietários.

| | SynkroRF | MiWi | SimpliciTI |
|-------------------------|------------------------------|--------------------------------------|---|
| Fabricante | Freescall | Microship | Texas Instruments |
| Tamanho da <i>stack</i> | ≈ 32 KB | 7K-17K | < 8K |
| Topologia | Ponto-a-ponto | Ponto-a-ponto, Estrela e <i>Mesh</i> | Ponto-a-ponto e Estrela |
| Taxa de dados | 250 kbit/s | 250 kbit/s | 250 kbit/s |
| Faixas de frequência | 2.4 GHz | 868 MHz, 915 MHz e 2.4 GHz | 300MHz, 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz e 2.4 GHz |
| Custo | Sem custo - Protocolo aberto | Sem custo - Protocolo aberto | Sem custo - Protocolo aberto |

3.4 Módulos Independentes

Seguindo o mesmo foco do padrão IEEE 802.15.4 (baixo custo e baixo consumo de energia), propõem-se neste trabalho uma técnica diferente de se manter um sistema de irrigação localizada operacional de forma otimizada.

Esta proposta leva em conta o uso de módulos independentes, com capacidade de realizar tarefas autônomas sem a necessidade da constante comunicação entre eles.

Desta forma deseja-se manter o consumo de energia a um nível mínimo, evitando troca de informações que não sejam essenciais para o funcionamento do sistema e mantendo os módulos em modo de baixo consumo na maior parte do tempo quando eles não estão em operação.

Chamamos esta técnica de Módulos Independentes e a proposta encontra-se descrita em detalhes no capítulo 4.

Capítulo 4

Irrigação Localizada Automatizada por Módulos Independentes

4.1 Proposta do Sistema

Conforme descrito na seção 1.1 do capítulo 1, o foco deste trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema de irrigação localizada automatizado, referenciado geograficamente e auxiliado por sensores de umidade do solo.

A proposta aqui apresentada segue a máxima de Albert Einstein de que *"tudo deve ser feito da forma mais simples possível, mas não mais simples que isso"* e visa apresentar uma ideia funcional minimamente complexa de forma que este sistema evite custos desnecessários e seja passível de aplicação na prática. Desta forma, evitou-se integrar neste sistema técnicas complexas como redes do tipo *mesh* sem abrir mão da facilidade da comunicação sem fio, diferenciando-se dos sistemas de irrigação apresentados em trabalhos como em [5] e [6].

Este trabalho foi proposto em resposta à necessidade de aplicação de um sensor de umidade do solo que até a data da apresentação desta dissertação encontrava-se em desenvolvimento no Departamento de Eletrônica e Microeletrônica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp.

O sensor em desenvolvimento consiste na evolução do trabalho [20] e constitui em um circuito integrado sensor de umidade do solo de medida indireta pelo método de condutividade térmica possuindo resposta analógica em tensão em função da umidade medida.

Em paralelo ao trabalho acima citado, outro encontrava-se em desenvolvimento no mesmo ambiente e também faz parte do sistema aqui apresentado. Este consiste em um microgerador de energia elétrica capaz de gerar energia a partir do fluxo de água entregue aos micro-aspersores.

Neste trabalho não se entrará em detalhes com relação ao funcionamento deste gerador pois até a data de apresentação desta dissertação o processo de patente ainda não havia sido concluído. Limita-se este trabalho apenas a informar que o microgerador, em virtude de seu tamanho reduzido e do fluxo de água ao qual é submetido, tem capacidade restrita e esta característica define que o sistema proposto possua baixo nível de consumo de energia.

Propõe-se então um sistema dividido em módulos com funções distintas, que possibilitem a correção da umidade do solo de forma independente, respeitando a variabilidade espacial das características hidro-físicas do solo e da necessidade hídrica individual de cada planta.

Um destes módulos deve possuir a capacidade de ligar uma moto-bomba nos exatos horários previamente programados e desligar a mesma após um período máximo de atuação estabelecido. Para que haja ainda uma maior economia de água, este módulo deve ser ligado a uma moto-bomba com capacidade de se auto desligar quando identificar que não há mais necessidade de atuação dos módulos na irrigação além de regular sua potência para manter uma pressão constante independente da quantidade de módulos atuantes naquele momento.

Outro módulo deve ser capaz de interpretar a leitura do sensor de umidade do solo e através do processamento desta informação, junto a uma pré-programação, atuar na liberação da água aos micro-aspersores corrigindo a umidade do solo de forma automatizada e independente.

Um terceiro módulo deverá ser móvel e será responsável por fazer a programação dos módulos citados anteriormente de acordo com informações inseridas em uma base de dados por um profissional qualificado. Porém, uma vez programados, os módulos de irrigação e de controle da moto-bomba não necessitarão de comunicação durante seu funcionamento e este terceiro módulo não precisará entrar em funcionamento até que se deseje nova programação.

Para facilitar seu uso na prática, estes módulos devem ser passíveis de programação e reprogramação sem que haja a necessidade de conexão de qualquer tipo de fio ou cabo.

4.2 Desenvolvimento do Sistema

De acordo com a especificação apresentada da seção anterior, o sistema consiste em basicamente três componentes: Módulo Acionador para Bombas d'Água denominado MABA, Módulo de Irrigação Localizada Inteligente denominado MILI e Módulo Programador denominado MP. A Fig. 4.1 mostra os módulos criados para testar validar a proposta.

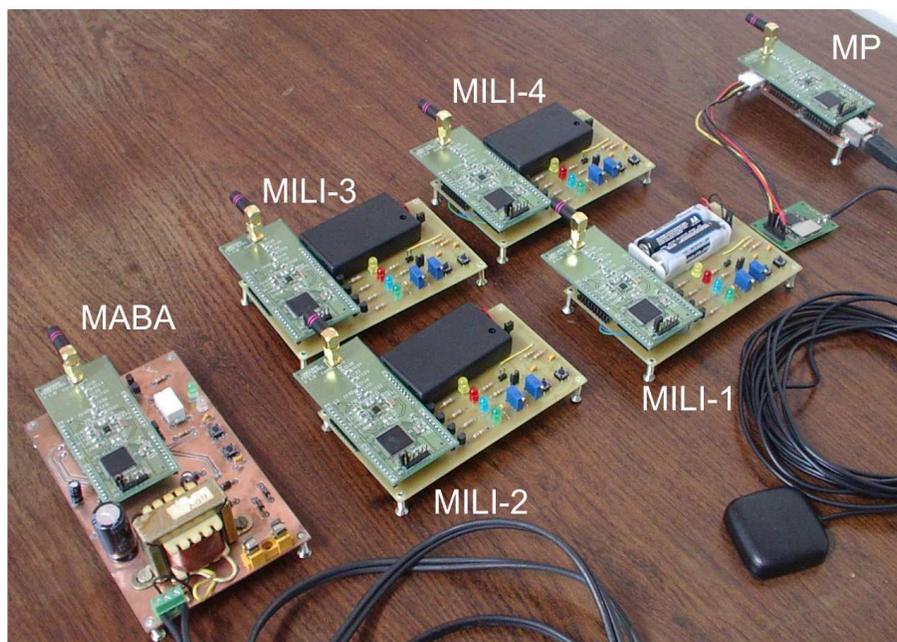


Fig. 4.1: Sistema formado pelos módulos MABA, MILIs e MP.

4.2.1 Descrição dos módulos do Sistema

Módulo Acionador para Bombas d'Água - MABA

O MABA consiste em uma chave liga-desliga temporizada que atua sobre uma moto-bomba. Este módulo informa à bomba quando ela deve ser ligada e desligada, de acordo com um relógio de tempo real e com um mapa de memória previamente programado.

A programação do MABA é feita de forma sem fio e como já mencionado, para que o sistema funcione corretamente, a moto-bomba a qual o MABA se conecta deve possuir um mecanismo que atue sobre a potência exercida pela bomba, mantendo a pressão de saída constante, além de desligá-la caso a pressão chegue a tal ponto que indique que não há mais atuadores em operação naquele momento.

Módulo de Irrigação Localizada Inteligente - MILI

O MILI é composto por um circuito eletrônico microcontrolado de baixo consumo com funcionalidade de comunicação sem fio de curto alcance, ligado a um sensor de umidade do solo, como por exemplo os sensores de dissipação de calor apresentados nas referências [21], [20] e uma válvula solenoide do tipo *latch*.

Este módulo é responsável por controlar uma válvula que atua na liberação e restrição da água enviada a um micro-aspersor. Cada MILI atua de forma independente dos demais, sendo que a atuação é executada ao comparar o valor da medida do sensor de umidade do solo com um mapa de memória previamente programado.

Módulo Programador - MP

O MP é basicamente um módulo de comunicação sem fio composto por um circuito eletrônico microcontrolado ligado a um computador portátil via interface USB e integra funções de banco de dados e de referenciamento geográfico por intermédio de um receptor GPS.

Este módulo é responsável por programar os demais módulos enviando as informações de data, hora e programação da quantidade de água a ser aspergida em função da umidade medida e dos horários de atuação. Junto com estas informações o MP também envia as coordenadas de latitude, longitude e altitude para os demais módulos e guarda uma cópia destas informações no PC para que seja possível criar um mapa com a posição de cada módulo no campo, garantindo ao usuário saber onde se encontram os módulos para fácil acesso quando os mesmos necessitarem de nova programação.

Todas estas funções são executadas através de um aplicativo que atua no PC.

Programa Sissenagri

O Sissenagri é um aplicativo escrito em LabVIEW que permite que o responsável pelo sistema de irrigação automatizada faça todo o serviço de configuração e gerenciamento do sistema através de sua interface gráfica.

O aplicativo é dividido em sete telas separadas em abas para melhor organizar as funções, sendo que a primeira delas é uma tela de abertura como mostra a Fig. 4.2.

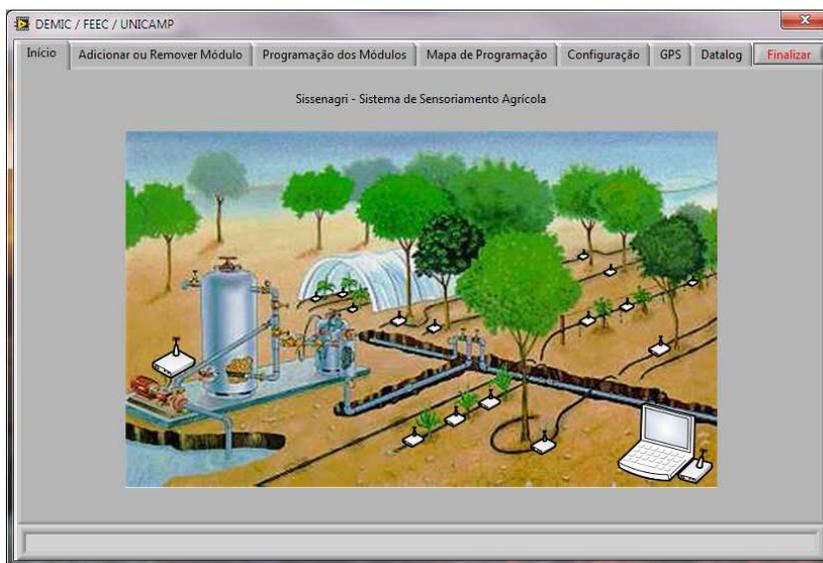


Fig. 4.2: Tela 1 - Abertura do programa.

A segunda tela é possivelmente a parte mais importante do programa. Como apresentado na Fig. 4.3, esta contém as funções de PROGRAMAR MÓDULO, ATUALIZAR MAPA DE PROGRAMAÇÃO e REMOVER MÓDULO e permite que o usuário entre com os dados de configuração de cada módulo atuador.

Inicialmente o usuário deve inserir o ID do módulo a ser programado e escolher que tipo de módulo este ID se refere (MILI ou MABA).

No caso do MABA o usuário então define quantas vezes por dia o módulo atuará sobre a moto-bomba e em quais horários este evento deve ocorrer, sendo que as opções da quantidade de atuação diária varia entre um a quatro. Em seguida o usuário deve entrar com a área à qual o módulo faz parte e a dimensão da lâmina de irrigação, em minutos. Este é o período pelo qual a bomba ficará ligada a cada atuação.

Caso o usuário deseje programar um MILI, assim como na programação do MABA, ele também deve inicialmente entrar com o ID do módulo a ser programado e escolher quantas vezes o módulo deve atuar por dia e em quais horários.

É importante frisar neste ponto que o MILI deverá obrigatoriamente atuar nos mesmos horários que o MABA e em um número de vezes igual ou menor. Caso contrário, o MILI poderá abrir a válvula solenoide em um momento que não há pressão d'água na tubulação e assim, mesmo que ocorra a liberação de um pouco de água, a irrigação não será eficiente.

Na sequência da configuração do MILI, o usuário deve então selecionar quantas respostas em função das medidas o atuador pode dar. As opções são: uma, duas, quatro ou oito, devendo ser selecionadas de acordo com o conhecimento ou necessidade de experimentação do operador do sistema em função da cultura irrigada. O próximo passo consiste em preencher os pontos de comparação, que no aplicativo são chamados de medidas, e suas respostas referentes a porcentagem da lâmina de irrigação especificada, levando em consideração o estágio de desenvolvimento da planta e as características físicas do solo. A primeira medida deve ser o ponto mais baixo de comparação desejado e qualquer valor entre zero e o especificado pela medida 1 fará com que o MILI libere a quantidade de

água programado em resposta a medida 1. Se a leitura ficar entre as medidas 2 e 3, a quantidade de água liberada será em resposta a medida 3. Caso a leitura fique acima da última medida especificada, o MILI não irá liberar água naquele momento.

A cada atuação o MILI processará a informação do sensor de umidade do solo e responderá a esta medida apenas uma vez. Como ilustração, a Fig. 4.3 apresenta a programação de um MILI para uma cultura qualquer em um solo fictício. Neste exemplo, quando forem quatro horas da manhã, o MILI fará a medida de umidade do solo e então liberará água por 39 minutos caso o sensor informe que a umidade do solo naquele momento está superior a 20% e inferior ou igual a 24%. Novas medidas serão realizadas às dez, dezesseis e vinte e duas horas e o módulo atuará de acordo com a resposta do sensor.

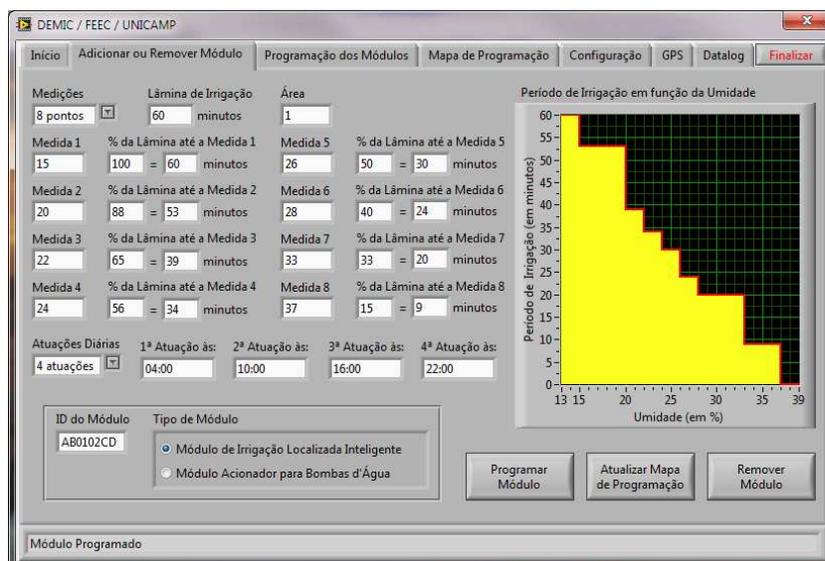


Fig. 4.3: Tela 2 - Adicionar ou Remover Módulo.

Para programar um módulo pela primeira vez deve-se antes de tudo instalar o módulo no local desejado e posicionar a antena do MP o mais próximo possível ao módulo a ser programado. Se possível, a antena deverá ser posicionada sobre o módulo a ser programado. Desta forma as informações de referenciamento geográfico são adquiridas com melhor precisão e estas serão guardadas em um banco de dados e será útil quando a reprogramação do módulo for necessária. Assim que o módulo estiver instalado e a antena do MP estiver devidamente posicionada o usuário então poderá pressionar o botão PROGRAMAR MÓDULO. Esta função fará a programação efetiva do módulo e este iniciará sua operação em seguida.

Quando um módulo não é mais necessário no sistema, o usuário pode retirá-lo do banco de dados do aplicativo inserindo o ID do módulo na tela 2 e posteriormente acionando o botão REMOVER MÓDULO. A desinstalação do módulo no campo sem informar o banco de dados que o módulo não mais existe não onera o funcionamento do sistema a priori, mas pode causar erro no processo de reprogramação dos módulos quando o MP não encontrar o módulo desinstalado.

Caso haja necessidade de reprogramar os módulos, o aplicativo permite esta tarefa de duas formas. A primeira é agir da mesma forma como se fosse efetuar a programação do módulo pela primeira vez (levar o MP próximo ao módulo a ser programado, manter a antena do GPS acima do módulo, inserir

as informações na tela 2 e acionar o botão PROGRAMAR MÓDULO). A segunda forma se assemelha muito à primeira, porém o usuário pode inicialmente entrar com os dados e salvar a nova configuração sem que precise estar próximo do módulo e ser reprogramado. Uma vez que mais de um módulo exija reprogramação, é interessante gravar todas as informações no banco de dados do programa e ir a campo somente para atualizar as informações nos módulos efetivamente. Para isto o usuário deve fazer uso da função ATUALIZAR MAPA DE PROGRAMAÇÃO, após inserir as informações retificadas, salvando-as no banco de dados.

Para a reprogramação efetiva dos módulos, o usuário, após ter salvo todas as informações retificadas, pode fazer uso das funções presentes na tela 3 conforme apresentado na Fig. 4.4.

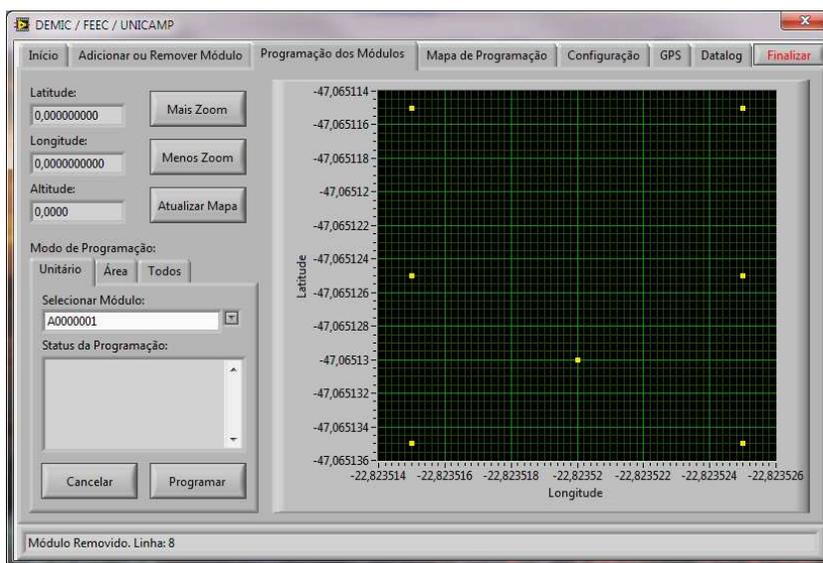


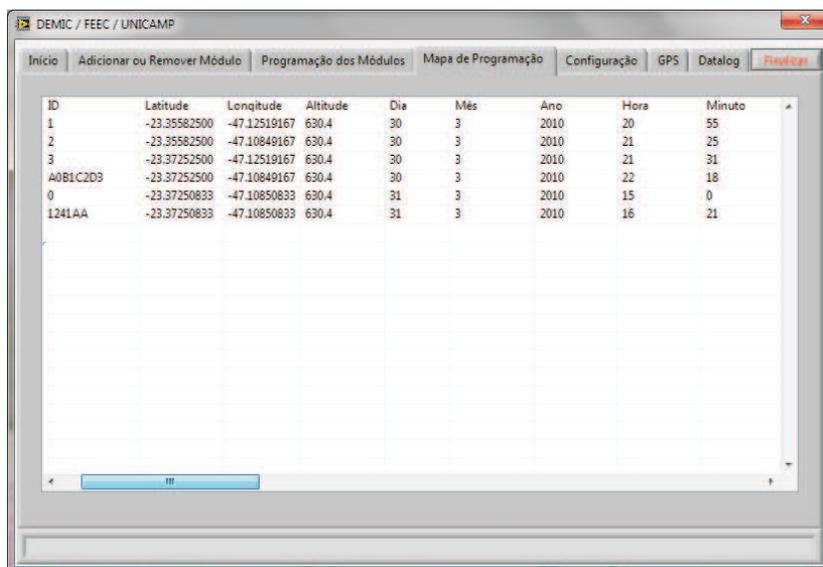
Fig. 4.4: Tela 3 - Programação dos Módulos.

Esta tela mostra um mapa com a localização dos módulos instalados e também a posição do MP. Este mapa é dinâmico e se movimenta em função do MP, que permanece no centro do mapa. No lado superior esquerdo da tela encontram-se as coordenadas geográficas do MP e botões com funções de *zoom* e de atualização do mapa na tela, que volta o mapa a sua posição inicial.

Na parte inferior esquerda encontram-se as funções de reprogramação. Com estas funções é possível programar um único módulo, todos os módulos pertencentes a uma área em comum ou todos os módulos. Sendo assim, basta selecionar a opção desejada, pressionar o botão PROGRAMAR e se movimentar próximo aos módulos localizando-se com auxílio do mapa. Uma janela informa o andamento da programação. A qualquer momento é possível cancelar o processo de reprogramação apertando o botão CANCELAR.

A Fig. 4.5 apresenta a quarta tela. Nesta é possível visualizar as configurações de todos os módulos.

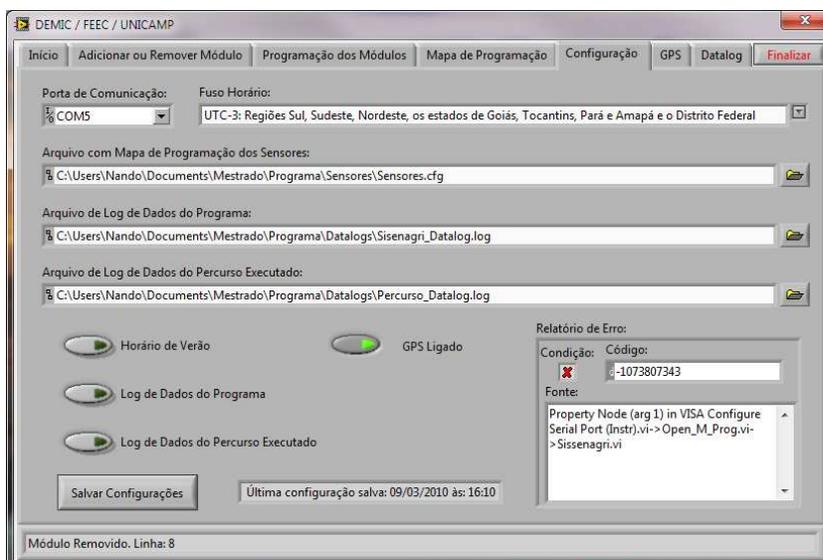
O aplicativo também conta com um menu de configurações próprio, onde o usuário pode selecionar em que porta de comunicações se encontra ligado o GPS, qual o fuso horário da área de atuação do sistema, a localização dos arquivos que contém o mapa de programação dos sensores, o *log* de dados do programa, que mantém um relatório das funções executadas e o *log* de dados do percurso executado, que contém um relatório com os pontos geográficos do caminho percorrido pelo



| ID | Latitude | Longitude | Altitude | Dia | Mês | Ano | Hora | Minuto |
|----------|--------------|--------------|----------|-----|-----|------|------|--------|
| 1 | -23.35582500 | -47.12519167 | 630.4 | 30 | 3 | 2010 | 20 | 55 |
| 2 | -23.35582500 | -47.10849167 | 630.4 | 30 | 3 | 2010 | 21 | 25 |
| 3 | -23.37252500 | -47.12519167 | 630.4 | 30 | 3 | 2010 | 21 | 31 |
| A0B1C2D3 | -23.37252500 | -47.10849167 | 630.4 | 30 | 3 | 2010 | 22 | 18 |
| 0 | -23.37250833 | -47.10850833 | 630.4 | 31 | 3 | 2010 | 15 | 0 |
| 1241AA | -23.37250833 | -47.10850833 | 630.4 | 31 | 3 | 2010 | 16 | 21 |

Fig. 4.5: Tela 4 - Mapa de Programação.

MP. Este menu, mostrado pela Fig. 4.6, ainda permite lidar e desligar as funções de horário de verão, gravação do log de dados do programa, gravação do log de dados do percurso executado e do GPS.



Porta de Comunicação: COM5

Fuso Horário: UTC-3: Regiões Sul, Sudeste, Nordeste, os estados de Goiás, Tocantins, Pará e Amapá e o Distrito Federal

Arquivo com Mapa de Programação dos Sensores: C:\Users\Nando\Documents\Mestrado\Programa\Sensores\Sensores.cfg

Arquivo de Log de Dados do Programa: C:\Users\Nando\Documents\Mestrado\Programa\Datalogs\Sisenagri_Datalog.log

Arquivo de Log de Dados do Percurso Executado: C:\Users\Nando\Documents\Mestrado\Programa\Datalogs\Percurso_Datalog.log

Horário de Verão: GPS Ligado:

Log de Dados do Programa:

Log de Dados do Percurso Executado:

Relatório de Erro:

Condição: Código: -1073807343

Fonte: Property Node (arg 1) in VISA Configure Serial Port (Instr).vi->Open_M_Prog.vi->Sisenagri.vi

Salvar Configurações Última configuração salva: 09/03/2010 às: 16:10

Módulo Removido. Linha: 8

Fig. 4.6: Tela 5 - Menu de configurações do aplicativo.

Um botão com a função SALVAR CONFIGURAÇÕES permite que as configurações sejam gravadas na memória, após sofrerem modificações. Ao lado deste botão se encontra uma caixa de texto informando a data da última gravação destas informações.

A tela 6, apresentada na Fig. 4.7, mostra as informações provenientes do GPS.

Através desta tela é possível usar o MP como um GPS comum, em situações onde o conhecimento destas informações é desejado.

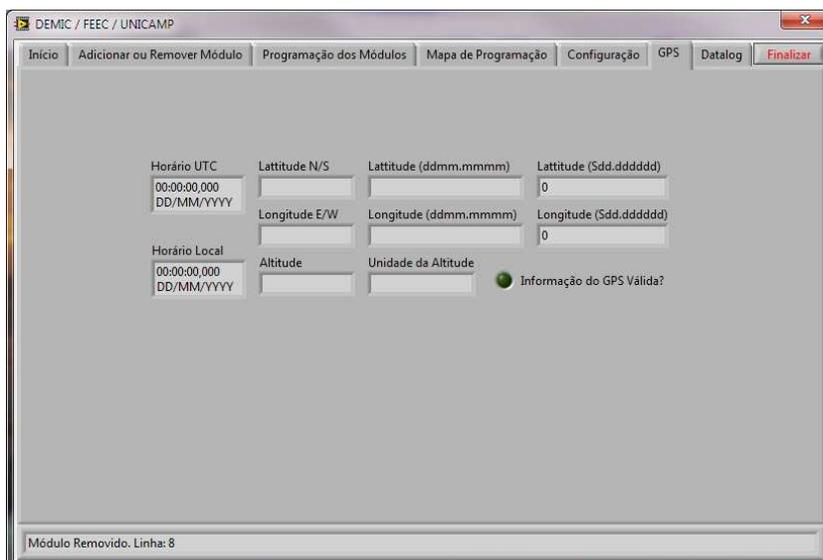


Fig. 4.7: Tela 6 - Informações do GPS.

A última tela, apresentada na Fig. 4.8, permite ao usuário acessar os arquivos de *log* do aplicativo e do percurso executado pelo MP. Estes arquivos podem ser abertos por outros editores de texto, pois são arquivos de texto simples e suas informações podem ser úteis caso haja necessidade de se conferir alguma ação ou informação.

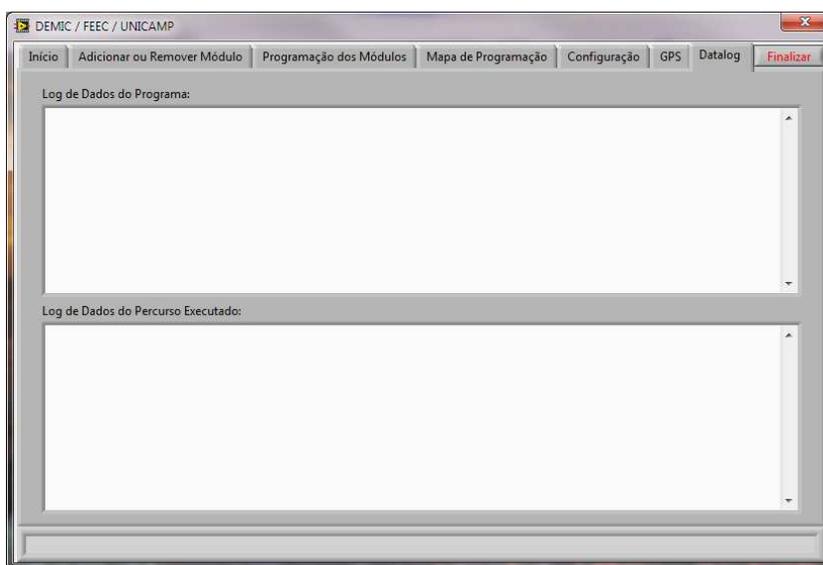


Fig. 4.8: Tela 7 - Logs.

A Fig. 4.9 apresenta o fluxograma de funcionamento do aplicativo Sissenagri e a Fig. 4.10 detalha o bloco "Executa funções quando acionadas" do fluxograma apresentado na Fig. 4.9.

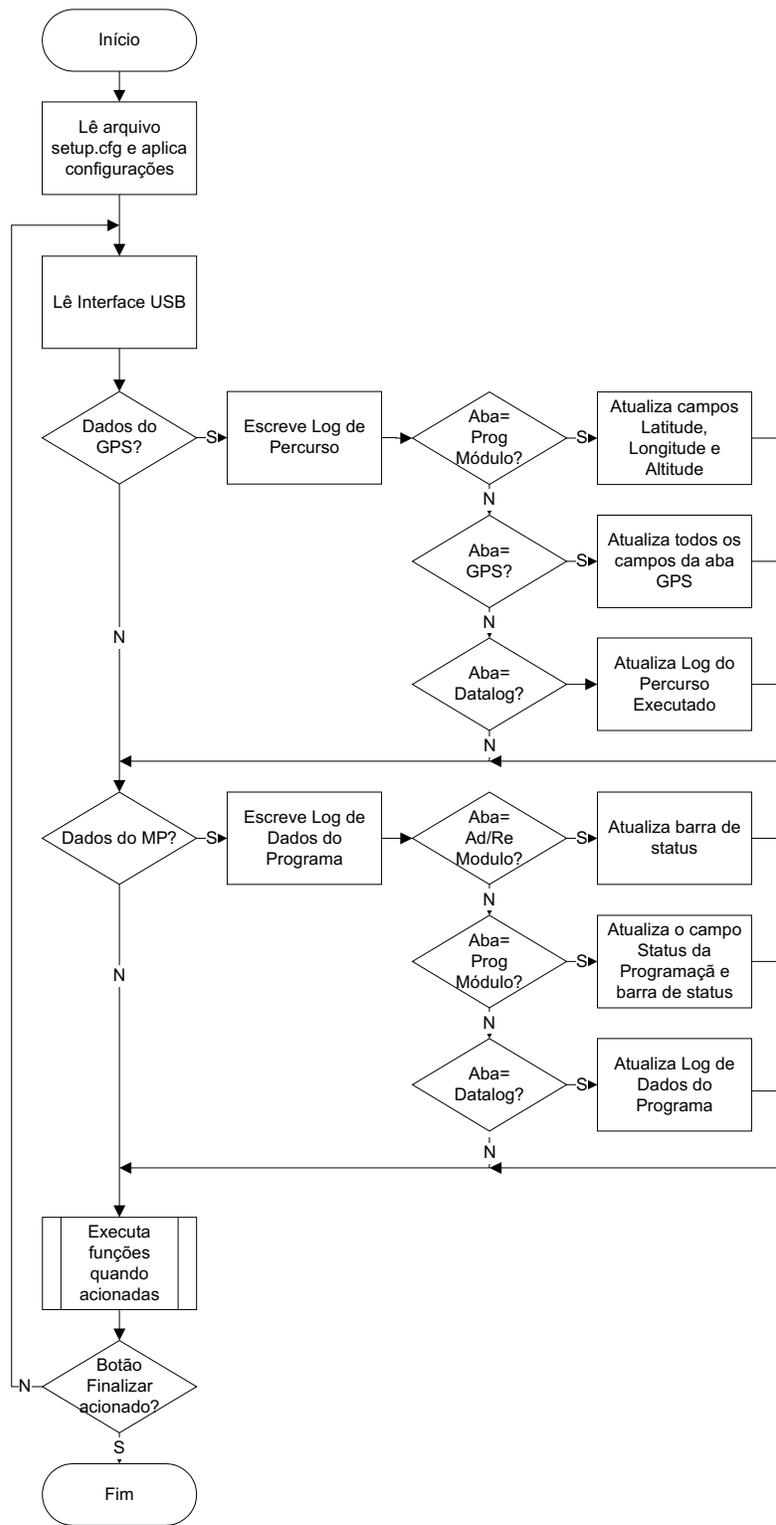


Fig. 4.9: Fluxograma do aplicativo Sissenagri.

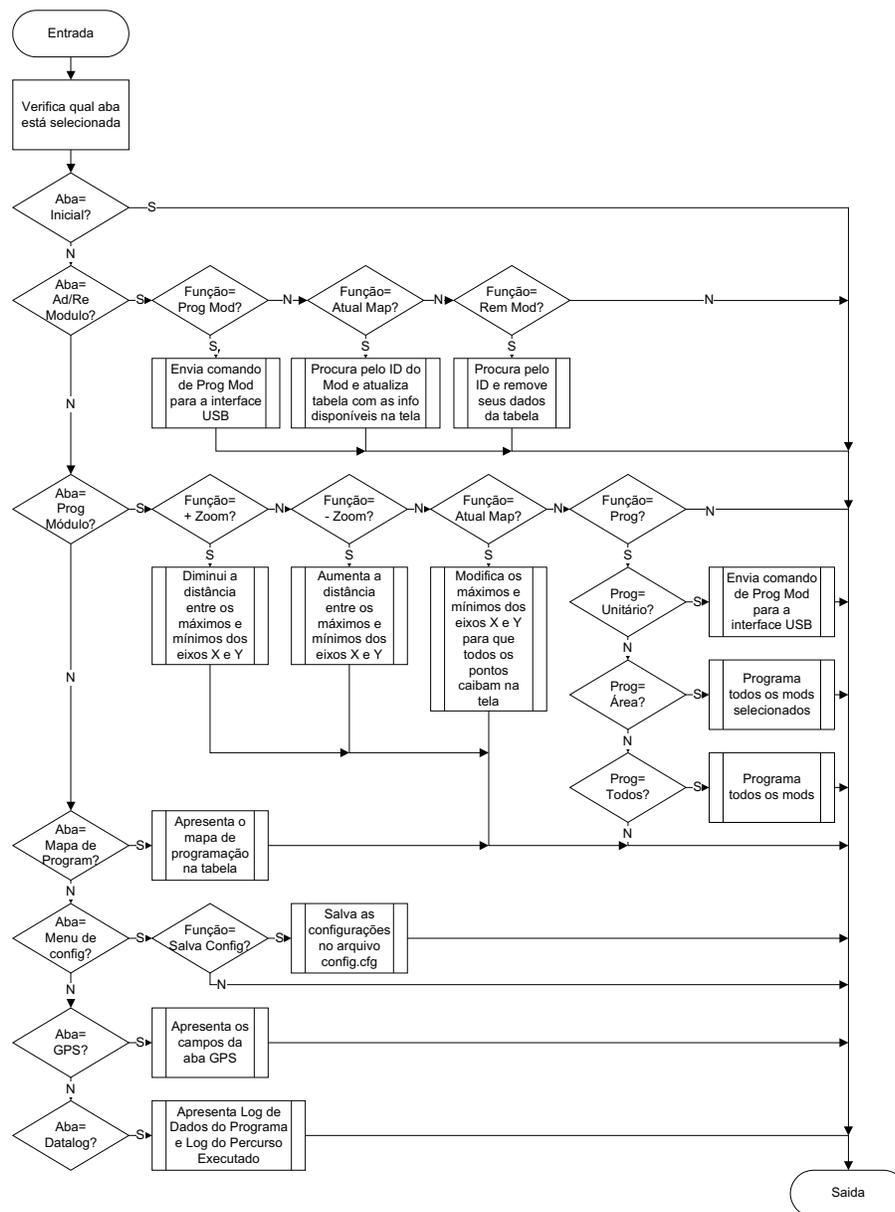


Fig. 4.10: Fluxograma do aplicativo Sissenagri.

4.2.2 Programação dos módulos

O Sissenagri se comunica com o MP através de seis comandos diferentes que chamamos de mensagens. Ao receber estas mensagens o MP as interpreta e reformata a informação nelas contidas para torná-las compatíveis com o protocolo de RF. De acordo com cada mensagem, o MP se comunica com os demais módulos enviando as informações formatadas e espera a resposta dos comandos. As respostas são então reformatadas e enviadas ao Sissenagri para que o usuário possa enxergar o andamento do processo de programação dos módulos.

A dinâmica de programação funciona da seguinte forma:

O Sissenagri monta uma tabela com o ID de todos os módulos que necessitem programação. Se o modo de programação for do tipo unitário ou se um módulo for programado pela primeira vez, haverá apenas um ID na tabela. No modo de programação tipo área, apenas os módulos que fizerem parte da área selecionada terão seus IDs nesta tabela. Caso o modo de programação seja do tipo todos, o aplicativo usará a tabela completa com todos os ID nela contidos.

Ao encontrar um módulo o MP pergunta quem ele é (Mensagem 0).

O módulo responde com seu ID (Resposta da Mensagem 0).

O MP traduz a resposta e envia ao Sissenagri.

O Sissenagri verifica se o ID do módulo faz parte da tabela de programação. Em caso negativo ele manda a mensagem de dispensar módulo (Mensagem 1). Em caso positivo ele manda a mensagem com a primeira parte da programação (Mensagem 2).

O MP traduz a mensagem e envia para o módulo.

Se o módulo receber a mensagem do tipo 1 (Dispensar módulo) ele responde que entendeu o comando (resposta da Mensagem 1), trava por 30 segundos e reinicia após este período.

Se o módulo receber a mensagem do tipo 2 (Programar primeira parte), ele responde que entendeu o comando e grava em sua memória a primeira metade da programação.

O MP então traduz a resposta do módulo e envia ao Sissenagri.

Se a resposta recebida for do tipo 1, o aplicativo envia um comando para que o MP reinicie (Mensagem 9). Após a reinicialização o MP encontrará um novo módulo e poderá reiniciar o processo de programação, na expectativa que este próximo módulo encontrado faça parte do conjunto de módulos que serão programados. Caso contrário, este módulo também será dispensado.

Se a resposta recebida for do tipo 2, o aplicativo enviará a mensagem contendo a segunda parte da programação do módulo (Mensagem 3).

O MP traduz a mensagem e envia para o módulo.

Se o módulo receber a mensagem do tipo 3 (Programar segunda parte), ele responde que entendeu o comando, grava em sua memória a segunda metade da programação, aguarda 30 segundos e reinicia.

O MP novamente traduz a resposta e envia para o aplicativo.

Ao receber a resposta do tipo 3, o aplicativo retira o ID programado da tabela e envia para o MP um comando para que ele reinicie (Mensagem 9).

O Sissenagri continuará a programação até que todos os módulos inicialmente agrupados na tabela de programação sejam efetivamente programados, ou que o período de dois minutos sem que o MP encontre um módulo que faça parte do grupo de módulos a serem programados seja atingido, ou então até que o botão Cancelar seja pressionado. A função Cancelar somente poderá ser acessada caso o usuário esteja realizando a programação dos módulos através da aba "Programação dos Módulos". A função Cancelar não está presente na aba "Adicionar ou Remover Módulo".

Existe ainda a mensagem que permite trocar o ID de um módulo (Mensagem 4) durante o processo de fabricação do mesmo. Esta mensagem não está atrelada a uma função do Sissenagri, pois não é uma função que se deseja ter em campo, mas pode ser enviada por meio de um terminal de comandos quando o módulo necessitar de manutenção.

Este terminal deve acessar a porta de comunicação serial vinculada a interface USB que deverá estar configurada para trabalhar a 9600 bps, 8 bits de dados, nenhuma paridade, um bit de parada e nenhum controle de fluxo.

A Fig. 4.11 apresenta as mensagens trocadas entre os módulos e o Sissenagri no caso em que o módulo encontrado pertence ao grupo dos módulos selecionados para programação. A Fig. 4.12

apresenta o caso oposto.

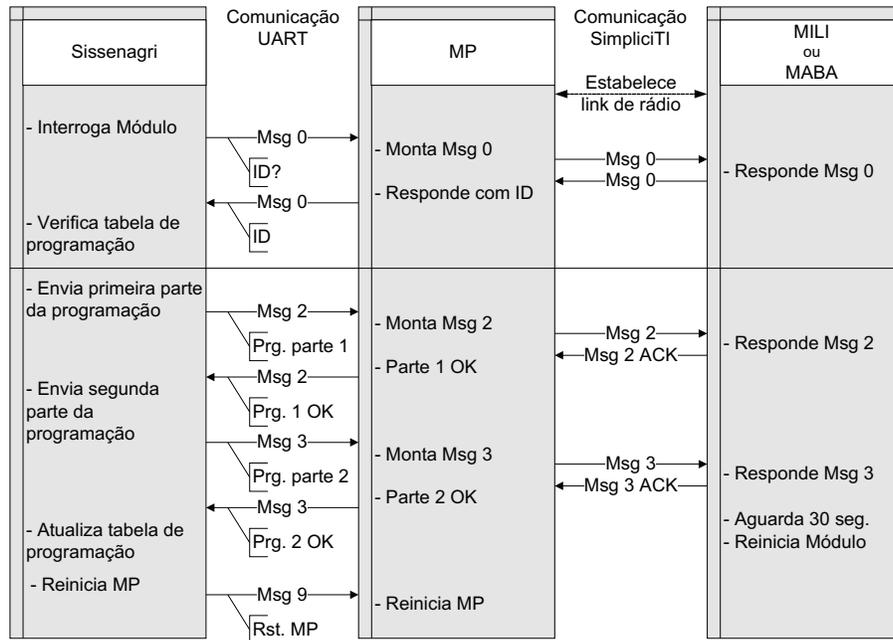


Fig. 4.11: Mensagens trocadas entre os módulos quando o módulo encontrado faz parte do grupo que receberá programação.

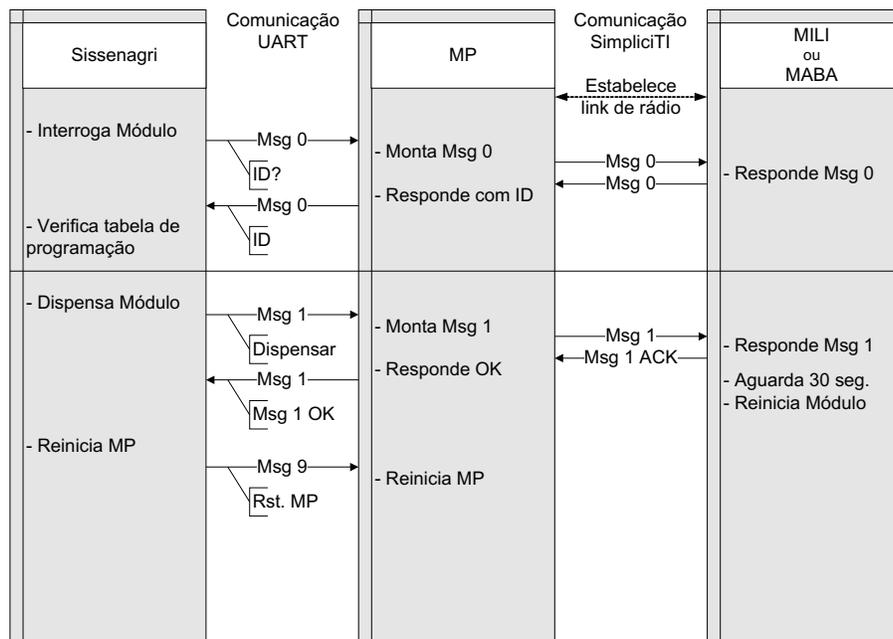


Fig. 4.12: Mensagens trocadas entre os módulos quando o módulo encontrado não faz parte do grupo que receberá programação.

A Fig. 4.13 apresenta o formato das mensagens trocadas entre o Sissenagri e o MP.

```

$M_PC,0,00000000,XXXXXXXXXX,XXXXXXXXXX,XXXXX,XX,XX,XXXX,XX,XX,X,XX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,
XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXXX,XXXX,XXXX,XXXX,XXX,

$M_PC,1,12345678,XXXXXXXXXX,XXXXXXXXXX,XXXXX,XX,XX,XXXX,XX,XX,XX,X,XX,XXX,XXX,XXX,
XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXXX,XXXX,XXXX,XXXX,XXXX,XXX,

$M_PC,2,12345678,-22823505,-047065105,06304,02,05,2010,19,15,20,1,12,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,
XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXXX,XXXX,XXXX,XXXX,XXXX,XXX,

$M_PC,3,12345678,XXXXXXXXXX,XXXXXXXXXX,XXXXX,XX,XX,XXXX,XX,XX,X,XX,015,060,018,048,020,
039,022,029,024,020,026,015,030,011,033,005,0400,1000,1600,2200,001,

$M_PC,4,FFFFFFFF,12345678,XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX,
XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXXX,XXXX,XXXX,XXXX,XXX,

$M_PC,9,XXXXXXXXXX,XXXXXXXXXX,XXXXXXXXXX,XXXXX,XX,XX,XXXX,XX,XX,X,XX,XXX,XXX,XXX,XXX,
XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXX,XXXX,XXXX,XXXX,XXXX,XXXX,XXX,
    
```

Fig. 4.13: Mensagens enviadas pelo Sissenagri ao MP.

As Figuras 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 apresentam respectivamente as mensagens transmitidas entre o MP e os demais módulos.

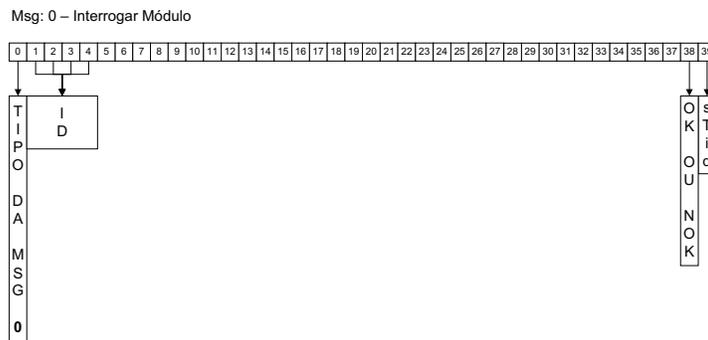


Fig. 4.14: Mensagem 0 - Interrogar sensor.

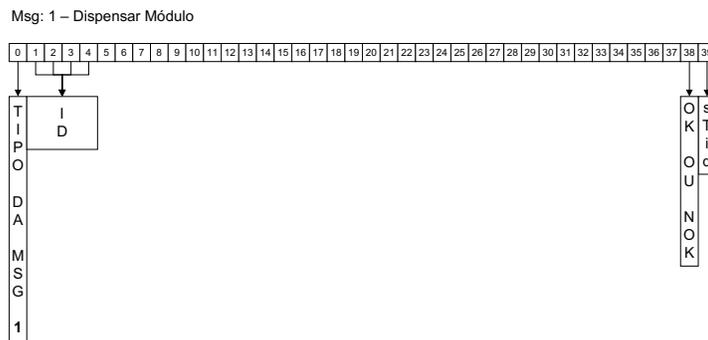


Fig. 4.15: Mensagem 1 - Dispensar sensor.

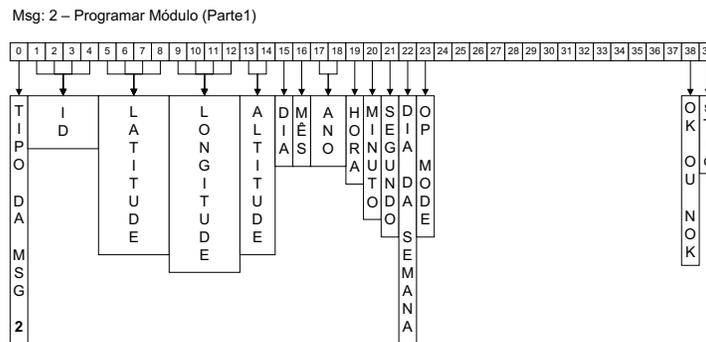


Fig. 4.16: Mensagem 2 - Programar primeira parte.

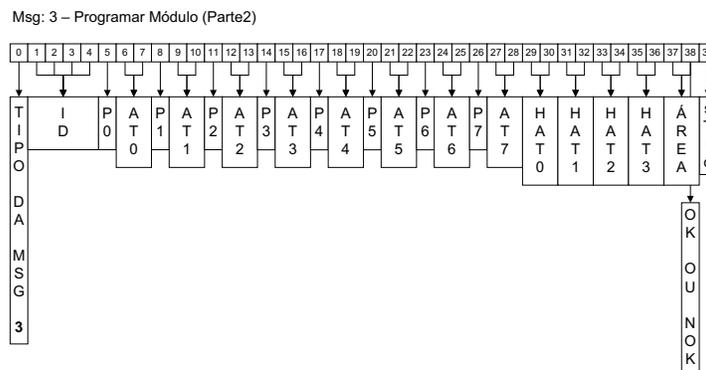


Fig. 4.17: Mensagem 3 - Programar segunda parte.

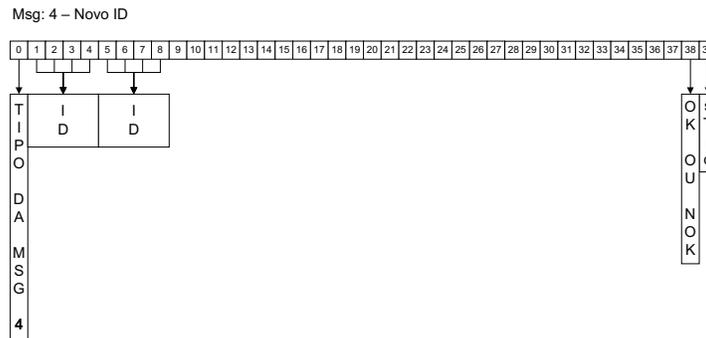


Fig. 4.18: Mensagem 4 - Programar novo ID.

4.2.3 Descrição do *hardware* desenvolvido

O núcleo dos módulos é composto por um microcontrolador da família MPS430F5xxx da Texas Instruments. Este microcontrolador foi escolhido por possuir consumo energético muito baixo ($165 \mu\text{A}/\text{MHz}$ quando operando a 8 MHz e $2,6 \mu\text{A}$ quando em modo de baixo consumo), além de integrar uma grande quantidade de periféricos [22] e também por possuir ambiente de desenvolvimento amigável e ferramenta de depuração de ótima qualidade.

Neste trabalho fazemos uso de periféricos internos do microcontrolador. O relógio de tempo

real tem por objetivo sincronizar as atuações dos módulos enquanto o conversor analógico-digital se encarrega de converter a informação analógica proveniente do sensor de umidade do solo para que o microcontrolador possa processá-la, operando a 8 MHz por meio de seu oscilador interno.

A comunicação sem fio se faz através do rádio CC2500, que opera na faixa de 2.4GHz e se comunica com o microcontrolador por um barramento SPI. Um diagrama de blocos do sistema é apresentado na Fig. 4.19.

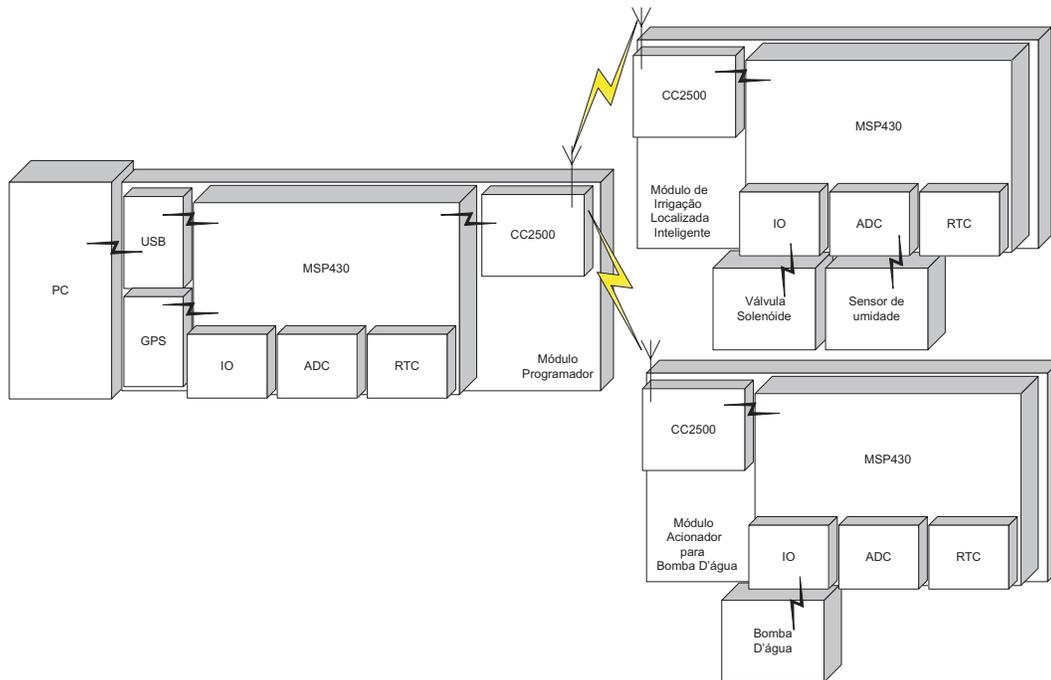


Fig. 4.19: Diagrama de blocos do sistema.

Pela figura 4.19 é possível notar que o núcleo de todos os módulos é constituído pelo mesmo *hardware*.

Núcleo de controle e comunicação

Este núcleo foi desenvolvido com base no microcontrolador MSP430F5438, cujas amostras foram gentilmente cedidas pela Texas Instruments junto com o CI de rádio CC2500 e a ferramenta de gravação e depuração MSP-FETU430IF para microcontroladores da família MSP430. Neste projeto não são usados todos os recursos desse microcontrolador. Para efeito de redução de custos poderia ser empregado o MSP430F5418 que é no momento o CI mais barato da família 5 e possui todos os periféricos necessários para o funcionamento do sistema aqui proposto.

O núcleo é basicamente constituído por uma placa de circuito impresso que contém um CI microcontrolador MSP430F5438 com programação *in circuit*, ligado a um CI rádio CC2500. Este núcleo foi desenvolvido como um kit de desenvolvimento e permite acesso de entidades externas a vários portais do microcontrolador, através de quatro barras de pinos (P1, P2, P3 e P4). Desta forma este *hardware* pode ser usado em outros trabalhos que empreguem o uso de microcontroladores de baixo consumo e comunicação *wireless* baseado no padrão IEEE 802.15.4.

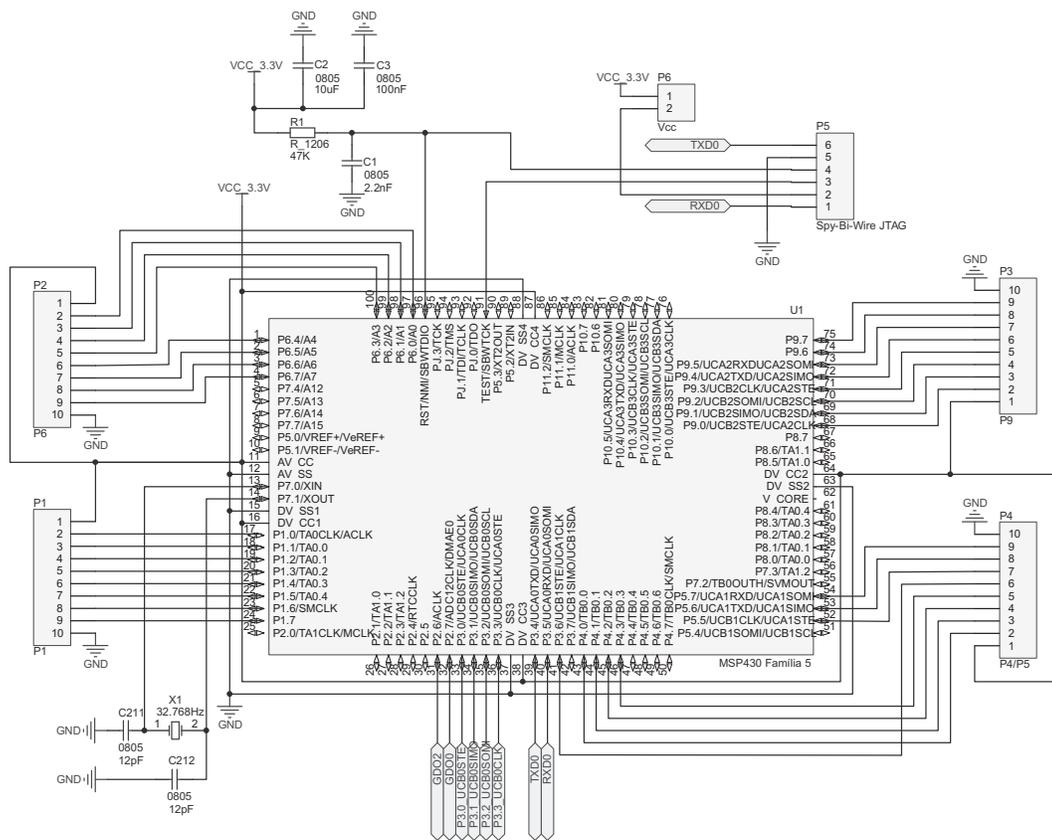


Fig. 4.20: Parte inferior do circuito que forma o núcleo do sistema.

Para melhor descrição do circuito, este está dividido em duas partes. A parte inferior, apresentado pela Fig. 4.20, tem o microcontrolador e suas ligações com os portais de IO. Ligados ao microcontrolador tem um cristal de 32,768 Hz, que serve como *clock* do relógio de tempo real, cinco barras de pinos e um *jumper* (P6) que permite habilitar e desabilitar a alimentação proveniente do gravador/deputador.

A barra P5 é responsável pela programação *in circuit* e depuração no modo SBW e também possui dois pinos de IO que podem ser configurados como uma conexão serial UART. A tabela 4.1 mostra a pinagem dessa barra de pinos.

Tab. 4.1: Pinagem da barra de pinos P5.

| Pino | Função |
|------|---|
| 1 | P3.5/UCA0RXD IO genérica, Recebe dados no modo USCI A0 UART |
| 2 | Vcc Alimentação |
| 3 | TEST/SBWTCK Pino de teste JTAG, Entrada de clock do SBW |
| 4 | RST/SBWDIO <i>Reset</i> ,IO do SBW |
| 5 | Terra Alimentação |
| 6 | P3.4/UCA0TXD IO genérica, Envia dados no modo USCI A0 UART |

As barras de pinos P1, P2, P3 e P4 fazem a conexão das portas do microcontrolador com dispositivos externos. As tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 trazem a pinagem destas respectivamente.

Tab. 4.2: Pinagem da barra de pinos P1.

| Pino | Função |
|------|------------------|
| 1 | Vcc |
| 2 | P1.0/TA0CLK/ACLK |
| 3 | P1.1/TA0.0 |
| 4 | P1.2/TA0.1 |
| 5 | P1.3/TA0.2 |
| 6 | P1.4/TA0.3 |
| 7 | P1.5/TA0.4 |
| 8 | P1.6/SMCLK |
| 9 | P1.7 |
| 10 | Terra |

Tab. 4.3: Pinagem da barra de pinos P2.

| Pino | Função |
|------|---------|
| 1 | Vcc |
| 2 | P6.0/A0 |
| 3 | P6.1/A1 |
| 4 | P6.2/A2 |
| 5 | P6.3/A3 |
| 6 | P6.4/A4 |
| 7 | P6.5/A5 |
| 8 | P6.6/A6 |
| 9 | P6.7/A7 |
| 10 | Terra |

Através destes portais pode-se controlar 32 portas de IO genéricas. Oito destas portas, que se encontram na barra de pinos P1, aceitam interrupção.

Com exceção aos pinos 9 da P1 e 8 e 9 da P3, todos os demais pinos de IO da P1, P2, P3 e P4, quando não atuam como portas de IO genéricas, possuem outra função, normalmente vinculada a um periférico do microcontrolador.

A P1 permite saída do sinal de clock ACLK e SMCLK nos pinos 2 e 8, enquanto os pinos de 3 a 7 acessam o temporizador A.

A P2 possui oito entradas analógicas para o ADC nos pinos de 2 a 9.

A P3 permite comunicação serial USART (UCA2 ou UCB2) nos pinos de 2 a 7.

Na P4 os pinos de 2 a 5 acessam o temporizador B e os pinos de 6 a 9 permitem comunicação serial USART (UCA1).

Tab. 4.4: Pinagem da barra de pinos P3.

| Pino | Função |
|------|-----------------------|
| 1 | Vcc |
| 2 | P9.0/UCB2STE/UCA2CLK |
| 3 | P9.1/UCB2SIMO/UCB2SDA |
| 4 | P9.2/UCB2SOMI/UCB2SCL |
| 5 | P9.3/UCB2CLK/UCA2STE |
| 6 | P9.4/UCA2TXD/UCA2SIMO |
| 7 | P9.5/UCA2RXD/UCA2SOMI |
| 8 | P9.6 |
| 9 | P9.7 |
| 10 | Terra |

Tab. 4.5: Pinagem da barra de pinos P4.

| Pino | Função |
|------|-----------------------|
| 1 | Vcc |
| 2 | P4.0/TB0.0 |
| 3 | P4.1/TB0.1 |
| 4 | P4.2/TB0.2 |
| 5 | P4.3/TB0.3 |
| 6 | P3.6/UCB1STE/UCA1CLK |
| 7 | P5.5/UCB1CLK/UCA1STE |
| 8 | P5.6/UCA1TXD/UCA1SIMO |
| 9 | P5.7/UCA1RXD/UCA1SOMI |
| 10 | Terra |

A parte superior do circuito, como mostrado na Fig. 4.21, é composta pelo rádio que é controlado pelo microcontrolador através de uma interface SPI além de duas portas de IO.

A interface SPI consiste em um protocolo de comunicação serial padronizado pela Motorola que permite comunicar um dispositivo mestre a um ou mais dispositivos escravos em modo *full duplex* por meio de quatro fios [23].

O CI CC2500 é um transreceptor de RF que opera na faixa de 2.4 GHz e desenvolvido com foco em baixo custo e baixo consumo energético. Seu consumo é de 13,3 mA quando transmitindo a 250 kBaud e de 400 nA quando em modo de não operação (*sleep mode*) [24].

Para seu funcionamento, o CC2500 necessita de um sinal de *clock* de 26 MHz e este sinal é providenciado pelo cristal XT1.

A saída de rádio deste CI é balanceada e possui impedância de carga diferencial de $80 + j74 \Omega$. Para fazer o casamento de com uma linha de transmissão desbalanceada de 50Ω foi usado como base o circuito de referência [25], de onde foram aproveitados o esquema elétrico e os valores dos componentes. Para facilitar o trabalho de montagem da placa, o tamanho físico dos componentes

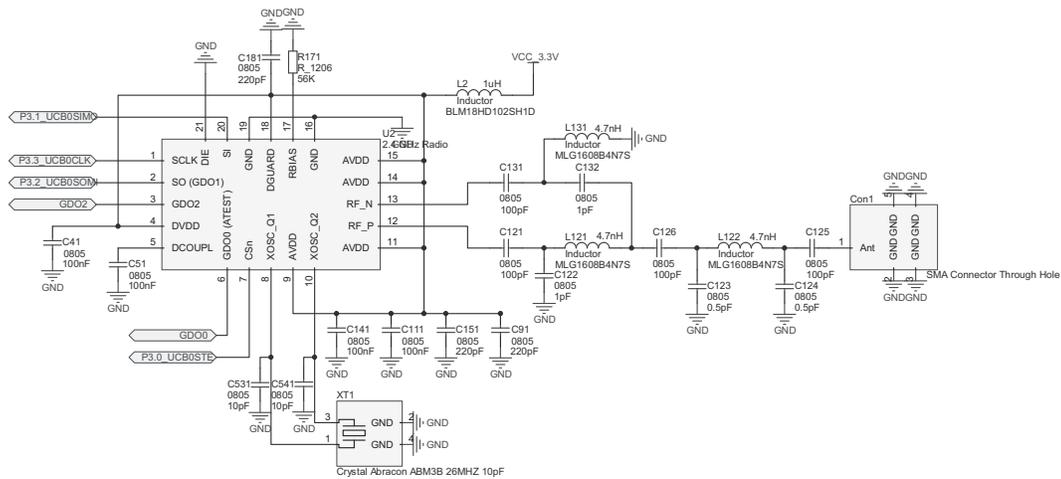


Fig. 4.21: Parte superior do circuito que forma o núcleo do sistema.

SMD foi aumentado, porém, respeitou-se o tipo de componente sugerido pela referência no que diz respeito as características elétricas e a precisão dos capacitores cerâmicos.

Para cálculo da largura da linha de transmissão foi considerado as seguintes características da placa de circuito impresso:

- Especificação da placa: FR4, dupla face, 1 Oz de cobre.
- Espessura do dielétrico: $h = 1$ mm
- Espessura do cobre: $t = 0,03556$ mm (1 Oz de cobre por pé quadrado)
- Constante dielétrica a 2,4 GHz: $\epsilon_r = 4$

Usando a equação de aproximação para cálculo de impedância de linha *Microstrip*:

$$Z_0 = \frac{87}{\epsilon_r + 1,41} \ln \left(\frac{5,98h}{0,8d + t} \right) \quad (4.1)$$

Temos para $Z_0 = 50 \Omega$ a espessura $w = 1,92$ mm.

Esta linha de transmissão liga o circuito de casamento de impedância com o conector SMA da antena.

Para irradiação de RF foi escolhida a antena ANT-2.4-CW-RAH-SMA do fabricante *Antenna Factor* pois é de pequeno tamanho, possui preço acessível e seu diagrama de irradiação é omni-direcional [26]. Esta antena pode ser substituída por outro tipo de antena com diferentes ganhos de diretividade nos eixos X, Y e Z de acordo com a necessidade do projeto, desde que respeitada a impedância característica de 50Ω e conexão SMA.

O *layout* do circuito desenvolvido apresenta-se nas Figs. 4.22 e 4.23.

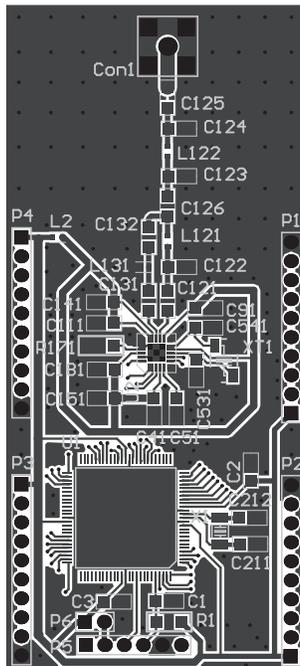


Fig. 4.22: Face superior do núcleo de controle e comunicação.

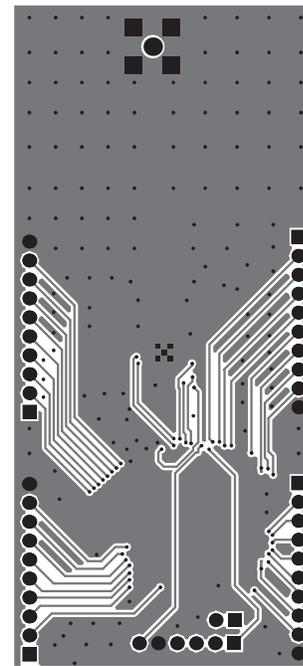


Fig. 4.23: Face inferior do núcleo de controle e comunicação.

Hardware do MABA

O MABA usa o pinos 4 do P4 para controlar a moto-bomba e o pino e 5 também do P4 para controlar um LED verde que indica o funcionamento do módulo.

A moto-bomba é emulada neste trabalho por um LED azul. Busca-se aqui emular uma condição real de controle através do uso de componentes que podem ser substituídos de forma direta por outros de maior capacidade em caso de uso na condição real.

Desta forma, o LED azul é excitado por um relé que por sua vez é excitado por um transistor, para evitar drenar corrente proveniente do microcontrolador. Obviamente, em um caso real, a alimentação da bomba viria da rede externa e não da linha de alimentação digital.

O circuito apresentado na Fig. 4.24 mostra os demais componentes desse módulo.

Como a moto-bomba é alimentada pela rede de energia elétrica, projetou-se uma fonte regulada com duas saídas (3,3V e 5V) para alimentação desse módulo.

A linha de 3,3V alimenta o núcleo e os LEDs enquanto a linha de 5V alimenta o relé.

Os botões presentes neste módulo serviram apenas para o desenvolvimento do projeto e não tem serventia no sistema final. Optou-se por manter a documentação do *hardware* original neste trabalho pois assim como o núcleo de controle e comunicação este também pode ser empregado no desenvolvimento de outros projetos. O mesmo se aplica para o MILI.

O *layout* do circuito desenvolvido apresenta-se na Fig. 4.25.

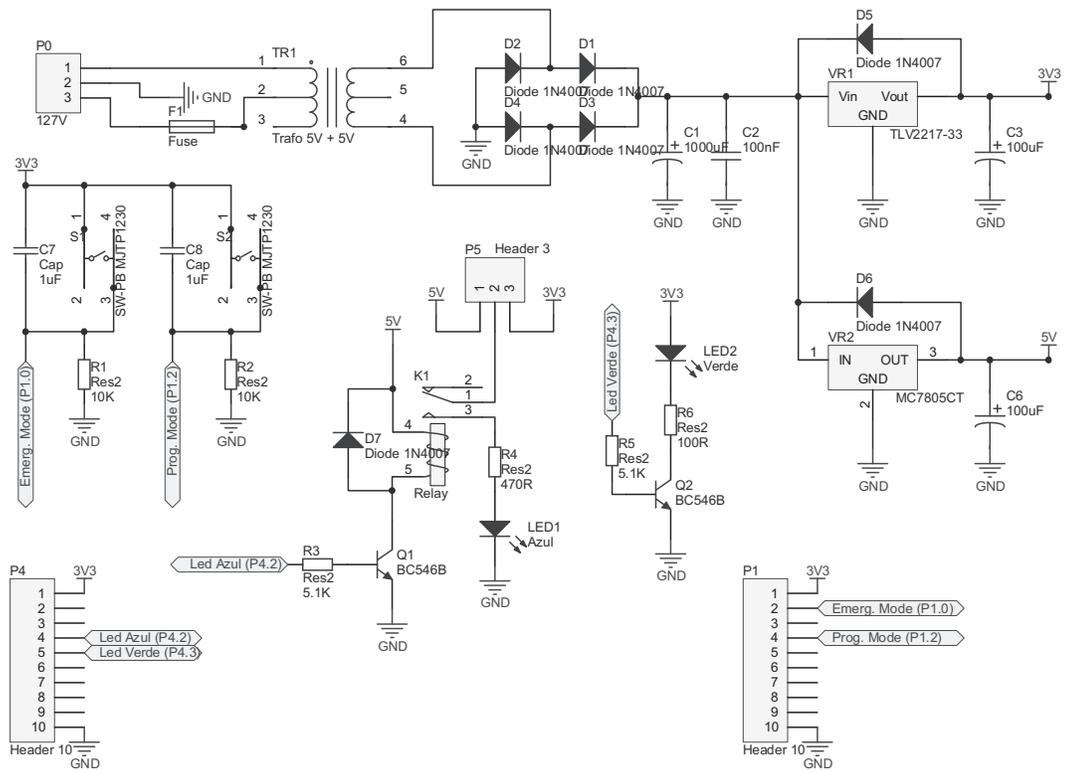


Fig. 4.24: Esquema elétrico do MABA.

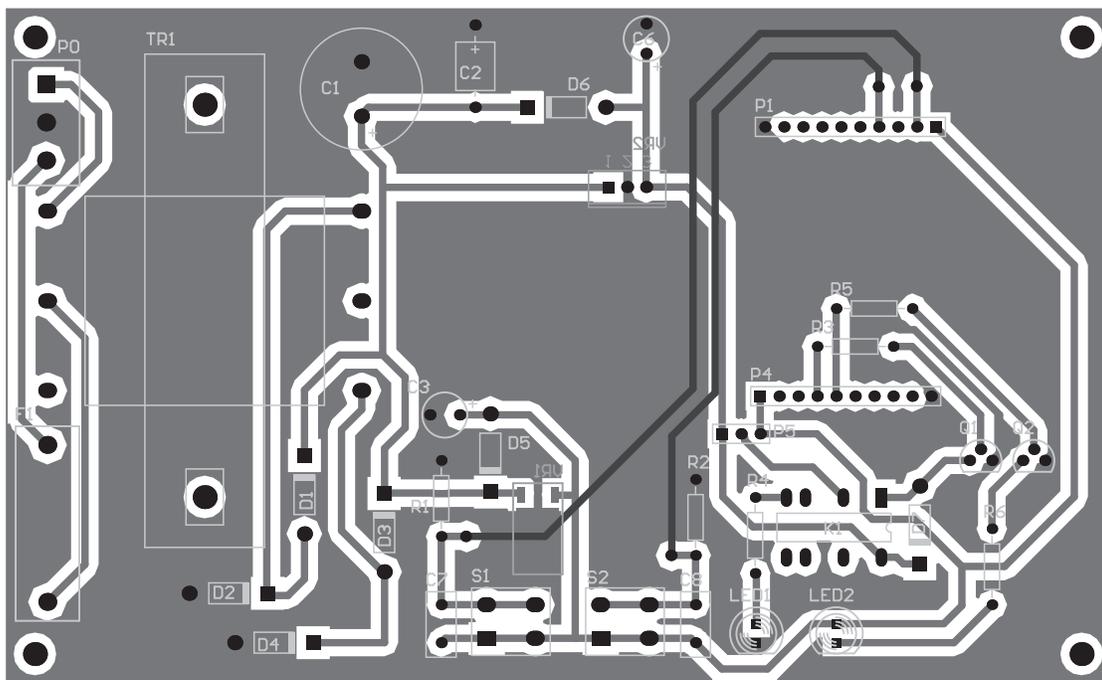


Fig. 4.25: PCB do MABA.

Hardware do MILI

O hardware desenvolvido para testar o MILI usa um divisor resistivo regulado por potenciômetro para emular o sensor de umidade do solo e uma série de LEDs para indicar as diferentes operações do módulo. O LED amarelo indica o processo de programação, o vermelho indica a atuação do sensor ou problemas ocorridos no sistema, o verde indica sua operação e o azul emula a abertura de uma válvula solenoide para liberação de água para os micro-aspersores.

No esquema apresentado na Fig. 4.26 pode-se observar a existência de dois potenciômetros e dois botões. Como já mencionado, este equipamento foi desenvolvido com características genéricas e pode ser usado como um kit de desenvolvimento para outros trabalhos. Assim, apenas um potenciômetro tem serventia neste trabalho enquanto o outro potenciômetro e os botões serviram para o desenvolvimento da proposta original que foi otimizada no final do trabalho.

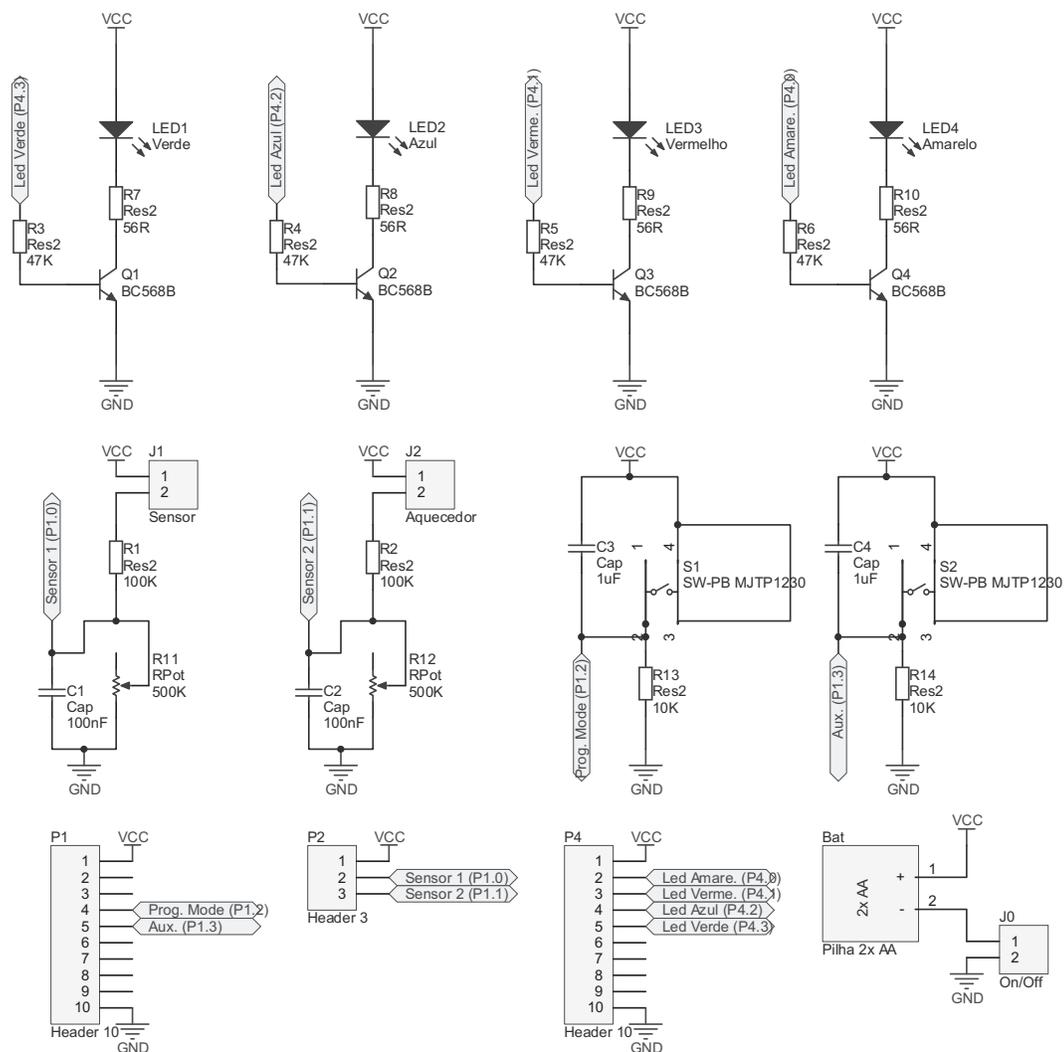


Fig. 4.26: Esquema elétrico do MILI.

No desenvolvimento do trabalho, para evitar o consumo desnecessário das baterias, o divisor resistivo ganhou um recurso para ser habilitado ou desabilitado através de um *jumper*, que não é

necessário na prática. O divisor resistivo permite a leitura analógica entre 0 e $5/6$ de V_{cc} e corresponde às umidades relativas do solo entre 0 e 100% respectivamente. Neste caso, 100% corresponde ao solo plenamente saturado. Esta tensão é amostrada e convertida pelo ADC em um valor digital para comparação com a tabela de programação do módulo.

O *layout* do circuito desenvolvido apresenta-se na Fig. 4.27.

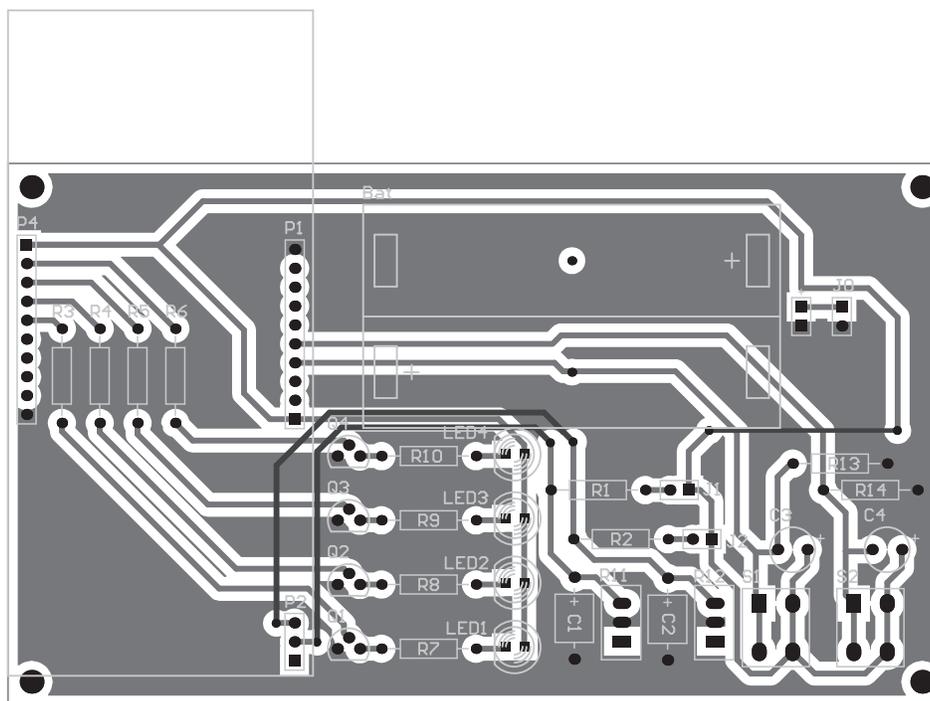


Fig. 4.27: PCB do MILI.

Hardware do MP

O MP é talvez o módulo mais interessante do sistema pois possui conexão UART com um módulo de GPS e outra conexão com um computador através de uma interface USB. Esta interface é convertida em uma conexão serial UART e se liga ao microcontrolador por intermédio do CI FT232BM da FTDI [27] que possui *driver* próprio para ambiente Windows e desta forma pode se comunicar com o aplicativo Sissenagri.

A Fig. 4.26 mostra o esquema elétrico do MP, com alimentação proveniente da USB regulada em 3,3V para se comunicar com o microcontrolador.

Ligado ao FT232BM temos um cristal de 6 MHz e uma memória EEPROM de 1 Kbit, para guardar informações referentes ao CI da FTDI. O CI usado neste caso foi o 93LC46BT/SN da Microchip [28]. Estas informações servem para que o computador reconheça o dispositivo a ele conectado e podem ser gravadas, por intermédio de um aplicativo da FTDI chamado FT_Prog [29], diretamente pela conexão USB. Maiores informações sobre como gravar estas informações podem ser encontradas em [30]. O LED ligado ao FT232BM informa a transmissão de mensagens entre o MP e o PC.

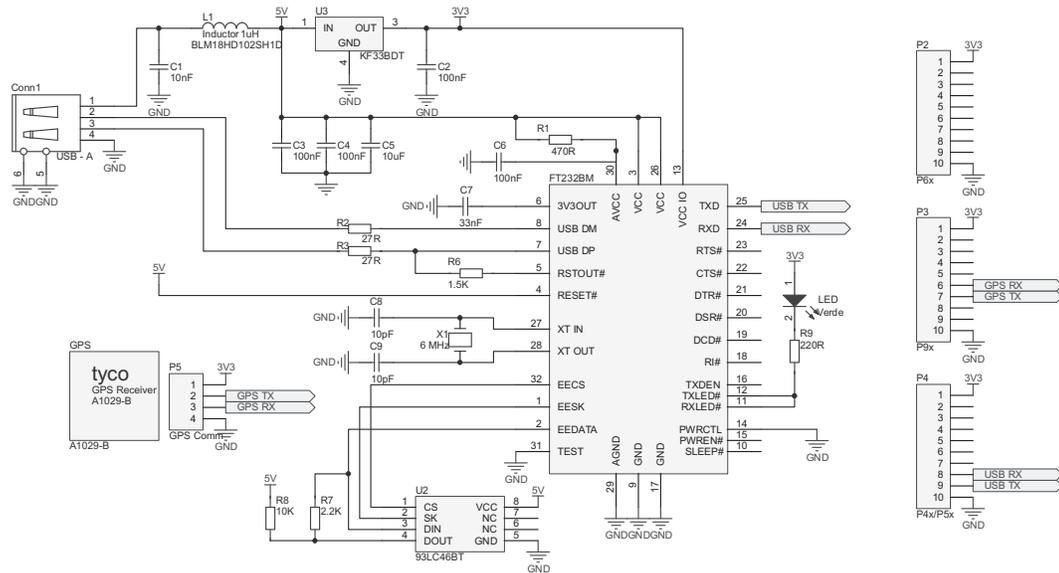


Fig. 4.28: Esquema elétrico do MP.

O módulo GPS utilizado é o Tyco A1029. Foi escolhido por apresentar uma boa precisão de localização (aproximadamente 3 metros [31]) e pelo conhecimento adquirido em trabalhos anteriores [32].

Este módulo processa o sinal de GPS e envia uma sequência de caracteres pela conexão serial contendo as coordenadas geográficas além de outras informações de acordo com o protocolo NMEA [33] a uma taxa de 4800 bps.

Na face superior do *layout* do MP, apresentado na Fig. 4.29, há um espaço para a instalação do Tyco A1029 de forma que este fique montado entre o PCB do MP e o núcleo de controle e comunicação. A Fig. 4.30 apresenta a face inferior do *layout* desenvolvido.

4.3 Funcionamento do Sistema

O sistema inicia seu funcionamento quando o usuário executa a função ADICIONAR MÓDULO, após inserir as informações de ID, quantidade de água a ser aspergida em função da umidade medida e dos horários de atuação no MP. Esta função faz com que as informações existentes no MP sejam transferidas para o módulo a ser programado. Este, então, salva as informações na memória e inicia o processamento dos dados. Posteriormente, os módulos podem ser reprogramados de forma independente ou por área georreferenciada.

A operação do MILI consiste em esperar por um sinal gerado pelo relógio de tempo real para então acionar a leitura do seu sensor de umidade. Com base nessa leitura o módulo verifica em sua tabela a necessidade ou não de acionar o micro-aspersor, e por quanto tempo ele deve ser acionado. Quando a válvula é aberta um cronômetro passa a contar o tempo que ela permanece aberta e é então fechada assim que o cronômetro se iguala ao valor de tempo armazenado na tabela programada. A seguir o módulo entra em modo de baixo consumo e aguarda o próximo sinal do relógio de tempo real ou do MP solicitando a gravação de uma nova programação.

O funcionamento do MABA é semelhante ao do MILI, mas não depende da leitura de sensores.

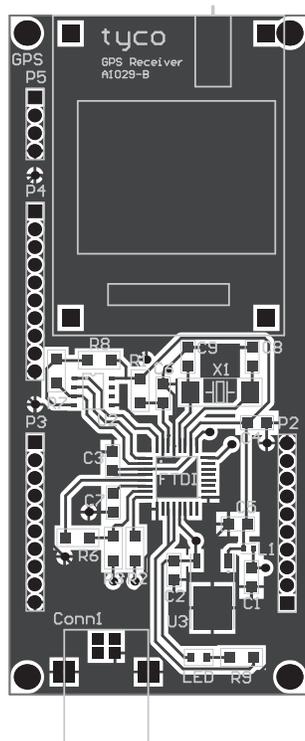


Fig. 4.29: Face superior do MP.

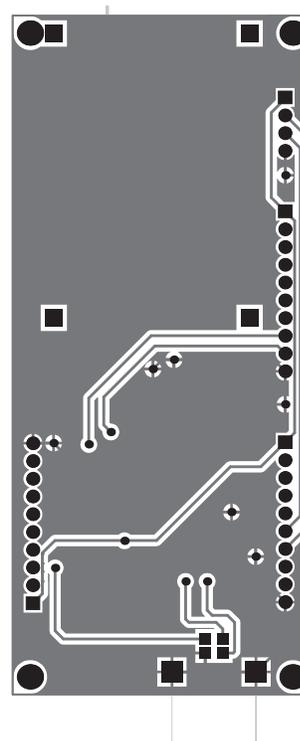


Fig. 4.30: Face inferior do MP.

Este se limita a acionar a moto-bomba na mesma hora em que os MILIs iniciam a leitura do sensor e desliga a mesma após o maior período de liberação de água programado nos MILIs. O MABA também se mantém em modo de baixo consumo na maior parte do tempo e, como o MILI, sai deste modo após o sinal recebido pelo relógio de tempo real ou do MP solicitando nova programação.

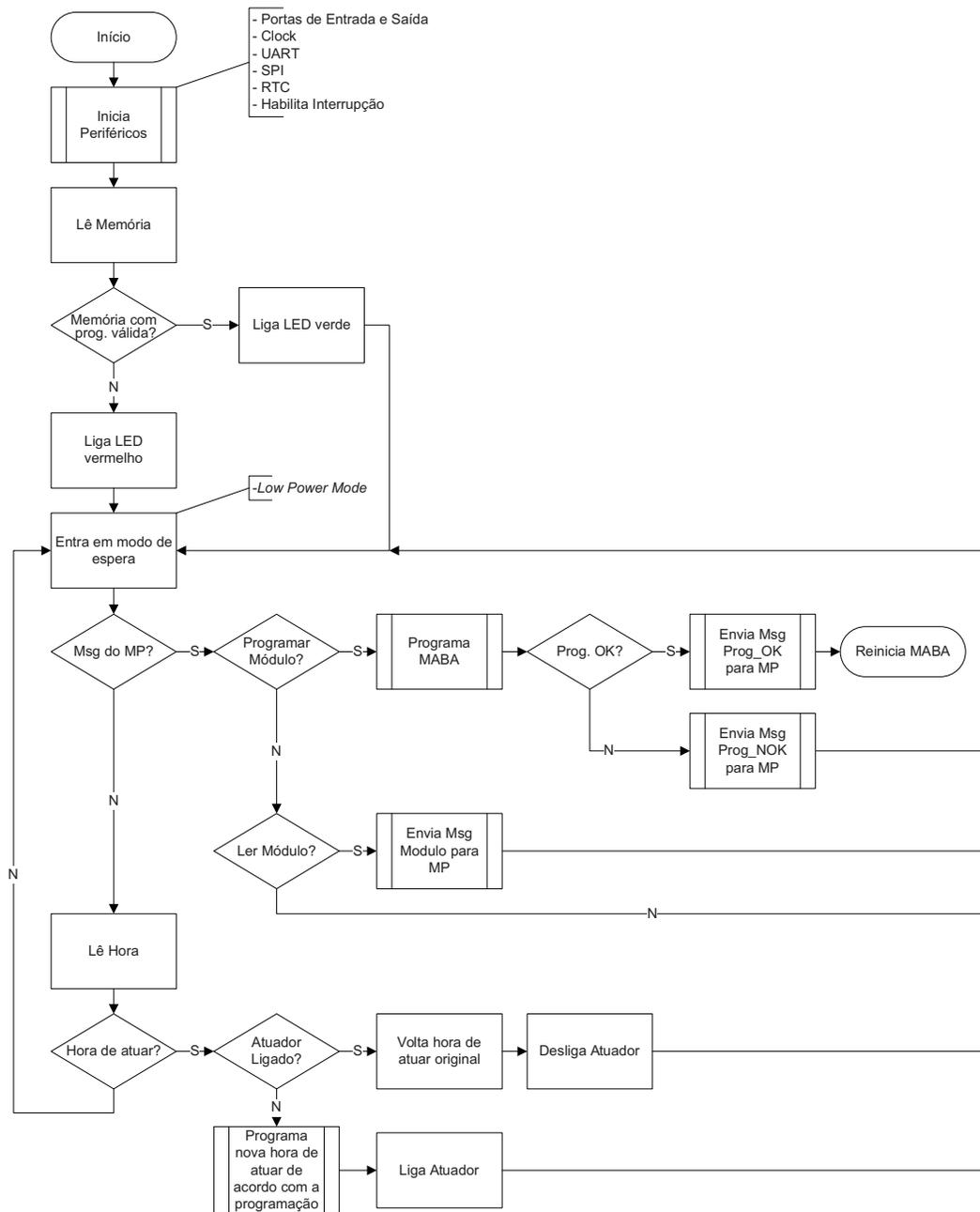
4.4 Firmware

Cada módulo possui um firmware diferente. Nesta seção abordaremos o desenvolvimento do *software* para cada um dos módulos com considerações sobre seu funcionamento.

Os módulos programáveis necessitam de uma programação válida para começar seu funcionamento, caso contrário eles podem funcionar aleatoriamente ou mesmo travar o módulo durante o processo de funcionamento.

4.4.1 Firmware do MABA

Como se pode ver na Fig. 4.31 o funcionamento do MABA inicia com uma checagem da validade da memória após inicialização dos periféricos. Esta função serve para indicar ao usuário se o módulo possui informação válida em sua memória ou se esta está vazia ou corrompida. Basicamente, esta função informa se o módulo já foi programado ou se sua memória está em branco. Esta informação serve mais para o ambiente de desenvolvimento que para o caso de uso real, o que torna esta etapa opcional.

Fig. 4.31: Fluxograma do *firmware* do MABA.

Independente da condição verificada, o MABA entrará em modo de espera e permanecerá em modo de baixo consumo (*sleep mode*) até que uma informação de interrupção informe a necessidade de ler uma informação recebida do sistema de rádio ou verificar a hora do relógio.

Caso o sistema de radio receba alguma informação, sendo que esta pode ser uma requisição do MP de identificação do MABA ou uma requisição do MP de programação do MABA, este processa a informação em envia resposta ao MP. As respostas podem ser de confirmação da programação (positiva ou negativa) ou da identificação do MABA de acordo com a mensagem recebida. Quando

o MABA sofre uma programação ele se reinicia para que as novas informações tenham validade imediata no funcionamento do módulo.

De minuto em minuto o módulo faz a leitura do relógio. Após cada leitura ele compara o relógio com o horário de atuação programado na memória. Quando os horários são iguais ele inicia a atuação da moto-bomba e soma o tempo de atuação programado ao horário atual, gravando um novo horário de atuação na memória. Assim que esse novo horário é atingido, o MABA desliga a moto-bomba, programa o próximo horário de atuação na memória e aguarda por ele em modo de baixo consumo. Até quatro atuações diárias são possíveis.

4.4.2 *Firmware do MILI*

O funcionamento do MILI é semelhante ao do MABA, porém, o MILI depende da leitura de variáveis externas provenientes do sensor de umidade do solo além dos horários de atuação programados em sua memória.

Conforme apresentado na Fig. 4.32, o funcionamento do MILI também inicia com uma checagem da validade da memória após inicialização dos periféricos e possui uma etapa de modo de espera onde ele permanecem em modo de baixo consumo até que as interrupções do relógio ou do sistema de rádio solicitem ação do microprocessador.

Com exceção da etapa de leitura do sensor de umidade do solo, as demais funções são as mesmas, com a diferença de que o MILI atua sobre uma válvula solenoide enquanto o MABA atua sobre um relé que liga e desliga a moto-bomba.

Na etapa de leitura do sensor de umidade do solo o MILI transforma o valor analógico da leitura do sensor em uma informação digital e em seguida esta informação é comparada com a tabela programada na memória do módulo. De acordo com esta tabela, uma quantidade de tempo é somada ao relógio e se torna o próximo horário de atuação. O MILI então mantém a válvula aberta pelo período estabelecido. Após este tempo a válvula é fechada e o próximo horário de atuação é gravado na memória.

4.4.3 *Firmware do MP*

O *firmware* do MP é um pouco mais complexo, embora pela Fig. 4.32 ele pareça mais simples.

Após inicializar os periféricos este módulo permanece em modo de espera e aguarda pelas informações do GPS, solicitações do PC provenientes do aplicativo Sissenagri ou resposta dos módulos programados.

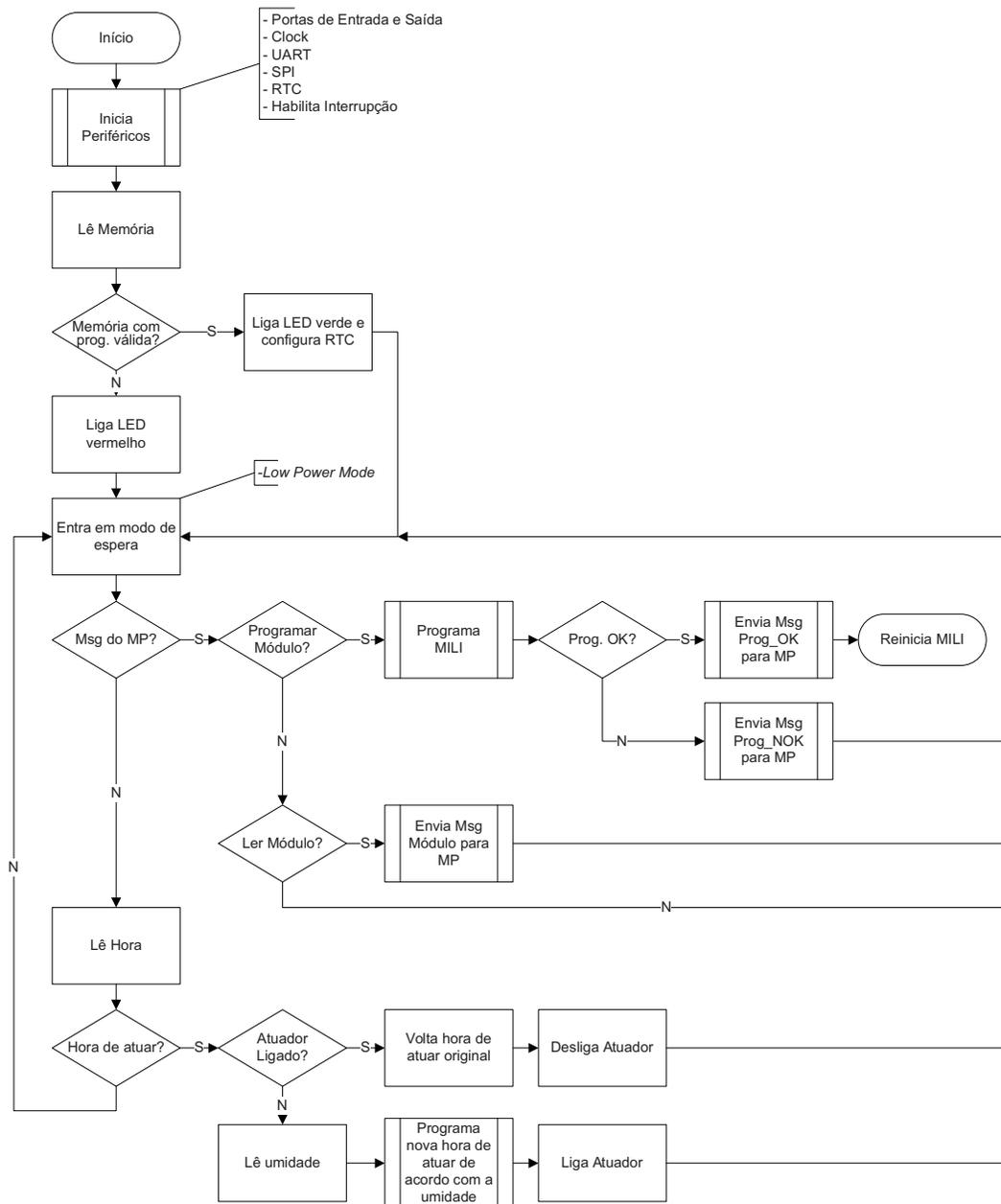
A cada segundo o módulo de GPS envia ao microcontrolador uma grande quantidade de informações do protocolo NMEA. Um exemplo destas informações é apresentado a seguir:

```

1 $GPGSV,2,1,08,02,50,033,00,04,45,098,00,05,19,235,00,09,55,216,00*74
2 $GPGSV,2,2,08,12,27,230,00,15,29,325,00,17,15,139,00,26,23,344,00*72
3 $GPGGA,211501.000,2249.4103,S,04703.9063,W,0,00,99.0,0630.4,M,-3.9,M,,*45
4 $GPRMC,211501.000,V,2249.4103,S,04703.9063,W,0.0,0.0,120109,0.0,W,N*0A
5 $GPGSA,A,1,,,,,,,,,,,,,99.0,99.0,99.0*00

```

Em tempo real o microcontrolador filtra estas informações e envia ao Sissenagri apenas as informações de hora, minuto, segundo, latitude, longitude e altitude no seguinte formato:

Fig. 4.32: Fluxograma do *firmware* do MILI.

1 \$M_GPS,175232.000,2249.4103,S,04703.9063,W,0,0630.4,M

Em paralelo o MP também pode receber uma solicitação do PC para que um módulo seja questionado ou programado. Essas informações são processadas, montadas em um pacote de dados do protocolo SimpliciTI e então enviadas pelo rádio para os módulos.

A resposta dos módulos é a última forma de tirar o MP do modo de espera. Ao receber resposta de um módulo o MP processa a mensagem e envia a mensagem para o PC para que assim o aplicativo Sissenagri possa gerenciar o sistema.

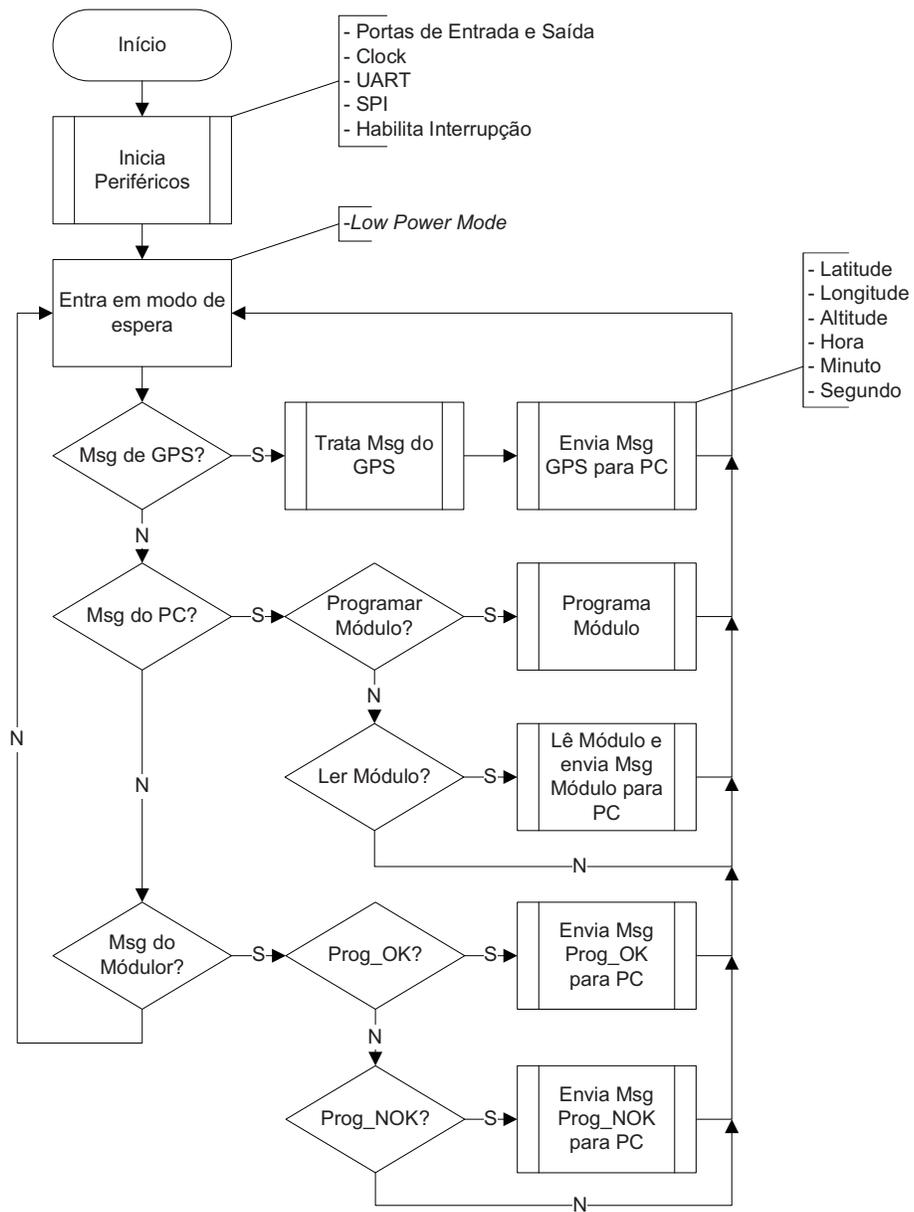


Fig. 4.33: Fluxograma do *firmware* do MP.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

5.1 Teste da programação em visada direta

O objetivo deste teste foi verificar a máxima distância em que a programação de um módulo fosse realizada corretamente. Para isto foi usado um MP e um MILI em uma rua plana e reta a céu aberto.

O MILI foi inicialmente programado (mantendo o MP próximo ao MILI e com a antena de GPS sobre o MILI) e posteriormente reprogramado a cada um metro de distância do MP.

Observou-se que a programação inicial e as demais reprogramações foram efetuadas com sucesso até a distância de 18 metros. Acima desta distância o sistema apresentou falha na função de reprogramação em algumas tentativas.

5.2 Teste da programação em campo

O sistema foi montado em um jardim, numa área com aproximadamente 112m², que possui algumas árvores e arbustos que se comportam como obstáculos para o sinal de RF. A Fig. 5.1 apresenta uma foto do ambiente de testes.

O objetivo deste teste foi verificar as funcionalidades de programação inicial dos módulos em diferentes condições de instalação e de cada um dos modos de reprogramação (unitário, área e todos).

Para isto foi usado um MP, dois MILIs distanciados em 17m e um MABA a uma distância de 6,6m do MILI-1 e 12,5m do MILI-2 conforme apresentado pela Fig. 5.2. O MILI-1 foi instalado próximo a uma árvore frutífera, a céu aberto, enquanto o MILI-2 ficou em ambiente parcialmente coberto, próximo a área descoberta. O MABA ficou em área sem cobertura, porém, próximo a uma cobertura.

A Fig. 5.2 também mostra cinco localizações (A, B, C, D e E) onde foi posicionado o MP para efetuar as programações.

Inicialmente cada um dos módulos foi programado com a antena de GPS posicionada sobre eles. Mesmo sob cobertura parcial ou próximo a uma área coberta, o receptor de GPS captou coordenadas geográficas diferentes para cada um dos módulos. Neste teste não foi verificada a veracidade das coordenadas recebidas, porém, os dados obtidos foram suficientes para montar o mapa no aplicativo e indicar a posição de cada módulo.

Na posição A foi testada a função de reprogramação unitária do MILI-1.



Fig. 5.1: Cenário de teste.

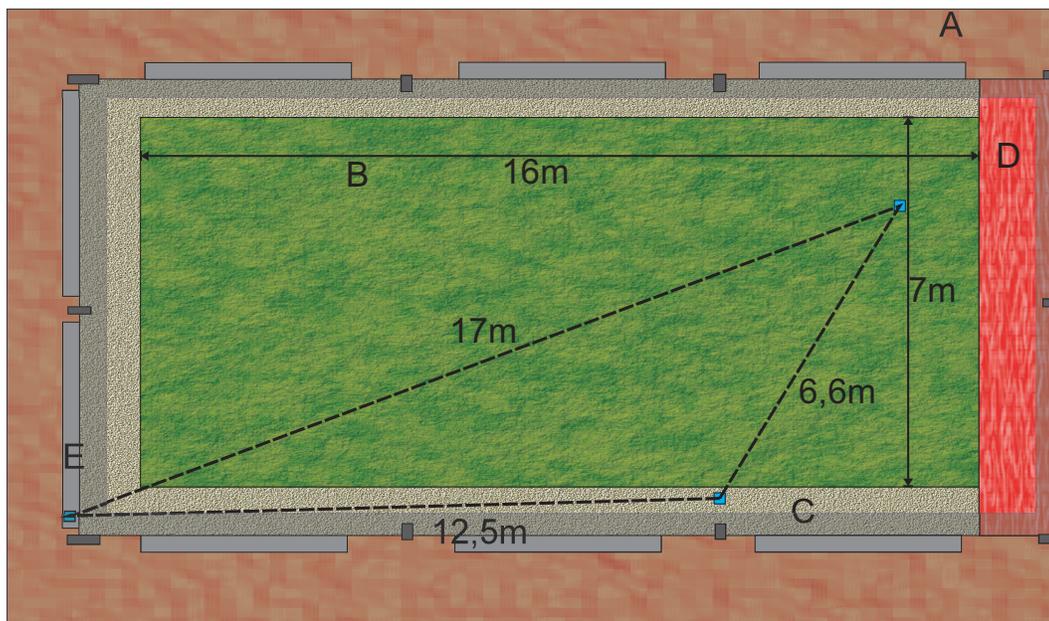


Fig. 5.2: Mapa do cenário de teste.

Na posição B foram testadas as funções de reprogramação da área onde se encontravam os MILIs e posteriormente a função de reprogramação de todos os módulos.

Na posição C foi testada a função de reprogramação unitária do MABA.

Na posição D foi testada a função de reprogramação unitária do MILI-2.

Na posição E foi testada a função de reprogramação unitária do MILI-2.

Observou-se que apenas o teste da função de reprogramação unitária do MILI-2 não obteve

sucesso, pois neste caso, o módulo programado estava a mais de 18 metros do MP, que se encontrava na posição D. Nos demais casos as programações ocorreram com sucesso.

5.3 Considerações sobre o sistema

Como cada MILI atua de forma independente e como a comunicação é feita ponto-a-ponto, não há um limite máximo de MILIs, ao contrário do que se observa quando há uma implementação de uma rede *mesh*.

Para efeito experimental usamos uma palavra de 32 bits para identificar cada módulo, o que possibilita a implementação de 4.294.967.296 módulos. Caso seja necessário em um cenário real, é possível usar uma palavra de tamanho maior e consequentemente a quantidade total de módulos pode ser aumentada.

Para testar a proposta foram desenvolvidos seis núcleos de controle e comunicação empregados em quatro MILIs, um MABA e um MP. Dos seis núcleos, dois apresentaram problemas com o CI de rádio após a montagem da placa. Não se sabe ao certo o motivo do problema, mas acredita-se que os dois CIs de rádio tenham sido danificados no momento da montagem da placa.

Para o teste do MILI o sensor foi emulado eletronicamente e o estado da válvula solenoide foi indicado por um LED. Para o teste do MABA o estado da moto-bomba foi também visualizado através de um LED, porém este último foi acionado por intermédio de um relé.

O receptor GPS usado no projeto (Tyco A1029) apresenta uma precisão de localização de aproximadamente 3 metros [31] e a função GPS se mostrou muito útil para encontrar os módulos no momento da reprogramação dos mesmos.

Neste trabalho os MILIs foram alimentados por baterias, mas por terem sido desenvolvidos como um sistema de muito baixo consumo, estes podem ser alimentados por microgeradores de energia elétrica em paralelo com baterias recarregáveis.

Pelo fato do sistema ter sido desenvolvido como base para uso do microgerador de energia elétrica foi enfocado o uso de microaspersores como emissores de água, porém, caso o sistema utilize outra fonte de energia é possível empregar outros tipos de emissores de água controlados pela válvula solenoide.

Capítulo 6

Considerações Finais

6.1 Conclusão

Este sistema permite a atuação automatizada de microaspersores de modo minimamente complexo e possibilitando sua aplicação na prática.

A programação sem fio dos módulos foi executada com sucesso nos protótipos desenvolvidos e o sistema se mostrou funcional quando testado com emulação do sensor e dos atuadores.

A condição de atuação individual e de programação *ad-hoc* de cada um dos módulos, para levar em conta os efeitos da variabilidade espacial do solo e da possível diferenciação no estágio de desenvolvimento das plantas cultivadas, torna o sistema muito atraente para o emprego em agricultura de precisão.

A contribuição deste trabalho está não somente na apresentação do sistema proposto, mas também na elaboração de um sistema com características genéricas, cuja arquitetura pode ser facilmente replicada por outros pesquisadores em outros contextos que se beneficiem do uso de microcontroladores e comunicação por RF em curtas distâncias.

6.2 Sugestão de trabalhos futuros

Espera-se que o sistema aqui apresentado sirva como ferramenta de estudo ou como base para elaboração de novas ferramentas no que diz respeito à busca das quantidades ótimas de água empregadas nas culturas estudadas. Que a partir das funções apresentadas pelo sistema, diferentes condições hídrico-físicas possam ser testadas, novas informações sobre diferentes condições possam ser divulgadas e catalogadas e que novas formas de manejo da água possam ser estudadas, desenvolvidas e aplicadas em benefício da agricultura e preservação dos recursos hídricos.

O *hardware* apresentado neste trabalho possui capacidade para analisar informações de mais de um sensor por meio dos demais canais do conversor analógico-digital que não foram usados, o que permite que o sistema sofra evolução para tomar decisões baseadas em mais de uma variável. Assim, seria possível analisar a condutividade elétrica e a temperatura do solo, além da umidade relativa.

Este sistema também permite modificações nos MILIs para que estes possam ser utilizados como sistemas de aquisição de dados (*dataloggers*), para coleta de informações relacionados à variação da umidade do solo ao longo do tempo, além de atuarem na correção da umidade do solo.

O MABA pode ser evoluído para controlar a potência da moto-bomba através da adição de um inversor de frequência e sensores de pressão neste módulo. Desta forma, o módulo poderá acionar qualquer tipo de moto-bomba e eliminará a necessidade de utilização de equipamentos externos que tenham por finalidade o controle da pressão da água na linha principal.

Sugere-se que um novo módulo baseado no MABA seja desenvolvido para controle de um sistema de injeção de produtos químicos. Com esse equipamento seria possível dosar com precisão a quantidade de produto injetado permitindo o uso deste sistema também na fertirrigação.

Uma última modificação sugerida neste capítulo é a inclusão de uma função nos módulos que permita testar o sistema após a instalação ou manutenção do mesmo. Desta forma, faz-se possível verificar o funcionamento do sistema sem que haja necessidade de esperar pelos horários programados para atuação dos módulos.

Referências Bibliográficas

- [1] Grzegorz Doruchowski, Waldemar Swiechowski, Artur Godyn, and Ryszard Holownicki. Gps navigated and automatically controlled orchard sprayer with environmentally dependent application system (edas) to implement drift reducing application strategies. *International Commission of Agricultural and Biological Engineers*, 2009.
- [2] D. R. Bizari. Diferentes sistemas de cultivo na economia de água e produtividade do feijão de inverno irrigado. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, 2004.
- [3] P. L. Libardi. Propriedades físico-hídricas do solo no estudo do manejo e da conservação do solo e da água. *Agricultura, sustentabilidade e o semi-árido.*, 2000.
- [4] M. W. Roque. Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos sobre o cultivo do feijão irrigado submetido a diferentes tipos de preparo no solo. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, 2007.
- [5] R. W. Coates, M. J. Delwiche, and P. H. Brown. Design of a system for individual microsprinkler control. *Transactions of the ASABE*, 49(6):1963–1970, 2006.
- [6] R. Morais, A. Valente, and C. Serôdio. A wireless sensor network for smart irrigation and environmental monitoring: A position article. *2005 EFITA/WCCA - Joint Congress on IT in Agriculture*, pages 845–850, 2005.
- [7] C. Serôdio, J. Boaventura Cunha, R. Morais, C. Couto, and J. Monteiro. A networked platform for agricultural management systems. *Computers and Electronics in Agriculture, Elsevier*, 31:75–90, 2001.
- [8] P. K. Sahoo and J. P. Sheu. Modeling iee 802.15.4 based wireless sensor network with packet retry limits. *PE-WASUN*, pages 63–70, 2008.
- [9] J. Keller and R. D. Bliesner. *Sprinkler and trickle irrigation*. Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [10] Wikipedia. Irrigation, 2010. <http://en.wikipedia.org/wiki/Irrigation>.
- [11] A. Borém, M. P. Giúdice, D. M. Queiroz, E. C. Mantovani, L. R. Ferreira, F. X. R. Valle, and R. L. Gomide. *Agricultura de precisão*. Editora UFV, 2000.

- [12] R. L. Baumhardta, R. J. Lascanob, and S. R. Evett. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. *Soil Science Society of America Journal*, 64:1940–1946, 2000.
- [13] Denes K. Roveti. Choosing a humidity sensor: A review of three technologies. *Sensors*, 2001. <http://www.sensormag.com/sensors/humidity-moisture/choosing-a-humidity-sensor-a-review-three-technologies-840>.
- [14] Dione Inês Christ Milani, MariaHermínia Ferreira Tavares, and Clementina Scherpinski. Calibração de sondas tdr em condições de laboratório. *Revista Ambiente e Água*, 3:68–75, 2008.
- [15] G. S. Campbell, K. M. Ellet, C. Calissendorf, and A. L. Flint. Calibration and temperature correction of heat dissipation matric potential sensors. *Soil Science Society of America Journal*, 66:1439–1445, 2002.
- [16] J. W. Hopmans, A. P. Mortensen, G.J. Kluitengerg, and Y. Mori. Multifunctional heat pulse probe for simultaneous measurement of soil water content, solute concentration, and heat transport parameters. *Vadose Zone Journal*, 2003.
- [17] J. A. Siqueira Dias, W. Roque, F. W. D. Pfrimer, and E. C. Ferreira. A combined wenner-array/heat dissipation sensor for measuring electric conductivity and moisture of soils. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, 2009.
- [18] R. Malladi and D. P. Agrawal. Current and future applications of mobile and wireless networks. *Communications of the ACM*, 45:144–146, 2002.
- [19] J. Heidemann, F. Silva, C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, and D. Ganesan. Building efficient wireless sensor networks with low-level naming. *In Proceedings of the Eighteenth ACM Symposium on Operating Systems Principles*, pages 146–159, 2001.
- [20] Wellington Roque. Desenvolvimento de um multi-sensor eletrônico para medida da umidade, temperatura e condutividade elétrica do solo. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, 2008.
- [21] W. Roque, J. A. S. Dias, E. C. Ferreira, and F. D. Pfrimer. An automatic calibration system for electronic soil moisture sensors. *XXXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, 2008.
- [22] Texas Instruments. *MSP430F543x, MSP430F541x Mixed Signal Microcontroller Datasheet*, 2009. <http://www.ti.com/lit/gpn/msp430f5438>.
- [23] Wikipedia. Serial peripheral interface bus, 2010. http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus.
- [24] Texas Instruments. *CC2500 Datasheet*, 2009. <http://www.ti.com/lit/gpn/cc2500/>.
- [25] Texas Instruments. *eZ430-RF2500T Hardware Design Files*, 2009. <http://www.ti.com/litv/zip/slac255>.

- [26] Antenna Factor. *ANT-2.4-CW-RAH-xxx DATA SHEET*, 2008.
- [27] FTDI. Ft232bm usb uart (usb - serial) i.c. Technical report, Future Technology Devices International Ltd., 2005. <http://www.ftdichip.com/>.
- [28] Microship. *1K Microwire Compatible Serial EEPROM - 93LC46BT Datasheet*, 2003. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21749d.pdf>.
- [29] FTDI. Ft_prog utility home page, 2010. http://www.ftdichip.com/Resources/Utilities.htm#FT_Prog.
- [30] FTDI. *Application Note AN_124 User Guide For FTDI FT_PROG Utility*, 2009. http://www.ftdichip.com/Resources/Utilities/AN_124_User_Guide_For_FT_PROG.pdf.
- [31] Tyco Electronics. *GPS Receivers A1029 User's Manual*, 2007. http://beta.nueveochenta.com/static/static/files/T.E._GPS_Receiver_A1029_V4.0.pdf.
- [32] Paulo da Silva Soares. Projeto e desenvolvimento de um computador de bordo para monitoração de veículos de transporte. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, 2008.
- [33] SiRF Technology Inc. *NMEA Reference Manual*, 2005.