



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Clemilson Costa dos Santos

**Sistema de Sensoriamento Remoto de Umidade e
Temperatura do Solo para Irrigação de Precisão**

Fortaleza
Março 2008

Clemilson Costa dos Santos

**Sistema de Sensoriamento Remoto de Umidade e
Temperatura do Solo para Irrigação de Precisão**

Dissertação submetida à Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador:

Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso

Co-Orientador:

Prof. Ph.D. Adunias dos Santos Teixeira

Fortaleza
Março 2008

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Umbelina Caldas Neta - CRB558-CE

S234s Santos, Cleilson Costa dos
Sistema de sensoriamento remoto de umidade e temperatura
do solo para irrigação de precisão / Cleilson Costa dos Santos.
2008.
128 f.; il. ; enc.

Orientador: Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso
Área de concentração: Automação e controle de processos
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará,
Departamento de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2008.

1. Engenharia Elétrica. 2. Redes de Petri. 3. Automação-Irrigação.
4. Sistemas de comunicação sem fio. 5. Agricultura de precisão.
I. Barroso, Giovanni Cordeiro (Orient.). II. Universidade Federal do
Ceará. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica III.
Título.

CDD 621.3



Universidade Federal do Ceará
Departamento de Engenharia Elétrica

Clemilson Costa dos Santos

Sistema de Sensoriamento Remoto para Irrigação de Precisão

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: ____/____/____.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso (Orientador)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Adunias dos Santos Teixeira (Co-Orientador), Ph.D.
Universidade Federal do Ceará – UFC

Prof. Dr. Otacílio da Mota Almeida
Universidade Federal do Ceará – UFC

Prof.^a Ruth Pastôra Saraiva Leão, Ph.D.
Universidade Federal do Ceará – UFC

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

Dedico este trabalho a minha esposa, minha maior incentivadora na busca da realização profissional.

Agradecimentos

A Deus, pelo dom da vida, pela saúde, pela força e pela serenidade necessárias nos momentos mais difíceis;

Ao Prof. Dr. Giovanni Cordeiro, meu orientador, pelo direcionamento e indicação da área de estudo, pelo profissionalismo e orientação segura, pelos conhecimentos que tanto contribuíram para que este estudo se realizasse;

Ao Prof. Dr. Adunias Teixeira, meu co-orientador, pela acolhida em seu grupo de pesquisa, pela dedicação e empenho, pela experiência e ensinamentos transmitidos durante toda a trajetória no mestrado;

Aos meus pais, Antônio e Tânia, pela formação ética e moral com que me educaram, sempre com muita dedicação e amor;

Aos meus irmãos, Clenilton e Cleilton, pela amizade e incentivo;

À minha esposa Christiane, companheira de luta, que sempre me incentivou e colaborou em todas as etapas da minha vida acadêmica, organizando minha vida, cuidando dos problemas da família e aceitando minha ausência em muitos momentos;

Às minhas filhas, Bianca Tiane e Gabrielle, que me ensinaram o que é amar incondicionalmente, pelo carinho e pela compreensão nos momentos de ausência;

Ao meu sogro, Hudson, pela revisão final do texto, pelas conversas e produtivo intercâmbio de informações;

À minha sogra, Francisca Viana, exemplo de força e determinação;

Ao amigo Sérgio Daher, pelo incentivo, pela troca de idéias e pelos conhecimentos transmitidos tão essenciais na realização deste trabalho;

Aos amigos Firmino, Tadeu, Lúcio, Dimas, Alexandre, pela troca de experiências e apoio que sempre me deram durante a realização da pesquisa;

Aos professores do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará UFC, por terem contribuído de forma bastante significativa em meu crescimento intelectual e acadêmico;

Aos funcionários da secretaria de pós-graduação do curso de Engenharia Elétrica da UFC, pela atenção e presteza na orientação de assuntos acadêmicos;

A todas as pessoas queridas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conquista deste ideal;

À FUNCAP, pela concessão da bolsa de estudos;

Ao CNPq, pelo apoio financeiro ao projeto “Desenvolvimento de dispositivos de comunicação sem fio para sensores de umidade do solo aplicados em fruticultura irrigada” que viabilizou este trabalho.

*“ Depois que o podê celeste
Manda chuva no Nordeste
De Verde a terra se veste
E corre água em brobutão
A mata com seu verdume
E as fulô com seu perfume
Se enfeita de vaga-lume
Nas noite de iscuridão.”*

Patativa do Assaré.

Santos, C. C. “Sistema de monitoramento remoto de umidade e temperatura do solo para irrigação de Precisão”, Universidade Federal do Ceará – UFC, 2008, 105p.

Na região do Semi-Árido nordestino, há uma grande necessidade de economia de água e energia e os métodos de manejos da agricultura irrigada necessitam aplicar de forma precisa estes recursos. Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um sistema de monitoramento remoto de umidade e temperatura do solo, para uso em fruticultura irrigada, substituindo os métodos manuais de coleta de dados por sistemas automáticos em tempo real. O trabalho integra as tecnologias de sensores, circuitos integrados e comunicação sem fio tratando do desenvolvimento de módulos remotos dotados de sensores de umidade e temperatura, rádio, bateria e unidade de processamento com funcionamento autônomo. Os módulos remotos foram projetados para serem distribuídos dentro de áreas cultivadas. Um protocolo de comunicação entre os módulos remotos e o módulo mestre foi modelado em Rede de Petri Colorida (RPC) e o protótipo montado e testado em laboratório e no campo, em uma área produtora de melancia. Os testes revelaram a praticidade na instalação e redistribuição dos módulos. O layout do módulo de comunicações foi bem sucedido por ter alcançado as distâncias satisfatórias (142 metros de alcance) com um *baud rate* de 38.4 kbit/s dentro de uma área real de cultivo e, também, por ser capaz de multiplicar seu alcance através do uso de rotinas de comunicação cooperativa. Obteve-se como resultado desse projeto a concepção de uma plataforma de baixo custo (quando comparada com as soluções industriais disponíveis no comércio) capaz de atender ao pesquisador e ser acessível ao produtor rural que deseja reduzir seus custos com água, energia e insumos, investindo em tecnologias de suporte. A evolução dos trabalhos nesse segmento aponta para um futuro, em que, o sensoriamento remoto tornar-se-á uma ferramenta usada em uma grande variedade de aplicações, acrescentando novas formas de se observar os fenômenos que regem a natureza e sua relação com o homem.

Palavras-chave: Automação da Irrigação, Rede de Sensores Sem fio, Agricultura de Precisão, Rede de Petri Colorida.

Santos, C. C. "Remote monitoring system of humidity and ground temperature for Precision irrigation", Universidade Federal do Ceará – UFC, 2008, 105p.

In the region of the northeastern semiarid, there is a great necessity of water and energy economy and the agriculture handling methods necessitate to put into effect these resources in a more accurate way. In this work the development of a remote monitoring system of humidity and ground temperature, to use in irrigated horticultures, substituting the manual harvest methods of automatic systems in real time is presented. The work integrates the technologies related to sensors, integrated circuits and cordless communication concerning the development of remote modules which have sensors of humidity, temperature, radio, battery and processing unit with autonomous operation. The remote modules were projected to be distributed inside the cultivated areas. A communication protocol between the remote modules and the master module was modeled in Colored Petri Nets (CPN) and the prototype was set up and tested in a laboratory and in the fields, in a producer watermelon area. The tests revealed the practicality in the installation and redistribution of the modules. The module communications layout was well succeeded once that it achieved the satisfactory distances (a reach of 142 meters) with a *baud rate* of 38.4 kbits/s inside a cultivation area and also because it is capable to multiply its reach through the use of cooperative communication routines. The accomplished results of this project were the creation of a low cost platform (compared to the industrial solutions available in the commerce) capable of attending the researcher and be accessible to the rural producer who aims to reduce his costs with water, energy and inputs, investing in support technologies. The evolution of the works on this segment points to a future in which the remote sensors will become a tool used in a large variety of applications, adding new ways to observe the phenomena which govern nature and its relationship with men.

Key-words: Irrigation's Automation, Cordless Sensors Nets, Precision Agriculture, Colored Petrin Nets.

Sumário

	página
RESUMO.....	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE TABELAS.....	xv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS – SIMBOLOGIA LATINA.....	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS – SIMBOLOGIA GREGA.....	xviii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	19
1.1. Água para Irrigação.....	19
1.2. Controle da Irrigação.....	21
1.3. Justificativa.....	22
1.4. Objetivos Específicos do Trabalho	24
1.5. Estrutura da Dissertação.....	25
CAPÍTULO 2 – CONCEITOS BÁSICOS	27
2.1. Sistemas Embarcados.....	27
2.2. Modelagem de Sistemas.....	28
2.2.1. Redes de Petri	28
2.2.2. Conceitos de Redes de Petri	29
2.2.3. Estrutura de uma Rede de Petri.....	31
2.2.4. Redes de Petri Coloridas.....	31
2.2.5. A Ferramenta CPNTools	32
2.3. Redes de Sensores Sem Fio.....	33
2.3.1. Comunicação Sem Fio.....	34
2.3.2. Modulação	36
2.3.3. Arquitetura do Módulo Sensor.....	38
2.3.4. Classificação das Redes de Sensores Sem Fio.....	39
2.3.5. Protocolos da Camada de Aplicação.....	42

2.3.6. Protocolos de Comunicação	43
2.4. Agricultura de Precisão	45
2.4.1. Irrigação de Precisão	46
2.4.2. Medidas para Irrigação de Precisão	47
2.4.2.1. Medição da Umidade do Solo.....	47
2.4.2.2. Medição da Temperatura do Solo	49
2.5. Conclusões do Capítulo.....	49
CAPÍTULO 3 – MODELAGEM	50
3.1. Introdução.....	50
3.2. Modelagem dos Módulos	52
3.3. Conclusões do Capítulo.....	61
CAPÍTULO 4 – MONTAGEM EXPERIMENTAL	62
4.1. Características do Sistema Proposto	62
4.2. Características do Sistema Proposto	62
4.3. Testes Preliminares	64
4.4. Projeto do Protótipo	67
4.5. Montagem do Protótipo.....	68
4.6. Montagem dos Módulos	68
4.6.1. O Módulo Base (Mestre)	68
4.6.2. Elaboração da Fonte do Módulo Mestre	69
4.6.3. Comunicação Serial com o Computador.....	70
4.6.4. Conexão com o Transceptor	70
4.6.5. O Microcontrolador.....	71
4.7. Os Módulos Remotos	71
4.7.1. Elaboração da Fonte do Módulo Remoto.....	72
4.7.2. Alimentação do Microcontrolador	73
4.7.3. Unidade de Sensores	75
4.8. Interface de Controle e Aquisição de Dados	78
4.8.1. Dados Coletados	80
4.9. Conclusões do Capítulo.....	82

CAPÍTULO 5 – ESTUDO DE CASO	84
5.1. Condições de Teste	84
5.2. Configuração dos Módulos Remotos	87
5.3. Instalação dos Módulos	93
5.4. Testes Realizados no Laboratório	89
5.5. Testes Realizados no Campo	92
5.6. Avaliação de Eficiência do Sistema	100
5.7. Conclusões do Capítulo	102
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	103
6.1. Conclusão	103
6.2. Trabalhos Futuros	105
BIBLIOGRAFIA	101
ANEXO A – Características Básicas do Microcontrolador PIC18F4550	112
ANEXO B – Características Básicas do Transceptor Laipac TRW 2.4GHZ	115
ANEXO C – Rotina para teste do Módulo Transceptor	118
ANEXO D – Características do Sensor Capacitivo de Umidade	124
ANEXO E – Características do Sensor de Temperatura LM35	126

Lista de Figuras

Figura 2.1.	Dinâmica da habilitação e disparo de uma transição.....	30
Figura 2.2.	Modulação FSK.....	37
Figura 2.3.	Modulação GFSK.....	37
Figura 2.4.	Arquitetura Básica.....	38
Figura 2.5.	Comunicação <i>multihop</i> dos sensores na rede.....	41
Figura 2.6.	Técnica de roteamento usando Implosão.....	44
Figura 2.7.	Técnica de roteamento usando Superposição.....	44
Figura 2.8.	Tensiômetro com vacuômetro para medir a tensão da água no solo.....	48
Figura 2.9.	Desenho esquemático do tensiômetro eletrônico desenvolvido em Coelho (2003) e utilizado para aplicação no dispositivo de calibração. Figura obtida de Coelho (2003).....	48
Figura 3.1.	Diagrama em Blocos do Sistema de Aquisição.....	52
Figura 3.2.	Lista dos conjunto de cores, variáveis e funções.....	55
Figura 3.3.	Estados Operacionais do Módulo Remoto.....	56
Figura 3.4.	Sub-Rede de Ativação e Desativação do módulo remoto.....	57
Figura 3.5.	Transição do modo “ <i>Sleep</i> ”.	58
Figura 3.6.	Verificação dos pacotes recebidos na modelagem da recepção.....	58
Figura 3.7.	Etapa de transmissão de dados e registro.....	59
Figura 3.8.	Modelagem <i>Sink Nodo</i>	60
Figura 3.9.	Modelagem de registro dos módulos remotos.....	61
Figura 4.1.	Bancada de Trabalho com as placas de desenvolvimento.....	64
Figura 4.2.	Rádio transceptor da Laipac, modelo TRF2.4 GHz vista de frente (a) e vista do conector (b).....	64
Figura 4.3.	(a) Placa de desenvolvimento do AT89S8252 (b) com o módulo LAIPAC.....	65
Figura 4.4.	Interface Transceptor com o Microcontrolador 89S8252/ 5V.....	66
Figura 4.5.	Diagrama Módulo Mestre.....	68
Figura 4.6.	O circuito da fonte do módulo base (mestre).....	68
Figura 4.7.	Esquema de ligação do MAX232.....	69
Figura 4.8.	Gráfico da frequência em função da tensão de alimentação.....	70
Figura 4.9.	Diagrama em blocos do módulo sensor.....	71
Figura 4.10.	Esquema da fonte dos módulos remotos.....	72

Figura 4.11.	Esquema de alimentação do Microcontrolador no módulo sensor.	73
Figura 4.12.	Esquema do circuito de controle dos sensores.....	75
Figura 4.13.	(a) Placa de sensores e (b) placa de processamento dos módulos remotos.....	75
Figura 4.14.	Placas do módulo remoto montadas e conectadas.....	76
Figura 4.15.	Arranjo das placas do sensor capacitivo.....	76
Figura 4.16.	Montagem Interna do Módulo Remoto.....	77
Figura 4.17.	Tela Principal da Interface.....	79
Figura 4.18.	Dados de temperatura e tensão da bateria coletados.....	80
Figura 5.1.	Esquema da malha hidráulica e distribuição dos sensores na área irrigada.....	84
Figura 5.2.	Resposta de comunicação com o módulo mestre.....	85
Figura 5.3.	Parâmetros de configuração dos módulos remotos.....	85
Figura 5.4.	Resposta com a configuração do módulo remoto.....	86
Figura 5.5.	Gráfico do comportamento hídrico do solo.....	87
Figura 5.6.	Instalação do módulo com sensores de umidade no solo.....	88
Figura 5.7.	Variação da tensão da bateria do módulo remoto com dois sensores de umidade.....	89
Figura 5.8.	Distribuição geográfica dos módulos no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola.....	90
Figura 5.9.	Os módulos organizados em séries.....	91
Figura 5.10.	Rotas alternativas para módulos fora do alcance do máster.....	91
Figura 5.11.	Topologia com módulos líderes.....	92
Figura 5.12.	Instalação do módulo por um operário da propriedade.....	93
Figura 5.13.	Módulo mestre instalado na casa da propriedade com visibilidade da plantação.....	94
Figura 5.14.	Aumento de umidade monitorado pelo sensor A, instalado a 5 cm da superfície.....	97
Figura 5.15.	Aumento de umidade monitorado pelo sensor B, instalado a 15 cm da superfície.....	97
Figura 6.1.	Página inicial do Data-Sheet (MICROCHIP, 2004).	113
Figura 6.2.	Diagrama de pinos (MICROCHIP, 2004).....	114
Figura 6.3.	Características do dispositivo (MICROCHIP, 2004).....	114
Figura 6.4.	Diagrama em blocos do PIC18F4455/4550.	115
Figura 6.5.	Especificações gerais do transceptor TRW 2.4GHz.	116
Figura 6.6.	Especificações elétricas do transceptor TRW 2.4GHz.....	117

Figura 6.7.	Dimensões do módulo TRF-2.4 GHz.....	118
Figura 6.8.	Sensor instalado em tubo de PVC de 2” preenchido com solo (SILVA, 2005).	125
Figura 6.9.	Resposta do sensor a variação de umidade do solo (SILVA, 2005).	125
Figura 6.10.	Três sensores capacitivos foram instalados em caixa contendo solo e suspenso em estrutura de ferro para ser calibrada usando célula de carga (SILVA, 2005).	126
Figura 6.11.	Monitoramento da variação dos sensores capacitivos, da massa de água no solo e da temperatura Ambiente (SILVA, 2005).	126
Figura 6.12.	Página inicial do Data-Sheet (National Semiconductor, 1999).....	127
Figura 6.13.1.	Características elétricas do LM35 (National Semiconductor, 1999).....	128
Figura 6.13.2.	Características elétricas do LM35 (National Semiconductor, 1999).....	129

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Bandas de Transmissão.....	35
Tabela 4.1. Especificações do Microcontrolador PIC18F4550.....	64
Tabela 5.1. Coordenadas e distâncias da distribuição dos módulos em <i>mult-hope</i>	89
Tabela 5.2. Dados coletas pelo módulo 30 na linha 20, sensores A (5 cm)e B (15cm)	94

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANATEL	- Agência Nacional de Telecomunicações
AU	- <i>University of Aarhus</i>
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
ETc	- Evapotranspiração de uma cultura
FAO	- <i>Food and Agriculture Organization</i>
FETRAECE	- Federação dos Agricultores do Estado do Ceará
FSK	- <i>Frequency Shift Keying</i>
GFSK	- <i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>
GPS	- Sistema de Posicionamento Global
IICA	- Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura
ISM	- <i>Industrial Scientific and Medical</i>
ISO	- <i>International Organization for Standardization</i>
ITU	- <i>International Telecommunication Union</i>
LCD	- Display de Cristal Líquido
LEMA	- Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola
ONU	- Organização das Nações Unidas
PC	- Computador Pessoal
RF	- Rádio Frequência
RP	- Rede de Petri
RPC	- Rede de Petri Coloridas
RS232	- Protocolo de comunicação serial
RSSF	- Rede de Sensores Sem Fio
RTC	- <i>Real Time Clock</i>
TRW	- Transmissor e Receptor Wireless
UTM	- <i>Universal Transverse Mercator</i>

Lista de Símbolos – Simbologia Latina

V_{th}	- tensão do equivalente Thevenin (V)
f	- frequência de coleta de dados
ν	- frequência da onda eletromagnética
N_b	- número de baterias
P_{med}	- potência média (W)
Q	- vazão (m^3/s)
Q_b	- capacidade de uma bateria (A.h)
R_e	- resistência equivalente (circuito série) (Ω)
t	- tempo
T	- período (s)
v	- velocidade
\bar{v}	- velocidade média

Lista de Símbolos – Simbologia Grega

- λ - comprimento de onda
- π - constante igual à 3,14159265359
- ΔA - Intervalo do módulo acordado
- ΔD - Intervalo de dormência (modo *sleep*)
- ΔD_1 - Intervalo de dormência menor que ΔD
- c - velocidade da luz ($2,997792458 \cdot 10^8$ m/s)
- Ψ_m - Potencial matricial do solo

Capítulo 1

Introdução

1.1. Água para Irrigação

A crescente escassez de água devido ao crescimento populacional e ao desenvolvimento econômico, é agravada em virtude da desigualdade social e da falta de manejo no seu uso. Este quadro tem criado desafios, principalmente para os países em desenvolvimento, no sentido de encontrarem novas soluções para a gestão dos seus recursos hídricos. Sendo assim, nas últimas décadas a forma de se tratar a água assumiu novas perspectivas, sendo reconhecida amplamente, tanto como um bem social e um problema técnico de suprimento, quanto um recurso econômico.

Um recurso econômico que por definição é um bem escasso e, enquanto recurso escasso será insuficiente ao suprimento de uma demanda ilimitada. Portanto, é necessário tomar certas decisões quanto à sua alocação, baseando-se, entre outras coisas, em princípios econômicos, administrativos ou políticos (KEMPER, 1997).

De acordo com o Relatório das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos, o mundo precisará de 55% a mais de alimentos em 2030, o que vai resultar em uma crescente demanda de água para irrigação, que já utiliza cerca de 70% de toda a água para consumo humano (ONU, 2006). Como se espera, até 2030, haverá um aumento na população mundial de aproximadamente 8.100 milhões de pessoas, e será, portanto, necessário destinar 14% a mais de água doce em uso agrícola, para manter o ritmo crescente na oferta de alimentos (FAO, 2007).

A produtividade agrícola no Estado do Ceará conta ainda com uma agricultura rudimentar de baixo nível tecnológico fazendo uso, em apenas 0,96% dos seus estabelecimentos, de equipamento mecanizado (tratores), 12,5% utilizam fertilizantes, cerca de 3,8% recorrem a assistência técnica e 28,4% usam energia elétrica (FETRAECE). Estes dados revelam o despreparo da região para a crescente demanda de alimentos estimada para o futuro. Entretanto, existe um largo consenso no meio acadêmico e entre especialistas, tanto na área governamental como não governamental, sobre a alta capacidade de produção, de trabalho e renda na agricultura do estado.

Alguns fatores estão sendo favoráveis à instalação de um ambiente mais adequado ao desenvolvimento rural do Ceará. A essa observação atribui-se a construção de diversas barragens e perímetros irrigados, projetos públicos cuja infra-estrutura é projetada, implantada e operada, direta ou indiretamente, sob a responsabilidade do poder público. Estes são predominantemente destinados à exploração agrícola, onde são beneficiados lotes familiares e empresariais.

O Banco Mundial (1993 apud KEMPER, 1997) observa que o aproveitamento da água tem sido caracterizado historicamente pela oferta, ou seja, quando a água se tornou escassa, buscou-se uma solução para o aumento da oferta através de novos investimentos na infra-estrutura. Quando a água e recursos financeiros são escassos, a gestão da demanda entra em ação para controlar e, quando necessário, diminuir o consumo da água.

As leis brasileiras que dispõem sobre o meio ambiente e sobre os recursos hídricos propõem o uso de instrumentos *regulatórios* e *econômicos* para a gestão ambiental, com objetivo de buscar acomodar as demandas econômicas, sociais e ambientais por água em níveis sustentáveis, de modo que permita a convivência dos usos atuais e futuros da água sem conflito.

Na grande maioria das áreas agrícolas do Estado ainda não é realizado um planejamento de irrigação, o que ajudaria na elaboração dos projetos políticos e administrativos de suprimento às demandas hídricas de uma determinada região produtora. Em decorrência disso, o desperdício e a carência tornam-se extremos bem próximos, dentro de uma escassa reserva de recursos.

A utilização da água na irrigação está se elevando cada vez mais para acompanhar o alto índice de produção e dessa forma suprir a crescente demanda alimentar da população. O manejo da irrigação permite identificar, com base em critérios técnicos, o momento de início das irrigações, bem como definir a quantidade de água adequada para atender às necessidades hídricas da cultura. A eficiência do uso da água na irrigação depende, entre outros fatores, do conhecimento aprimorado da necessidade hídrica, que pode ser estimada pela diferença entre a necessidade das culturas, determinada pela sua evapotranspiração, e o suprimento natural através da precipitação efetiva. A precipitação efetiva definida por HAYES & BUELL e citados por DASTANE (1974) é tratada como a precipitação total menos as perdas por escoamento superficial, percolação profunda e a variação de umidade no solo.

1.2. Controle da Irrigação

A aplicação de ciência e tecnologia em agricultura irrigada no Brasil foi avaliada por Neale e Merley, professores da Universidade Estadual de Utah em 1989, quando atuaram como consultores do IICA/EMBRAPA, afirmando que a pesquisa irrigada no Brasil ainda está na sua fase inicial de desenvolvimento e complementaram concluindo que as técnicas de irrigação constituem novidades e nunca tiveram tradição nessa área (SOUSA, 2000).

Tate (1990) afirma que o conceito de uso eficiente da água inclui qualquer medida que reduza a quantidade de água que se utiliza por unidade de qualquer atividade e favoreça sua manutenção. O uso eficiente da água é básico para o desenvolvimento sustentável, que implica no uso dos recursos naturais pela população atual mantendo a disponibilidade para as gerações futuras. Observa ainda, que a importância do uso eficiente da água varia entre regiões e épocas.

Irrigação é uma técnica que necessita de suporte científico no desenvolvimento de programas ambientalmente sustentáveis. Nestes programas é necessário o suporte tecnológico, a fim de evitar grandes problemas como a salinização dos solos e águas, já observados no Estado do Ceará (SOUSA, 2000).

Os experimentos instalados no campo da agricultura irrigada devem prover as informações necessárias para a administração da irrigação, fazendo uso de equipamentos constituídos de condições sensoriais e capazes de detectar grandes variações nos solos quanto à fertilidade, capacidade de retenção de água, taxa de infiltração, taxa de evaporação, relevo, densidade, condutividade hidráulica, temperatura, além das características climáticas da região, quanto à distribuição das precipitações pluviométricas.

Os sistemas de irrigação disponíveis no mercado, tais como Pivô Central, Aspersão, Microaspersão e Gotejamento, dependendo do plano de manutenção, podem apresentar coeficientes de uniformidade diferentes em maior ou menor escala, dos valores estabelecidos pelos fabricantes. A mão-de-obra que maneja esses sistemas, também tem as suas peculiaridades de eficiência, em função do treinamento recebido.

Por essas razões, a condução de um experimento que busca monitorar as relações entre os recursos necessários na produção e os efetivos volumes aplicados, sempre apresenta erros de vários tipos: erros de experimentação, erros de observação, erros de medida, tendenciosidade e heterogeneidade das unidades experimentais.

A fim de reduzir a incidência dos erros e seus efeitos na interpretação dos resultados obtidos, se vê a necessidade da utilização de novas técnicas instrumentais, capazes de gerar grandes quantidades de dados em pequenos intervalos de tempo, removendo a imprecisão dos métodos manuais, e auto-aferindo os seus fatores de erro susceptíveis às variáveis atemporais.

A instrumentação está cada vez mais presente na agricultura atuando na melhoria dos processos de administração e manejo das atividades agrícolas, oferecendo ferramentas mais sofisticadas para pesquisa, adaptando novas metodologias para medir, controlar, avaliar, processar, transferir e armazenar parâmetros físicos, químicos e biológicos essenciais à sustentabilidade da agricultura brasileira (EMBRAPA, 2008).

1.3. Justificativa

A necessidade de incrementar a eficiência da irrigação nas regiões áridas e semi-áridas tem tornado imprescindível sua programação racional e por isso tem-se investido muito esforço no desenvolvimento de novas tecnologias que permitam o maior conhecimento dos fenômenos da natureza envolvendo água, solo e planta. Contudo, os métodos, ainda manuais de medir, prever ou estimar, direta ou indiretamente, omitem muitas informações sobre o movimento da água no solo, como exemplo: o seu processo de difusão e infiltração, variáveis que necessitam de um grande número de dados para um maior conhecimento.

A aquisição manual de dados no campo ou laboratório pode ser um processo demorado, intensivo e de mão-de-obra cara. O tempo exigido para aquisição de dados em campo não inclui só o tempo gasto na coleta de medidas, mas também o tempo empregado para o deslocamento ao campo de trabalho. O tempo disponível para a coleta de medidas pode resultar em menos leituras de dados ou em mais trabalho, caso deseje-se garantir uma maior precisão com um maior número de leituras. As lacunas em uma série de dados podem ser oriundas de indisponibilidade de mão de obra, por exemplo, durante fins de semana ou feriados, ou quando o local de coleta de dados não pode ser alcançado, devido às condições de tempo.

A melhoria no processo de irrigação exige a avaliação de muitas variáveis físicas relativas às características do solo, clima e necessidades hídricas da cultura explorada. A determinação da hora exata de irrigar e a sua menor duração definem critérios os quais exigem instrumentação para coleta de dados em tempo real. O conteúdo de água no solo pode ser determinado diretamente através do método gravimétrico ou estimado pela determinação

de algumas relações de propriedade do solo, como por exemplo: resistência elétrica, constante dielétrica, potencial de água no solo e espalhamento de nêutrons. Novas tecnologias, aplicadas na produção agrícola, oferecem as ferramentas necessárias para tornar real o uso dos conceitos de irrigação de precisão, dentre estas, a utilização de transdutores mais práticos tem realizado um importante papel.

As redes de sensores sem fio (LOUREIRO et al. 2003) são um recurso inovador, aplicado em diversas áreas de controle e monitoração, como resultado da integração das tecnologias de sensores, circuitos integrados e redes sem fio, constituindo-se uma ferramenta com recursos cada vez mais práticos e possuindo características estruturais compatíveis com o uso no campo agrícola. Atualmente esse tipo de sistema pode ser desenvolvido com a utilização de componentes acessíveis, de fácil operação e baixo custo, tornando-se uma alternativa compatível com a necessidade de monitoramento e automatização do controle da irrigação.

O objetivo deste trabalho é somar-se ao conjunto de técnicas científicas e instrumentais que permitem um maior conhecimento das variáveis físicas regentes do processo produtivo agrícola. A partir do conhecimento de tais variáveis, pode-se partir para o controle automatizado dos déficits e excedentes. O importante a considerar é o espaço rural, no qual vêm sendo empregados diversos esforços como apoio ao trabalho agrícola. O controle poderá ser aplicado em escalas tão precisas quanto as novas tecnologias permitam. A esse desenvolvimento tratamos como agricultura de precisão.

Os meios técnicos e científicos que podem modificar o ambiente em que vive o agricultor cearense, se necessário, já existem, mas precisam ultrapassar as barreiras econômicas e de conhecimento. Estes meios são um elo necessário para propiciar um melhor aproveitamento de seus recursos e maior rendimento do trabalho, facilitando a integração sustentável do homem nordestino à sua região. Para tanto, devem contribuir as pesquisas e o trabalho de nossas instituições acadêmicas objetivando o desenvolvimento do nosso estado e garantindo melhores condições de vida ao trabalhador do campo.

1.4. Objetivos Específicos do Trabalho

O presente trabalho se propõe ao desenvolvimento de uma rede de sensores sem fio aplicada em culturas agrícolas para aquisição de dados de umidade e temperatura do solo. O sistema faz uso de sensores capacitivos desenvolvidos e validados no Departamento de Irrigação e Drenagem do curso de Engenharia Agrícola da UFC. Conectado a um computador pessoal, o sistema gera planilhas de dados para serem utilizadas na implementação do controle de automação em bombas e válvulas da malha hidráulica de um sistema de irrigação pressurizado. Os objetivos específicos tratados no trabalho são:

1. Desenvolvimento do hardware para integração dos sensores de temperatura e umidade;
2. Desenvolvimento de um módulo microcontrolado, dotado de transceptor que servirá como uma ferramenta de pesquisa usada pelo departamento de irrigação e drenagem no desenvolvimento de algoritmos de controle e tomada de decisão.
3. Desenvolvimento e teste de um protocolo de comunicação entre módulos;
4. Teste do sistema através do monitoramento do conteúdo de água no solo utilizando sensores capacitivos que será feito em várias profundidades de acordo com a característica radicular de uma cultura de interesse produtivo da região.

1.5. Estrutura da Dissertação

Este documento é constituído de seis capítulos. No Capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos sobre sistemas embarcados, redes de Petri Coloridas e a ferramenta *CPNTools* utilizada na modelagem e simulação das etapas do desenvolvimento do trabalho. Ainda no Capítulo 2 é apresentada uma abordagem sobre Redes de Sensores sem Fio – RSSF – seu uso e classificação.

No Capítulo 3 são mostradas as modelagens utilizando Redes de Petri coloridas (RPC) com etapas da modelagem do sistema de transmissão e do tratamento dos dados. Neste capítulo é tratado, também, o trabalho de transição pós-modelagem onde os blocos são testados em placas de desenvolvimento, metodologia adotada para a depuração e teste dos dispositivos.

No Capítulo 4 são apresentadas as características do sistema proposto, os testes preliminares realizados para definição dos componentes do projeto, a organização em blocos do sistema e a montagem do protótipo com a descrição do hardware desenvolvido, abordando os aspectos característicos exigidos à aplicação.

No Capítulo 5 é apresentado um estudo de caso que ilustra como foi testado o sistema proposto neste trabalho, e como pode ser utilizado em aplicações de monitoramento remoto em condições reais de campo. A visualização do desempenho dos módulos é relacionada às condições da área de testes com suas dimensões, obstáculos e características da cultura monitorada.

No Capítulo 6, constam as conclusões e a proposta de trabalhos futuros relacionados ao desenvolvimento do protótipo e novas aplicações para os módulos desenvolvidos.

Capítulo 2

Conceitos Básicos

2.1. Sistemas Embarcados

Sistema embarcado, como definido por Michael Barr (1999), é uma combinação de hardware e software, e outras partes adicionais mecânicas, eletromecânicas ou hidráulicas, projetadas para execução de tarefas específicas. Eles estão presentes dentro de equipamentos como máquinas elétricas de café, máquinas fotográficas, telefones celulares, caixas eletrônicas e demais equipamentos que executem algum processo de trabalho. Ao contrário dos computadores pessoais capazes de executar inúmeras tarefas, eles são projetados para funções específicas, como controlar a injeção de combustível em um carro ou controlar um forno de microondas.

A utilização de Microprocessadores e Microcontroladores permitem a automatização de diversas tarefas manuais. Muitos microcontroladores têm sido desenvolvidos de modo a atender aplicações específicas, que exijam um pequeno conjunto de funções e que não necessitem trabalhar com funções matemáticas avançadas.

A evolução dos microcontroladores foi promovida a partir de duas tendências (PEATMAN, 2003). Uma das tendências é a procura por meios mais baratos de introduzir inteligência nos produtos. Quando um produto é fabricado em milhares de unidades, pequenas diferenças nos valores dos componentes determinam a sua seleção para um projeto. Outra tendência está relacionada ao desenvolvimento de soluções para aplicações que envolvam processamentos em intervalos críticos de tempo, como os controles utilizados na engenharia automobilística. Esta tendência levou ao desenvolvimento de arquiteturas de microcontroladores mais sofisticados e rápidos. A tecnologia dos microchips tem evoluído e aumentado sua linha de opções, partindo dos mais simples e baratos para uma nova geração de componentes dotados de mais recursos. O objetivo desta evolução é atender as necessidades de um crescente conjunto de aplicações.

O desenvolvimento de Sistemas embarcados tem adquirido recursos de muita funcionalidade, com o mínimo de hardware e software, agregando muita praticidade aos projetos e tornando viável a implementação de uma grande variedade de equipamentos (LEE,

HSIUNG, 2004). Os nodos¹ sensores podem ser vistos como um caso especial resultante desta evolução.

2.2. Modelagem de Sistemas

A integração das tecnologias computacionais, produtos de consumo e recursos de comunicação faz com que o software, em sistemas embarcados, represente até 70% de toda a funcionalidade de um sistema.

O desenvolvimento de um projeto passa por várias etapas, dentre as quais estão incluídas a síntese do software, a verificação, geração do código e emulação do sistema. A fim de evitar erros no projeto se faz necessário o uso de modelos e aproximações formais. Devido à crescente demanda por mais funcionalidades nos sistemas embarcados, a implementação de todo o hardware torna-se mais longa e cara, inviabilizando rápidas modificações e futuras atualizações.

Existe, portanto, a necessidade de ferramentas que automatizem as tarefas tediosas no desenvolvimento de softwares embarcados, onde ainda há uma falta de metodologia adotada na organização dos projetos.

Para atingir um dos objetivos deste trabalho buscou-se uma ferramenta de modelagem constituindo um ambiente favorável à análise e verificação formal de sistemas tais como, protocolos de comunicação, concepção de *software* em tempo real, processamento distribuído, gerenciamento de base de dados, interface homem-máquina e multimídia. A ferramenta escolhida, além da modelagem, deveria ser capaz de simular o funcionamento do sistema e validá-lo.

2.2.1. Redes de Petri

As redes de Petri (MURATA, 1989), por apresentarem noção de estados e de regras para mudanças dos mesmos, possibilitam a representação de sistemas reais de forma bastante satisfatória. Também podem ser vistas como uma técnica de especificação formal com métodos robustos para análise qualitativa e quantitativa (ARCOVERDE, 2004) de tais sistemas. Desde o seu surgimento, têm se apresentado como uma metodologia prática o bastante para ser utilizada em aplicações que envolvem desde computação distribuída, como

¹ Neste texto os termos nó, nodo e módulo sensor são considerados sinônimos.

na engenharia elétrica, eletrônica, protocolos de comunicação, sistemas de controle, ou qualquer outra aplicação que envolva um fluxo de trabalho.

Carl Adam Petri propôs em sua tese de doutorado o modelo de Rede de Petri intitulado Comunicação com Autômatos. O propósito era modelar a comunicação entre autômatos representando sistemas a eventos discretos (REISIG, 1985).

As primeiras aplicações de redes de Petri, segundo Heuser (1991), ocorreram em 1968, no projeto norte-americano *Information System Theory*, da *Applied Data Research, Inc.* Neste trabalho foi ilustrado como as redes de Petri poderiam ser utilizadas na análise e modelagem de sistemas com componentes concorrentes.

Uma rede de Petri pode ser apresentada como um modelo formal, através de três métodos (CARDOSO et al, 1997):

- Um grafo com dois tipos de nós e um comportamento dinâmico;
- Um conjunto de matrizes de inteiros positivos ou nulos cujo comportamento dinâmico é descrito por um sistema linear;
- Um sistema de regras baseado numa representação do conhecimento sob a forma condição/evento.

2.2.2. Conceitos de Redes de Petri (RP)

Uma rede de Petri é definida estruturalmente como uma composição de alguns elementos, como descritos a seguir:

- **Lugares:** são utilizados para modelar componentes passivos dos sistemas. O conceito de lugar está relacionado ao conceito de variáveis de estado. Podem conter ou não marcações, ou fichas (*tokens*), geralmente associadas a um determinado recurso do sistema. Lugares são representados graficamente como uma circunferência.

- **Transições ou ações:** são usadas para modelar os eventos que ocorrem em um sistema, componentes ativos dos sistemas. As transições são capazes de mudar o estado do sistema, e são representadas graficamente como uma barra ou retângulo.

- **Arcos ou relações de fluxo:** utilizados para especificar como se dá a transformação de um estado em outro pela ocorrência das ações no sistema. Podem ter um valor associado, chamado “peso”, que, quando omitido, assume o valor 1. Possuem como representação gráfica uma seta.

O comportamento dinâmico de uma RP é dado pela “regra de disparo”. Uma transição pode ser disparada, ou seja, permitir a ocorrência de um evento, se para todos os

lugares de entrada (lugares que possuem arcos partindo deles em direção à transição) conectados à transição, a quantidade de fichas existentes nos lugares de entrada é maior ou igual ao peso dos arcos que ligam os lugares à transição. Quando esta condição é atendida, a transição é considerada como “habilitada”.

O peso dos arcos associados determina o numero de fichas exigidas pela transição a ser habilitada, como também indica a quantidade de fichas geradas nos lugares de saída após o disparo da transição. Esta atividade de transferência de fichas é considerada como uma ação atômica e pode ser visualizada nas Figuras 2.1(a) e 2.1(b):

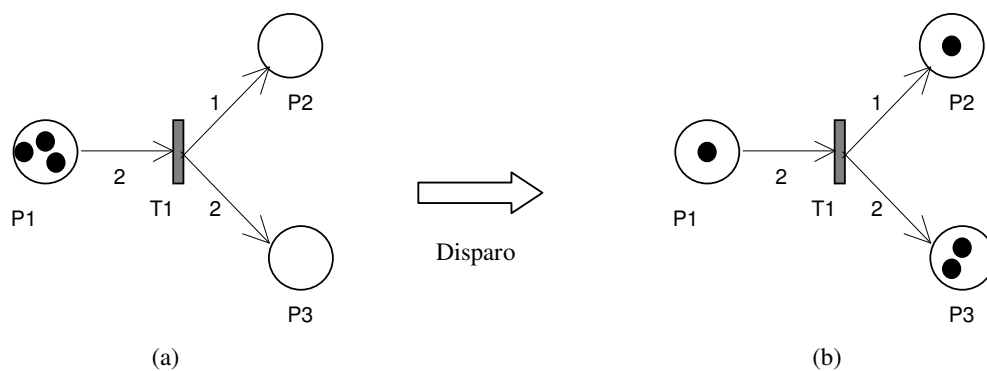


Figura 2.1. Dinâmica da habilitação e disparo de uma transição.

Observando a Figura 2.1(a) podemos ver que a transição T1 está habilitada, pois a quantidade de *fichas* no lugar de entrada P1 (3) é superior ao peso do arco (2) que liga P1 a T1. Ao ocorrer o disparo da transição T1, duas *fichas*, de acordo com o peso (2) do arco, são removidas do lugar P1 e novas *fichas* são geradas nos lugares P2 e P3. A quantidade de *fichas* produzidas nos lugares de saída também é proporcional ao peso dos arcos de ligação que os une à transição disparada, como pode ser visualizada na Figura 2.1(b).

2.2.3. A estrutura de uma Rede de Petri

Redes de Petri são constituídas de uma estrutura N e uma marcação M . A estrutura N consiste em uma quádrupla, $N = (P, T, A, W)$, em que:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – é um conjunto finito de lugares;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ – é um conjunto finito de transições;

$A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ – é um conjunto finito de arcos;

$W : F \rightarrow N^*$ – é uma função peso, em que N^* denota os números naturais excluindo o zero.

$P \cap T = \emptyset$

$P \cup T \neq \emptyset$

A função $M : P \rightarrow N^*$ define uma Marcação em uma RP onde N denota os números naturais e M_0 é a marcação inicial. Segundo sua definição formal, uma RP é uma quádrupla, $PN = (P, T, A, W, M_0)$, em que (P, T, A, W) é a estrutura da rede e M_0 é a marcação inicial.

2.2.4. Redes de Petri Coloridas

As Redes de Petri são uma excelente ferramenta na modelagem de sistemas, entretanto à medida que se necessita tratar com sistemas mais complexos, onde existem várias etapas distintas com processos semelhantes como os protocolos de comunicação, por exemplo, elas passam a apresentar limitações. Nestes casos, ao se utilizar Redes de Petri, o projetista tem duas opções, segundo (CARDOSO, 1997):

- Modelar o funcionamento geral, sem a necessidade de identificar cada processo, mas somente seu número.
- Modelar, particularmente, cada um dos processos envolvidos no sistema, modelando a interação existente entre eles, o que implica, na maioria das vezes, em desdobrar o modelo que representa o funcionamento geral.

No primeiro caso fica evidente a falta de precisão do modelo criado, pois muito do comportamento do sistema é perdido, tendo algumas de suas características desconsideradas. No segundo caso, porém, pode-se chegar a um modelo demasiadamente

grande e complexo para ser entendido. Além de se tornar oneroso de trabalhar, tanto pela dimensão da rede quanto pelo número de interações necessárias.

A busca de soluções para tal problema resultou em vários modelos propostos, mais ou menos próximos, de extensões das Redes de Petri. O foco de tais proposições firmase no fato de tornar a ficha uma variável de informação (CARDOSO, 1997). A estas abordagens dá-se o nome de Redes de Petri de Alto Nível. Tais redes terão sua notação gráfica e definições padronizadas na norma ISO 15909.

Redes de Petri Coloridas, descritas em (JENSEN, 1990), recebem este nome porque as fichas contêm dados capazes de distinguir uma das outras – ao contrário das Redes de Petri, as quais tratavam as fichas todas como iguais.

As redes de Petri coloridas têm sido utilizadas em várias áreas do conhecimento, tais como, modelagem e análise formal de protocolos de transporte de dados (MARTINS, 2003), modelagem e análise de processos de negócio (PÁDUA et al. 2004), sistemas embarcados (LEE, HSIUNG, 2004), protocolos de gerenciamento dinâmico em redes de sensores sem fio (SOUSA et al., 2007) e outros.

2.2.5. A Ferramenta *CPNTools*

CPNTools é uma ferramenta para edição de Redes de Petri, utilizada na modelagem, análise e simulação de Redes de Petri Coloridas (AU, 2008). O uso de sua interface gráfica é baseado em técnicas avançadas, como *toolglasses*, ou seja, os mesmos recursos da barra de ferramentas, porém associados aos objetos na área de trabalho, menus de marcações, e uma interação bi-manual. Campos de diálogo da ferramenta proporcionam um acompanhamento contextual com mensagens de erro que indicam as relações entre os elementos e suas funções. Os recursos da ferramenta de verificação de sintaxe do código auxiliam a geração da rede, ao mesmo tempo, que está sendo construída. Um simulador rápido e eficiente manipula a rede tanto passo-a-passo quanto de maneira cronometrada. Assim a modelagem pode ser analisada por completo e parcialmente. Espaço de estado pode ser gerado e analisado. Funções de estado e relatórios dos espaços contêm informações sobre várias propriedades da rede modelada.

2.3. Redes de Sensores Sem Fio (RSSF)

Redes de Sensores Sem Fio (LOUREIRO et al. 2003) são redes ad-hoc (sem controle centralizado e sem topologia pré-determinada) formadas por nós sensores capazes de comunicar-se mutuamente e que possam servir como roteadores de seus nós vizinhos, possuindo pelo menos um ponto de comunicação denominado estação-base. Redes de sensores funcionam de forma comunitária, formando células de influência dentro das áreas monitoradas, criando links de roteamento com os seus terminais vizinhos e conseguindo assim a cobertura de grandes áreas com baixo consumo de energia.

O objetivo principal destas redes é coletar informação. Normalmente, sem infraestrutura pré-estabelecida, como ocorre com redes de celulares ou redes locais sem fio, essas redes podem ser formadas por milhares de pequenos dispositivos (RUIZ, 2003), aqui denominados nós ou nodos, dotados de capacidade de armazenamento, processamento, comunicação e sensoriamento. Esses nós têm fortes restrições quanto à memória, capacidade de processamento e principalmente energia, sendo desejável que possuam mecanismos de auto-configuração e adaptação devido a problemas como falha de comunicação e perda de nós.

Cada nó pode ser equipado com diferentes tipos de sensores, dada a natureza diversa de suas aplicações, tais como: temperatura, pressão, umidade, radiação, acústica e outros.

Nós sensores podem ser usados para monitoramento contínuo, detecção de eventos aleatórios, localização e controle local de atuadores. As áreas de aplicação das RSSFs são proeminentes e se destacam a área militar, meio-ambiente, agricultura, saúde, automação residencial, monitoramento de estruturas e aplicações comerciais.

As RSSFs podem auxiliar no controle de incêndios florestais, pois ao ser estabelecida em uma área de incêndio os nós fontes podem disseminar dados como temperatura, pressão barométrica, umidade, luz e velocidade do vento e que, utilizados em conjunto com dados sobre vegetação e topografia do local, poderiam prever como seria o avanço do fogo. Existem ainda diversas aplicações de monitoramento do meio-ambiente, tais como o rastreamento do movimento dos pássaros, pequenos animais, e insetos, monitoramento das condições ambientais que afetam as colheitas, o plantio e a irrigação gerando o suporte para a agricultura de precisão, pesquisas meteorológicas ou geofísicas; detecção de inundação; mapeamento da bio-complexidade ambiental e estudo da poluição.

Energia é um recurso limitado neste de tipo de aplicação. Cada nó sensor possui uma fonte de energia, que em geral é uma bateria com capacidade limitada. É praticamente inviável recarregar manualmente todas as baterias, uma vez que RSSFs podem ser compostas por milhares de nós sensores e, além disso, estes podem estar em locais inacessíveis (ou ambientes isolados em laboratório). Dessa forma, o foco de projeto em RSSFs, do hardware aos protocolos de redes, é o uso eficiente de energia.

2.3.1. Comunicação Sem Fio

Nodos sensores comunicam-se mutuamente e também com uma estação base usando um canal de comunicação sem fios. As arquiteturas de comunicação para potências muito baixas, como é o caso das redes de sensores, apresentam como tecnologias compatíveis as baseadas em RF (Rádio Frequência) e as óticas, cada qual com suas vantagens e desvantagens. As desvantagens das técnicas de RF caracterizam-se pela incompatibilidade das altas frequências de comunicação de um nó sensor com a necessidade de baixo consumo de energia da bateria. A tecnologia ótica impõe outras dificuldades como a necessidade de visada direta com seu módulo parceiro e a exigência de condições atmosféricas favoráveis.

A solução utilizada no desenvolvimento deste trabalho fez uso da rádio frequência investindo em protocolos que tenham o compromisso de relacionar a limitação de energia com o alcance e banda de frequência. Agindo de forma racionalizada, o processo de comunicação é realizado em rajadas de curta duração, mantendo-se os nodos da rede, na maior parte do tempo, em estado de dormência.

A Comunicação em RF é baseada em ondas eletromagnéticas. O espectro de rádio frequência é subdividido em diversas regiões conhecidas como bandas ou faixa de ondas. Estas faixas são nomeadas conforme a frequências de operação.

As bandas de alta frequência são empregadas em serviços cuja taxa de transferência deve ser elevada. As de baixa frequência, por outro lado, são aplicadas em situações que não exigem grandes velocidades de transmissão. As bandas que operam em UHF (*Ultra High Frequency*), SHF (*Super High Frequency*) e EHF (*Extremely High Frequency*) são conhecidas por microondas devido ao pequeno comprimento de onda utilizados nessas bandas. Elas são comumente usadas em telefones celulares, redes sem fio, satélites, radares e outros equipamentos.

Um dos desafios mais importantes em dispositivos de comunicações RF é a adequação do tamanho da antena à faixa de frequência utilizada. Também é necessário reduzir o consumo de energia com modulação, filtragem, demodulação, e demais funções inerentes ao

processo de comunicação. As vantagens da comunicação RF são sua facilidade de uso, integralidade, e boa oferta de opções comerciais, o que a torna uma plataforma ideal para uso em nodos sensores.

Vários aspectos afetam o consumo de energia de um rádio, o tipo de modulação, a taxa de dados, e a potência de transmissão. Em geral, os rádios podem operar em três modos distintos: transmissão, recepção e inativo (*mode sleep*). A maioria dos rádios que operam no modo inativo consegue bons resultados quanto ao consumo de energia, enquanto que o modo recepção possui um consumo muito semelhante ao da transmissão.

O ITU (*International Telecommunication Union*) é a organização internacional que regula e padroniza as telecomunicações e as transmissões via rádio. Na Tabela 2.1 são mostradas algumas bandas de transmissão e suas respectivas áreas de aplicação, em destaque para a faixa de operação dos módulos transceptores escolhidos para o desenvolvimento do trabalho.

Tabela 2.1. Bandas de Transmissão

Nome	Sigla (Inglês)	Banda ITU	Faixa	Comprimento de Onda	Utilização
Extremamente Baixa	ELF	1	3–30 Hz	100.000-10.000 km	
Super Baixa	SLF	2	30–300 Hz	10.000–1000 km	
Ultra Baixa	ULF	3	300–3000 Hz	1000–100 km	
Muito Baixa	VLF	4	3–30 kHz	100–10 km	Comunicação Militar
Baixa	LF	5	30–300 kHz	10-1 km	Navegação, sinais de hora, sinais AM
Média	MF	6	300–3000 kHz	1 km–100 m	Sinais AM
Alta	HF	7	3–30 MHz	100–10 m	Ondas curtas e rádio Amador
Muito Alta	VHF	8	30–300 MHz	10–1 m	FM e teledifusão
Ultra Alta	UHF	9	300–3000 MHz	1m–100 mm	Teledifusão e WLAN
Super Alta	SHF	10	3– 30 GHz	100–10 mm	Dispositivos de Microondas
Extremamente Alta	EHF	11	30–300 GHz	10–1 mm	

O rádio escolhido para este projeto opera em banda de frequência ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*) de 2.4GHz com espalhamento espectral e não necessita de licença da Anatel.

Os equipamentos que fazem uso de radiofrequências ou faixas de radiofrequências sem autorização da Anatel, em atividades que não envolvam prestação de serviços e que sirvam para uso próprio são chamados de equipamentos de "radiação restrita" aprovados pela Resolução Anatel 365/2004. O regulamento sobre equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita define os casos em que a autorização de uso de radiofrequência não é

exigida. Alguns exemplos de equipamentos que podem ser considerados como de radiação restrita, desde que atendam aos parâmetros estabelecidos na resolução: microfone sem fio, controle remoto, telefone sem fio, rede de computadores sem fio.

O módulo transceptor escolhido foi selecionado mediante suas características de alcance de distâncias satisfatórias, taxa de transmissão de dados compatível com as variáveis a serem monitoradas, baixo consumo de energia, disponibilidade no comércio e o baixo custo de compra.

2.3.2. Modulação

Em um sistema de transmissão de dados, digital ou analógico, é necessário utilizar formas de inserir as informações úteis em um sinal de Rádio Frequência, chamado de onda portadora, que servirá de transporte da informação de um ponto a outro. As formas de inserir informação em um sinal são chamadas de modulação, e permitem que as informações alcancem seus destinos, codificadas em parâmetros de amplitude, frequência ou fase da portadora.

As modulações digitais codificam os bits de sinal de informação através de símbolos. A modulação mapeia todas as possíveis seqüências de bits de um comprimento pré-estabelecido em um símbolo distinto. O conjunto de símbolos gerados por uma modulação passa a ser chamado de constelação e cada tipo de modulação produz uma constelação de símbolos diferentes. Os símbolos resultantes da conversão das seqüências de bits de um sinal de informação serão consecutivamente transmitidos através de uma onda portadora. Existem várias técnicas de modulação, no entanto os transceptores utilizados neste trabalho utilizam a modulação GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*).

Na modulação GFSK os dados são codificados na forma de variações de frequência em uma portadora, de maneira similar à modulação FSK, ou seja, atribuindo frequências diferentes para a portadora em função do bit transmitido. Portanto, quando um bit 0 é transmitido, a portadora assume uma frequência pré-fixada a um bit 0 durante seu período de duração. Quando um bit 1 é transmitido, a frequência da portadora é alterada para um valor relacionado a um bit 1 da mesma forma, permanecendo nesta frequência durante o período de duração de 1 bit, de acordo com o mostrado na Figura. 2.2.

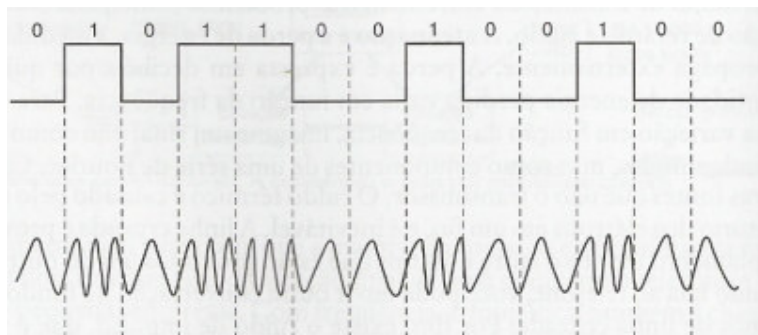


Figura 2.2. Modulação FSK.

Na modulação GFSK, pode ser utilizado o mesmo modulador para a modulação FSK. Entretanto, os pulsos antes de entrarem no modulador, passam por um filtro gaussiano, de modo a reduzir a largura espectral dos mesmos. O filtro gaussiano funciona como um formatador de pulso que atua sobre o sinal para suavizar a transição entre os valores dos pulsos. Na Figura 2.3 é ilustrada a transformação dos pulsos após passarem pelo filtro gaussiano.



A Figura 2.3. Modulação GFSK

2.3.3. Arquitetura de um Módulo Sensor

Na Figura 2.4 pode ser visto os componentes básicos que constituem um módulo sensor: transceptor, memória, processador, sensor e bateria. O reduzido tamanho do módulo sensor acarreta como conseqüências a redução no tamanho e na capacidade de seus componentes. Para se ter uma idéia dos valores envolvidos, os processadores são geralmente de oito bits com frequência de 10 MHz, os transceptores têm largura de banda de 1 kbit/s a 1 Mbit/s e a capacidade de memória pode ser de 128 kbytes a 1 Mbyte.

Existe hoje, uma grande variedade de tecnologias em fabricação de baterias e, conseqüentemente, de consumo de energia. A escolha da bateria a ser utilizada nos nodos sensores deve considerar dentre suas características, o volume, condições de temperatura e carga inicial.

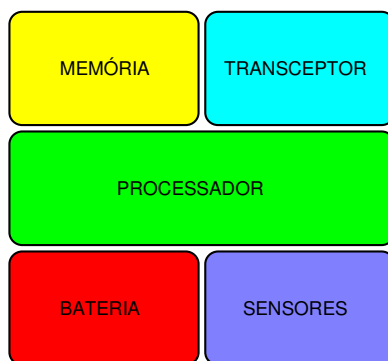


Figura 2.4. Arquitetura Básica de um Módulo Sensor.

O sensor é o dispositivo responsável pelo monitoramento físico de um fenômeno ambiental, produzindo uma resposta mensurável a mudanças em condições físicas, tais como temperatura, campo magnético e luz (MEGERIAN et al. 2002).

Dispositivos sensores geralmente têm características físicas e funcionais diferentes. Assim, numerosos modelos de complexidade variável podem ser desenvolvidos para atender as necessidades das aplicações e características do dispositivo sensor.

Além do sensor, o nodo da rede apresenta recursos de processamento, armazenamento de informações, fonte de energia e interface de comunicação.

Muitos dos dispositivos sensores compartilham duas características:

- (i) Diminuição da sensibilidade de monitoramento com o aumento da distância do sensor à fonte a ser monitorada;

- (ii) Melhoria de sua precisão com o tempo de sensoriamento, ou seja, tempo de exposição.

Em alguns casos, os nodos de uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) desempenham a função de modificar valores do meio, a fim de corrigir falhas e controlar o objeto monitorado. Nesse caso, têm-se os módulos atuadores.

2.3.4. Classificação de Rede de Sensores Sem Fio

Segundo a taxonomia de Tilak (2002) as redes podem ser classificadas por suas características quanto ao fenômeno, o observador e o tipo de sensor utilizado.

As redes de sensores podem ser classificadas em relação ao envio de dados requeridos conforme interesse da aplicação (observador). Elas podem ser classificadas em orientada a evento, contínua, iniciada pelo observador e híbrida. Estes modelos definem a geração de dados e o tráfego da aplicação e estão descritos a seguir.

No **modelo contínuo** os sensores comunicam seus dados continuamente numa taxa pré-especificada.

No **modelo de dados orientado a eventos** os sensores enviam informações somente quando um evento de interesse pré-estabelecido ocorre. Neste caso, o observador está interessado na ocorrência de um fenômeno específico ou conjunto de fenômenos, servindo em muitos casos de alarme de temperatura, radiação, gases tóxicos, movimento e outros.

No **modelo iniciado pelo observador** os sensores só enviam seus resultados quando requisitados diretamente pelo observador, ou indiretamente através de outros sensores.

No **modelo híbrido** a rede possui ferramentas para os três modos de envio, permitindo uma maior flexibilidade ao usuário administrador da rede.

Para a rede desenvolvida neste trabalho foi modelado e implementado um protocolo de comunicação do tipo híbrido, de forma a permitir a administração e consulta dos módulos remotos considerando as limitações quanto à disponibilidade de nós e sua distribuição dentro dos limites da área de monitoramento. Com esse objetivo algumas funções foram modeladas para o uso do *broadcast*, *multicast* e *multihop*. No *multicast* a transmissão da informação é feita simultaneamente para múltiplos destinatários enquanto que no *broadcast* a informação é enviada pra todos os pontos de uma rede. O *multihop* trata da comunicação via rádios em múltiplos saltos, ou seja, a informação é repassada do módulo que

a originou para módulos vizinhos seguindo uma rota até uma estação base distante (SILVA, 2005).

As redes podem ser caracterizadas como redes estáticas e redes dinâmicas. Nas redes estáticas não há movimento entre os sensores, o observador e o fenômeno, tendo como exemplo de aplicação um grupo de sensores para monitorar temperatura em ambiente definido.

Em redes dinâmicas, os sensores e o observador possuem maior mobilidade. Sempre que qualquer sensor em um link de roteamento com o observador se move, a comunicação pode falhar, sendo assim, o nodo sensor ou a estação observadora deve procurar estabelecer uma nova rota de comunicação.

Nas redes estáticas, algoritmos locais são utilizados e os sensores passam a se comunicar com os nós de sua localidade, dentro de sua célula de alcance. Um nó é qualificado para transmitir um relatório de dados dos seus vizinhos para o observador. Neste tipo de topologia podem ser implementados vários níveis de hierarquia. Este tipo de configuração em algoritmo estende a vida útil de uma rede de sensores porque apresenta um compromisso para a computação local, otimizando o consumo de acordo com a aplicação. Em redes estáticas é necessária a configuração inicial de uma infra-estrutura, para definição do caminho entre o observador e os sensores com o tráfego restante, exclusivamente para comunicação da aplicação.

Uma rede de sensores sem fio pode ser classificada quanto a sua arquitetura, podendo utilizar dois critérios. A rede pode ser classificada basicamente como proativa ou reativa. Em redes proativas, os sensores trocam informações periodicamente. Nas redes reativas, o fluxo de informações só ocorre quando determinados eventos monitorados são detectados. Ainda quanto à arquitetura, uma rede pode ser classificada em plana ou hierárquica. Nas redes planas, todos os sensores são semelhantes, e nas redes hierárquicas, os sensores possuem características diferentes, como a capacidade de processamento, o que faz com que a arquitetura da rede leve estas diferenças em conta. Assim, um sensor com maior poder computacional pode ser mais utilizado que outros no sensoriamento e no roteamento.

O posicionamento dos nós na rede pode ser aleatório, pois podem ser desenvolvidos algoritmos que tornem os nós capazes de se comunicar e se organizar. A comunicação entre os nós é realizada até que o nó chamado de *sink*² "sorvedouro" receba as informações. Este nó se comunica com o gerenciador de tarefas através de uma conexão serial

² Neste texto, os termos nó sorvedouro, módulo Máster ou módulo Mestre devem ser considerados como sinônimos que representam o módulo líder conectado ao computador.

com o computador central. Esta arquitetura baseada em múltiplos saltos é chamada de *multihop*. A arquitetura *multihop* permite a redução do consumo de energia na transmissão, pois evita que todos os nós da rede precisem transmitir informações diretamente ao nó sorvedouro (*sink*).

Na Figura 2.5 é mostrada uma arquitetura básica, implementada com módulos sensores, tendo como sorvedouro um módulo mestre conectado a um computador. O computador conectado a uma rede de topologia fixa torna-se responsável por disponibilizar a outros terminais, via internet, os dados coletados na área monitorada.

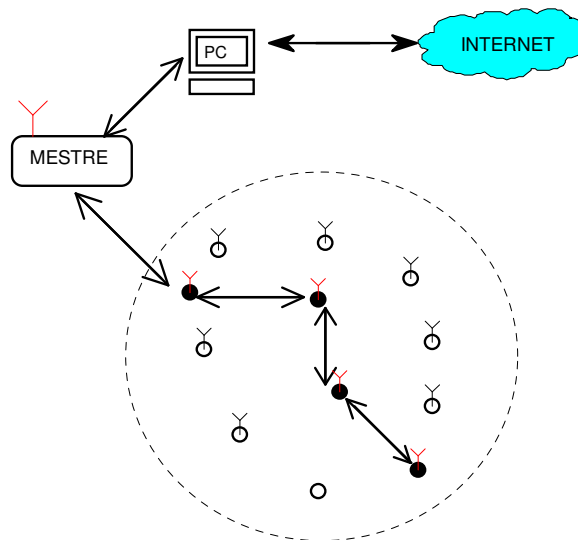


Figura 2.5. Comunicação *multihop* dos sensores na rede.

Os nós da rede e o nó sorvedouro utilizam um conjunto de protocolos, que podem ser organizados em camadas. As camadas de protocolos utilizadas pelos nós assemelham-se aos modelos de referência OSI e TCP/IP, são elas: camada física, de enlace, de rede, de transporte e de aplicação. Nas camadas, através da definição de planos de gerenciamento independentes, é feita a administração do consumo de energia, da mobilidade e das tarefas de monitoramento e controle.

2.3.5. Protocolos da Camada de Aplicação

As aplicações de uma rede de sensores sem fio variam para cada caso (ROCHA, 2008). Entre os protocolos atualmente definidos para a camada de aplicação, destacam-se:

Sensor Management Protocol (SMP): As principais tarefas realizadas por este protocolo é o agrupamento dos sensores, gerenciamento da mobilidade de sensores, ativando ou desativando, re-configuração da rede após alterações no funcionamento dos nós, execução de tarefas relacionadas à segurança.

Task Assignment and Data Advertisement Protocol (TADAP): Neste protocolo é feita a distribuição dos serviços de interesse do usuário entre os sensores. O usuário pode definir como deve ser informado da ocorrência de determinados eventos, ou do estado dos sensores em determinado intervalo de tempo, ou especificar um conjunto de sensores para uma tarefa distinta. Neste protocolo o usuário também obtém informações quanto a disponibilidade de novos dados em algum sensor da rede.

Sensor Query and Data Dissemination Protocol (SQDDP): A interface do usuário com a rede para realizar consultas nos sensores é implementada por este protocolo. As consultas podem não limitar-se a um sensor específico, mas a um conjunto de sensores em uma região específica que se deseja monitorar, ou ao conjunto de sensores dotados de transdutores capazes de fornecer os dados desejados. As consultas também podem referir-se a um evento específico. Uma aplicação que utiliza este protocolo é o SCTL (*Sensor Query and Task Language*), que define três eventos para a aplicação: *receive*, utilizado quando um sensor detecta a ocorrência de um determinado evento; *every*, que define eventos periódicos, informando o estado do sensor a intervalos regulares de tempo; e *expire*, que corresponde a eventos que ocorrem após a expiração de um timer.

2.3.6. Protocolos de Comunicação

Na rede de sensores, é o protocolo o responsável por gerenciar a comunicação entre os nós sensores e o mundo exterior, através do nodo mestre. A eficiência desse protocolo de comunicação pode variar de acordo com a topologia da rede escolhida e sua aplicação. O protocolo é fundamental, pois uma simples mudança nas características de distribuição dos nós na rede pode prejudicar todo o sistema, exigindo que o protocolo gerencie inteligentemente a comunicação, para evitar e corrigir congestionamento, devendo balancear a carga de informação gerada, de modo a atender as exigências do processo de

medição escolhido. O gerenciamento pode ocorrer de diversas formas, desde a redução da emissão de relatórios por cada nó à desativação de nós, incluindo a agregação de informações.

Os protocolos podem ser classificados de acordo com a arquitetura da rede, conforme apresentado a seguir (ROCHA, 2008):

Protocolos de roteamento para redes planas, tais como:

- *Directed Diffusion*;
- *SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation)*;
- *SAR (Sequential Assignment Routing)*;
- *Adaptive Local Routing Cooperative Signal Processing: Noncoherent Processing e Coherent Processing*;

Protocolos de roteamento para redes hierárquicas, tais como:

- *LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)*;
- *CBRP (Cluster Based Routing Protocol)*;
- *TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Network)*;
- *APTEEN (Adaptive Periodic Threshold-sensitive Energy Efficient Network)*;
- *PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information System)*;

A classificação do roteamento da rede pode ser feita como cooperativa e *multihop*. Os protocolos *multihop*, utilizados em redes *ad hoc*, não são bons para redes de sensores, embora possam ser utilizados por alguns motivos, dentre eles: baixa carga das baterias e disponibilidade de memória. O tamanho da tabela de roteamento pode ficar grande, dependendo de quanto cresce a rede. Não suportam disseminação cooperativa, não suportando fusão nem agregação de dados.

Uma técnica de roteamento muito usada em redes de sensores é o *flooding*, baseada em *broadcast*. O princípio é que os nós-sensores propagam sua informação para todos seus vizinhos em *broadcast*. Seus vizinhos fazem a mesma coisa com a informação até que esta atinja o sorvedouro. A técnica mostra-se imune a mudanças na topologia da rede, mas pode causar um alto *overhead*. Neste caso surgem dois problemas bastante comuns da utilização do *flooding*: a implosão e a superposição.

A implosão, ilustrada na Figura 2.6, ocorre quando um nó recebe a mesma mensagem, advinda de dois nodos vizinhos distintos.

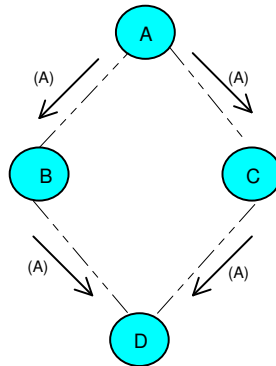


Figura 2.6. Técnica de roteamento usando Implosão.

Na superposição, dois nós que atuam num mesmo campo de observação, acabam detectando um mesmo evento ocorrido em uma área superposta (área r na Figura 2.7) e propagando ambos a mesma mensagem para um vizinho em comum.

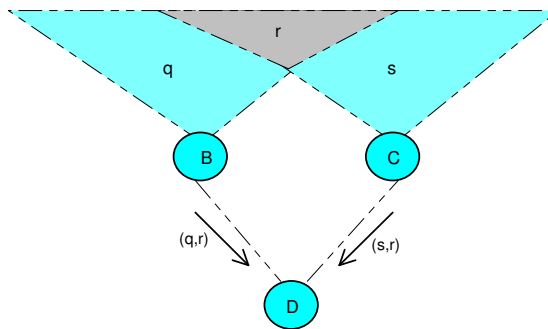


Figura 2.7. Técnica de roteamento usando Superposição

A diferença entre as duas situações implosão e superposição, refere-se a sobrecarga da rede causada por redundância, no primeiro caso o protocolo utilizado não tem critérios para o uso de rotas ocorrendo o envio dos pacotes de dados por mais de uma rota. No segundo caso os sensores atuam dentro de uma mesma área de alcance, detectado o mesmo fenômeno, ou seja, leituras enviadas, que não implicam em acréscimo de informação.

No *flooding* não há ponderações quanto à condição de energia em um respectivo nó. Os sensores podem, ao invés de usar broadcast, se comunicar diretamente com o sorvedouro através de roteamento *multihop* ou com um *cluster-head* (líder do grupo), usando mensagem *unicast*. Para reduzir o overhead, pode-se utilizar agregação de dados.

O sistema de sensoriamento desenvolvido neste trabalho aceita as várias técnicas de roteamento apresentadas anteriormente. Para tanto, basta que o operador defina a mais apropriada para a aplicação desejada.

2.4. Agricultura de Precisão

Agricultura de precisão é um conceito também conhecido como "*site specific management*" (TSCHIEDEL, FERREIRA, 2002) e propõe um conjunto de novas tecnologias direcionadas ao manejo da agricultura comercial em larga e média escala. Essa nova tecnologia de precisão envolve, por exemplo: computadores pessoais, sistemas de informações geográficas, sistema de localização por satélite, dispositivos de sensoriamento remoto, controle automatizado de máquinas e sistemas de comunicação. A integração desta tecnologia conecta sistemas de posicionamento global (GPS) com imagens das áreas de cultivo, permitindo que outros equipamentos ligados a este sistema possam ser configurados dinamicamente para controlar os índices de produtividade, níveis da irrigação e aplicação de agrotóxicos. Essa tendência consiste de um ciclo de análise da produtividade do solo (através da colheita), análise das características do solo (através de coleta de amostras ou imagens de satélite), controle preciso da aplicação de insumos e correção da terra e controle preciso da plantação e da aplicação de agrotóxicos.

A agricultura de precisão é um método de administração detalhada do solo e da cultura para adequar às diferentes condições encontradas em cada parcela de uma lavoura oferecendo como resultados maior produção e menores custos de insumos ao aperfeiçoar o manejo da agricultura, reduzindo desperdícios e custo com mão-de-obra. As vantagens de sua aplicação são muitas: (a) economia de insumos agrícolas (agrotóxicos, fertilizantes, corretivos agrícolas); (b) aumento da produtividade (devido à otimização dos recursos do solo) e (c) sustentabilidade da terra em longo prazo, explorando-a de forma otimizada e não depredadora (MOLIN, 2003).

Segundo Sonka (1997), são três os componentes que compõem a agricultura de precisão: aquisição de dados, análise dos dados e definição de uma política de administração.

Segundo Moran (1996) as informações dos sensores de solo são necessárias para avaliação dos dados de composição do solo, compactação, textura, resíduos da colheita, nitrato de nitrogênio, salinidade, número de sementes, e outros. Parâmetros que, juntamente com o pH do solo e a quantidade de fósforo e potássio, não podem ser levantados por mapeamentos via satélite ou avião, tornando necessário a utilização de sensores de solo.

Sensores usados na medição da condutividade do solo, nível de nutrientes e mistura do solo já foram desenvolvidos, juntamente com sensores de quantidade de nitrato. Em 1996 na universidade de Purdue, na cidade de Indiana, nos Estados Unidos, já se falavam em sensores em tempo real para textura e compactação do solo, entretanto estes métodos ainda não são realidade no Brasil.

A utilização das RSSF (Redes de Sensores sem Fio) neste contexto é bastante motivadora. Pesquisas recentes têm adotado o uso das RSSF como um mecanismo de pesquisa na administração de fazendas de pecuária, com sensores de umidade do solo, sensores de peso animal, leitores de etiquetas eletrônicas, sensores de movimento (GPS, bússola e acelerômetros) e atuadores de estímulos (auditivo, vibração e choque elétrico moderado) nos animais (SIKKA, 2006).

Outro segmento de pesquisa que adota as RSSF é visto em Ramanathan (2006), onde a qualidade da água utilizada para irrigação da agricultura é analisada mediante o monitoramento de uma rede distribuída.

Os avanços na tecnologia da informação e sua aplicação na produção agrícola estão gerando uma mudança no processo de administração rural. Segundo Sonka (1997), essas alterações relacionadas ao avanço das tecnologias, hoje é realidade, pois em 1997 sensores e atuadores não tinham os preços interessantes nem a disponibilidade que se têm atualmente. Contudo o futuro previsto ainda não é a realidade de muitas regiões, considerando que os processos necessários a estas aplicações, não estão totalmente aprimorados e muito do que é encontrado nas propriedades mais modernas são esforços isolados na tentativa de melhorar alguma parte da cadeia produtiva.

2.4.1. Irrigação de Precisão

Os modernos sistemas de irrigação utilizam tecnologia que reduzem o consumo de água, mas o equipamento sozinho é somente parte da solução. A eficiência no uso da água significa aplicar exatamente a quantidade ditada por condições do solo e do cultivo.

Mesmo com um sistema de irrigação de alto rendimento, (como exemplo o por gotejamento), muitos agricultores fazem uma irrigação excessiva baseada no conhecimento empírico ou no uso de simples controladores. O excesso provoca desperdício de energia, água e fertilizantes. As técnicas, mais eficientes de manejo da irrigação, prometem redução de perdas em até 70%. O uso de dispositivos dotados de inteligência computacional e servidos de sensores precisos torna viável o acompanhamento de todo o ciclo de uma cultura, ajustando dinamicamente os critérios de eficiência na definição do melhor momento de irrigar, em cada

setor do campo e a lâmina de água necessária para suprir de forma adequada as reais necessidades do cultivo.

A automatização do manejo de sistemas de irrigação proporciona mais recursos ao produtor na gerência da água de irrigação, provendo ferramentas para a elaboração de programas práticos de manejo, monitoramento da água do solo e readequação do sistema à lâmina de irrigação necessária.

2.4.2. Medidas para Irrigação de Precisão

Na irrigação ocorrem perdas de água no solo através de escoamento, infiltração, evaporação e transpiração das plantas.

As variáveis que afetam a perda de água no solo são: radiação solar, umidade do ar, temperatura, tipo de solo e vento. A temperatura do solo é considerada um fator importante que está relacionado ao sistema solo-planta-atmosfera, atuando diretamente em processos bioquímicos, participando no controle da atividade microbiana e nas reações químicas no interior do solo. Nas plantas o processo de germinação e emergência, bem como o crescimento das raízes é grandemente influenciado pela temperatura do solo.

2.4.2.1. Medição da Umidade do Solo

O acompanhamento da umidade no solo vem sendo realizado atualmente através do potencial matricial (ψ_m) do solo. A medição é realizada manualmente com tensiômetros, do tipo exposto na Figura 2.8., instalados a profundidades variadas de acordo com a característica radicular da planta irrigada.

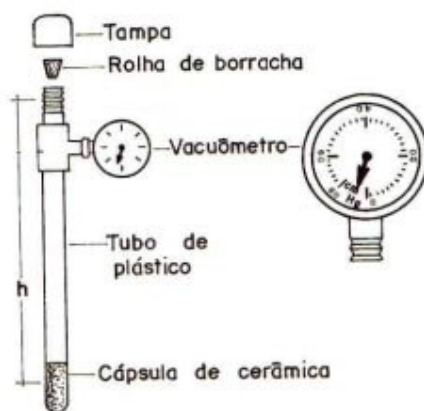


Figura 2.8. Tensiômetro com vacuômetro para medir a tensão da água no solo. (Foto: Silveira & Stone, 1994)

Existem também os tensiômetros eletrônicos, a base de transdutores piezoelétricos, os quais medem o diferencial entre a pressão atmosférica e a medida por uma coluna d'água instalada junto a uma cápsula porosa no solo, em um esquema similar ao tensiômetro manual da Figura 2.8. Entretanto, por necessitar de uma coluna d'água para equilíbrio das tensões medidas no solo, esse método exige certa manutenção a cada leitura do dispositivo. O sensor do tensiômetro eletrônico pode ser visto na Figura 2.9.

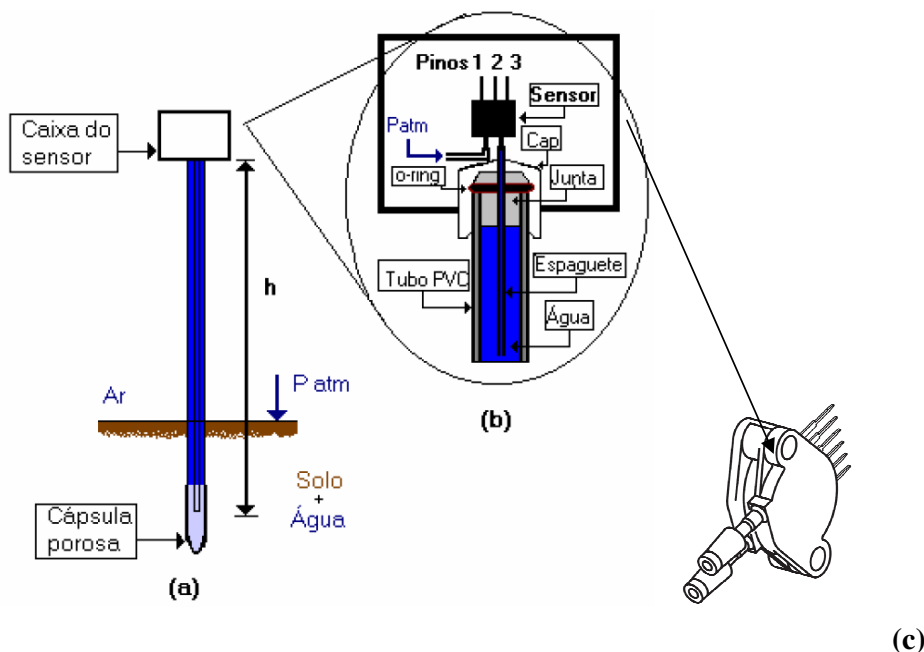


Figura 2.9. Desenho esquemático do tensiômetro eletrônico desenvolvido em Coelho (2003) e utilizado para aplicação no dispositivo de calibração. Figura obtida de Coelho (2003).

Este trabalho propõe a utilização dos sensores capacitivos no monitoramento da umidade do solo. Por serem sensores independentes de recursos hidrostáticos consegue-se maior autonomia no sistema, permitindo a automatização da coleta de dados. A utilização deste tipo de sensor está diretamente relacionada com o tipo de cultura que se pretende irrigar. Outros fatores que se deve levar em consideração no uso dos sensores é o tipo de solo e clima da região explorada. A textura do solo definirá qual sua capacidade de retenção de água, velocidade de infiltração e fluxo por capilaridade. O clima será o responsável pelo coeficiente de evapotranspiração, ou seja, a quantidade de água perdida com a evaporação e com a transpiração da planta. Portanto é de posse dessas variáveis que se determina a quantidade de sensores por ponto de observação.

Segundo Werkhoven (1991) a utilização dos sensores capacitivos parte da premissa de que a constante dielétrica da água é relativamente alta, se comparada com a do

solo seco, resultando em uma variação considerável da constante dielétrica do solo à medida que a sua umidade é alterada (YODER et al., 1998). Desta forma, inserindo-se um sensor tipo capacitivo no solo, o material que separa as placas do sensor entrará em equilíbrio hidráulico com o solo, modificando sua constituição e, conseqüentemente, sua constante dielétrica. Como a capacitância de um determinado capacitor é diretamente proporcional à constante dielétrica do material que separa suas placas, então é também proporcional à umidade deste material o qual, por sua vez, está hidraulicamente equilibrado com o solo. As placas podem ser inseridas diretamente no solo, fazendo do material que as separa o seu dielétrico, medindo-se então, diretamente, a capacitância cuja constante dielétrica é a do próprio solo na umidade em que se encontra.

2.4.2.2. Medição da Temperatura do Solo

A temperatura é uma grandeza importante e que deve ser incluída nas análises dos sensores capacitivos, quando se pretende avaliar a sua resposta. De acordo com Andrade (2001), a temperatura pode afetar significativamente o desempenho do sensor capacitivo.

Segundo Silva (2005), acréscimos na temperatura causam redução de frequência no sensor capacitivo, efeito gerado pela variação da constante dielétrica do solo e dos valores dos componentes passivos (resistores e capacitores) do sensor.

No entanto, Silva (2005), ressalta que a temperatura não chega a alterar a calibração dos sensores capacitivos. A variação da resposta do sensor capacitivo, no solo, com temperaturas oscilando entre 27,6°C a 31,6°C, ao longo do dia, é na ordem de 1,2 %. A utilização de sensores de temperatura, encapsulados junto com os de umidade, provê as condições para o sistema de tratamento dos dados corrigir as variações de frequências, causadas pela temperatura.

2.5. Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foram tratados os temas principais que formam a base de conhecimento para o desenvolvimento deste trabalho. O tópico de sistemas embarcados expôs o quanto a tecnologia dos microcontroladores está integrada ao cotidiano das atividades econômicas, domésticas e de lazer. Estes sistemas compactos, com recursos de memória e processamento, trabalhando sob o comando de rotinas embarcadas oferecem interfaces mais práticas entre o homem e as máquinas agregando maior flexibilidade aos dispositivos eletrônicos que comumente encontrados em residências, empresas e indústrias.

O desenvolvimento de novos sistemas traz desafios a projetistas e pesquisadores e surgem desde as primeiras etapas, do processo de consolidação das idéias a elaboração e constituição dos primeiros protótipos. As metodologias aplicadas no trabalho devem ponderar os recursos e o tempo empregado, variáveis que podem ser decisivas para o sucesso ou fracasso de um projeto. As diversas tomadas de decisão na elaboração dos procedimentos de trabalho, desenvolvimento de *softwares e hardware* contam atualmente com boa quantidade de simuladores que facilitam o trabalho de desenvolvimento. Entretanto, a aplicação desses recursos na dinâmica de trabalho ainda está no início, conforme citado no trabalho de Lee e Hsiung (2004) *Embedded Software Synthesis and Prototypin*.

As vantagens na utilização de ferramentas eficazes de modelagem são muitas, a começar pela simulação de eventos que antes só podiam ser testados mediante a montagem de diversos protótipos. A modelagem de sistemas discretos por rede de Petri se revelou uma ferramenta muito prática dotada de muitos recursos capazes de auxiliar o trabalho de administradores e projetista na organização, desenvolvimento, teste e validação de rotinas e processos de trabalho. As redes de Petri possuem uma sistemática que lembra muito os conhecidos organogramas, porém, nesse tipo de rede os objetos são dotados de uma dinâmica matemática manipulável através de funções e eventos. A continuidade deste trabalho poderá explorar ainda muito mais os recursos de modelagem partindo para a integração desse ambiente com outras ferramentas já consolidadas na pesquisa como, por exemplo, o *Matlab*, *Builder* e outros.

A área de RSSFs tem recebido muita atenção da comunidade de pesquisa, pois propõe novos desafios e oportunidades em diferentes áreas do saber. O sensoriamento remoto já faz parte do cotidiano das relações humanas e passará a ser usado em uma grande variedade de aplicações. As RSSFs são direcionadas a aplicação. Assim, o projeto e desenvolvimento dos componentes de uma RSSF dependem dos parâmetros da aplicação para sua elaboração.

Dimensões, taxa de transmissão e alcance dos módulos sensores são características que podem ser adequadas para uma aplicação e totalmente inadequadas para outras. A incompatibilidade com a aplicação pode ser também, relativa ao hardware ou software. Essas redes devem se popularizar à medida que o hardware utilizado tenha maior capacidade e seja mais barato. No entanto, a energia deve ser ainda um problema fundamental. RSSFs tratam de novos conceitos e problemas. Alguns, tais como localização, desenvolvimento e rastreamento, recursos de monitoramento de variáveis físicas, químicas e biológicas são assuntos fundamentais, em que muitas aplicações dependem para obter informações.

Capítulo 3

Modelagem

3.1. Introdução

Neste capítulo são mostrados os modelos de Redes de Petri coloridas (RPC) do sistema de monitoramento, transmissão e tratamento dos dados, definidos de acordo com os recursos técnicos disponíveis e as exigências da aplicação.

O trabalho proposto consiste no desenvolvimento de um sistema de sensoriamento remoto para umidade e temperatura do solo, em agricultura de precisão. O diagrama mostrado na Figura 3.1 traz em blocos os componentes constituintes desse sistema de monitoramento. Em pontilhado estão os três blocos que integram o trabalho, são eles: a interface instalada no PC, o módulo mestre conectado ao computador através de uma porta serial, e o módulo remoto dotado de sensores.

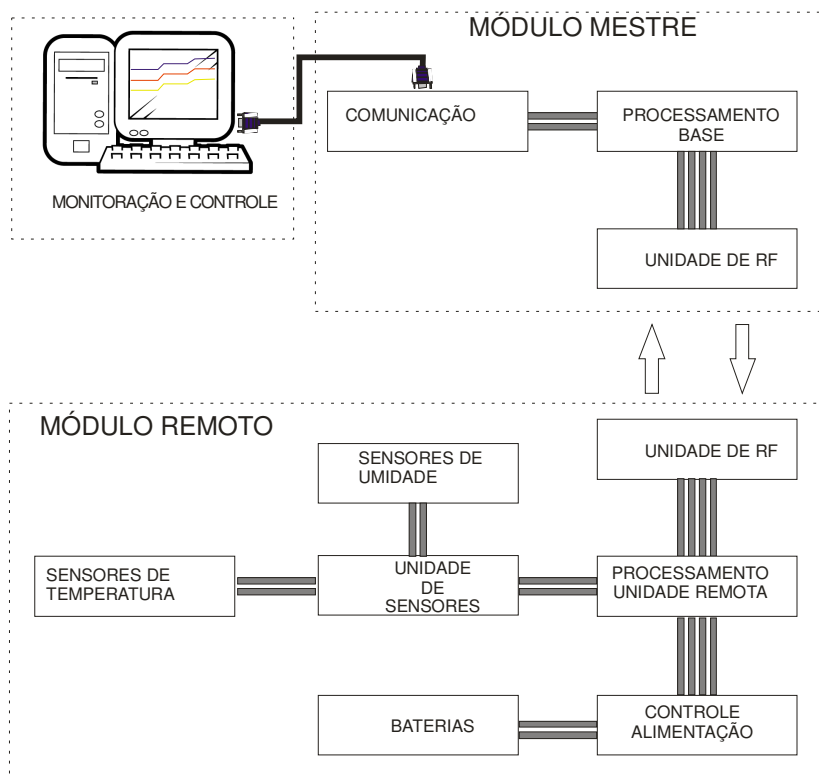


Figura 3.1. Diagrama em Blocos do Sistema de Aquisição.

Como pode ser entendido, a partir do diagrama apresentado na Figura 3.1, o sistema de aquisição de dados é constituído por 11 blocos, onde um é basicamente o *PC*, sete pertencem à unidade remota e três à unidade mestre.

O bloco da unidade mestre é conectado ao *PC* através de uma comunicação serial RS232. O bloco de processamento na unidade base tem a função de fazer a interface de comunicação entre o *PC* e o bloco de comunicação RF.

O módulo remoto é constituído de sete blocos. O bloco de comunicação é idêntico ao do módulo mestre, com os mesmo parâmetros e mesma configuração de conexão. O bloco de processamento do nodo sensor, além das funções de interface com a unidade de RF, precisa controlar sua fonte de energia, conforme os ciclos de atividade do circuito. O processador, também precisa monitorar a carga da bateria e informar o seu nível à estação base e controlar a unidade de sensores realizando a leitura multiplexada dos sensores instalados.

3.2. Modelagem dos Módulos

As redes de sensores sem fio são sistemas dinâmicos, nos quais eventos contínuos e discretos coexistem e interagem. O funcionamento do circuito dos nodos sensores é descrito, a partir da modelagem dos modos de operação que o sistema pode assumir na execução e manutenção de suas tarefas e recursos (energia e memória). O software do sistema e seus protocolos de comunicação também foram explorados através de modelos testados com Redes de Petri Coloridas. O suprimento limitado de energia nos nodos sensores determina o tempo de vida através da relação de trabalho e carga da bateria que o alimenta. Portanto, na modelagem de um nodo sensor devem-se incluir funções capazes de monitorar o consumo destes módulos.

Na seqüência de funcionamento, a evolução discreta executada por um nó sensor pode ser definida em:

1. Acorda: O nó sensor está no estado ativo e pode executar qualquer das operações seguintes.
2. Escuta (Liga Receptor): Intervalo em que módulo só mantém o rádio ativo no modo de recepção, monitorando o meio por um curto intervalo de tempo.

3. Transmite (Ligar Transmissor): Depois do sensoriamento, recebimento de comando da unidade base ou pelo disparo de algum evento, o módulo ativa o rádio no modo de transmissão.
4. Desligar rádio: o módulo permanece ativo executando algum processamento, porém com seu transceptor desligado.
5. Ler Sensores: Neste instante o nodo sensor executa a multiplexação e leitura dos sensores conectados ao módulo de acordo com os intervalos para estabilização dos dispositivos.
6. Dormir: Modo de Baixo consumo do Microcontrolador, instante em que todos os dispositivos são desligados permanecendo ativo somente o *time* do RTC, para disparo da interrupção de inicialização do processamento.

As tarefas citadas possuem um custo de energia agregado, sendo o estado 6 (Dormir) o de mais baixo consumo para o microcontrolador. Durante este período, este módulo estará economizando energia, mas ele não será capaz de se comunicar e nem de sensoriar nenhum evento. Depois do intervalo de dormência (ΔD), o módulo sensor acorda e passa para um dos três modos 2, 3 ou 5.

Se no modo de escuta (2), algum pedido de comunicação do mestre ou de um nodo vizinho for recebido, o módulo parte para execução do pedido assumindo um novo intervalo (ΔD_1). Concluída a tarefa e depois de um intervalo acordado (ΔA) ele irá retornar imediatamente para o modo (6).

A modelagem do padrão de funcionamento deve garantir sempre um retorno ao estado de dormência, poupando ao máximo a bateria. Os intervalos (ΔD) e (ΔA) são definidos pelo administrador da rede de acordo com o fenômeno que se deseja monitorar ou qual processo pretende-se controlar. Na Figura 3.2 são apresentados todos os conjuntos de cores (tipos), variáveis e funções relativas aos lugares, transições e arcos de todas as redes do modelo e na Figura 3.3 é ilustrada a página principal da modelagem dos estados operacionais do módulo sensor remoto.

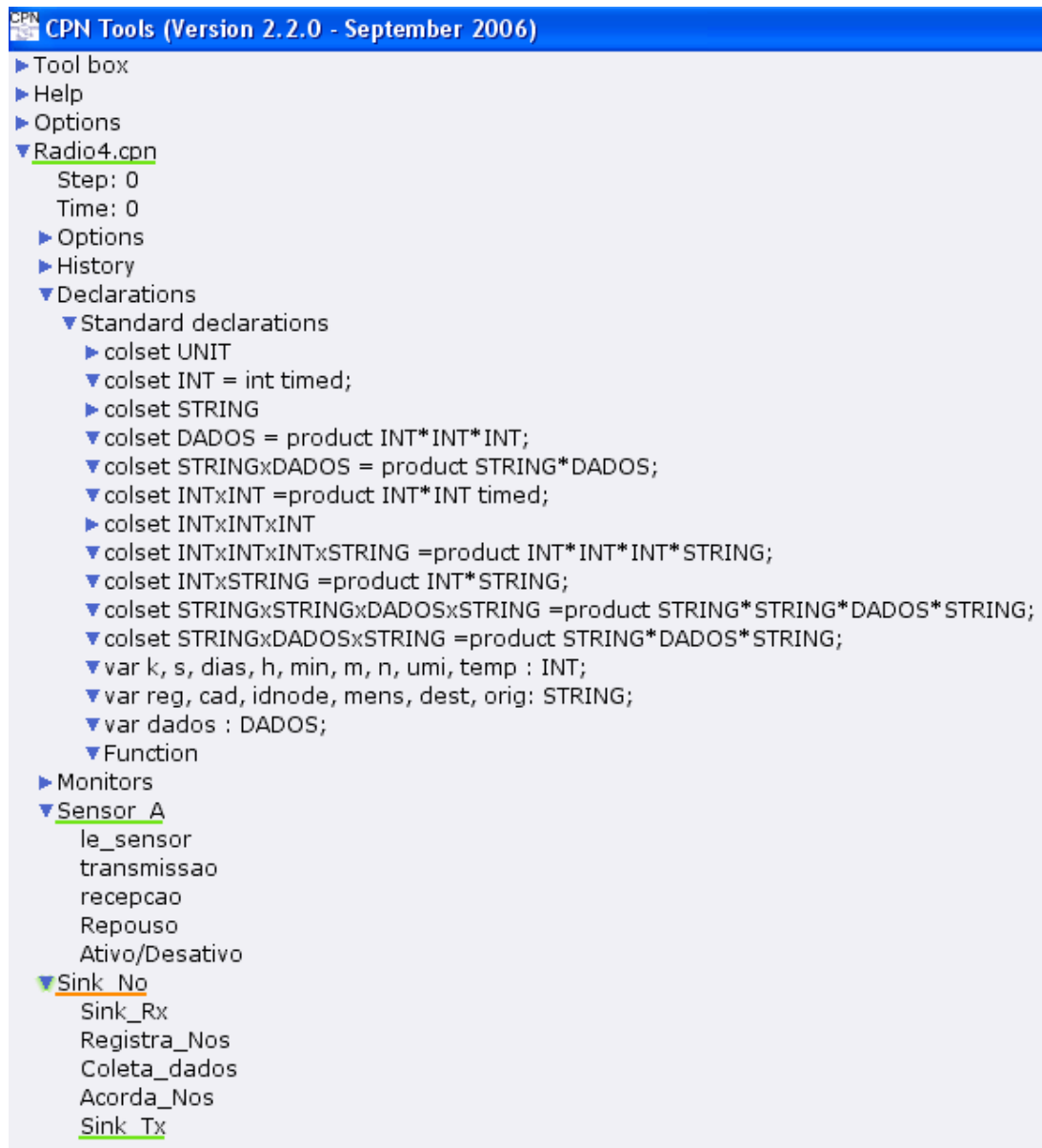


Figura 3.2. Lista dos conjunto de cores, variáveis e funções.

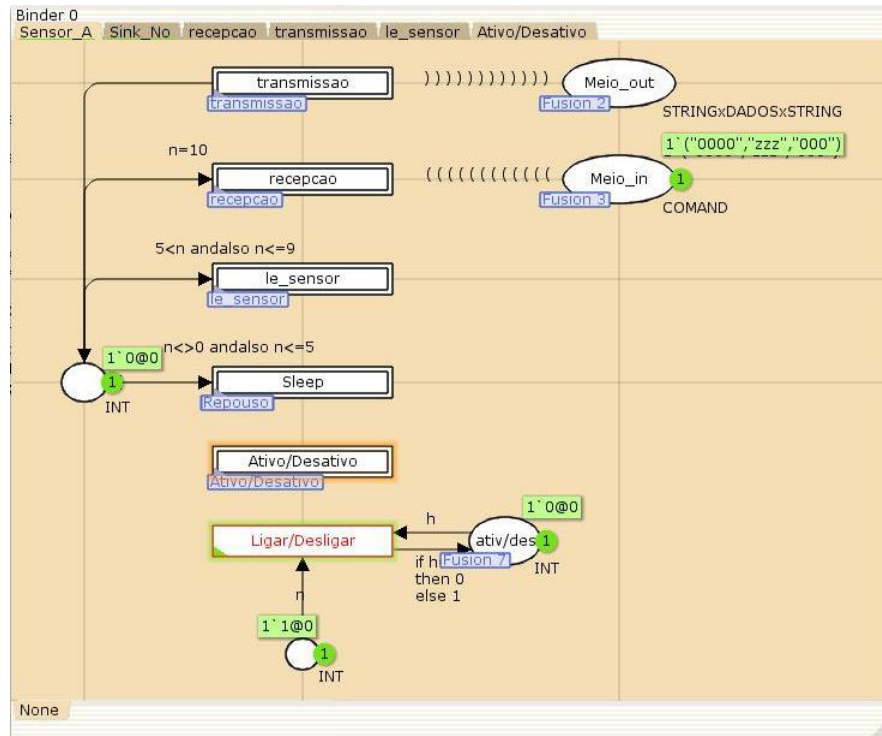


Figura 3.3. Estados Operacionais do Módulo Remoto.

Este modelo representa o funcionamento dos módulos remotos de uma forma geral, sendo o nível mais alto da rede, no qual podem ser observados os estados de funcionamento que o sistema pode assumir e representam o desenvolvimento das rotinas de funcionamento e comunicação dos módulos. Os lugares “Meio_in” e “Meio_out” representam a interface entre os módulos remotos e o mestre.

A transição “Ligar/Desligar” foi adotada como um artifício utilizado entre as etapas de configuração dos módulos remotos, ainda na bancada, e seu posterior deslocamento até os pontos de monitoramento.

A transição “Ativo/Desativo” foi modelada em uma sub-rede para simular a ativação dos módulos remotos por um comando *broadcast* enviado pelo módulo mestre. Após o disparo da transição “Ligar/Desligar” o “Sensor_A” entra em um regime de trabalho onde somente a transição de recepção é ativada, monitorando com maior frequência o meio de comunicação até a recepção do comando de ativação “atv”.

O comando de ativação é enviado pelo módulo mestre em um pacote junto com o endereço de origem para todos os módulos remotos dentro do seu raio de alcance e devem responder com o pedido de registro anexado com seu número de identificação. Depois de

registrados, os módulos remotos passam a responder somente às mensagens indexadas com o endereço de origem do módulo mestre que os ativou.

A modelagem da etapa de ativação no módulo remoto pode ser vista na Figura 3.4, sendo formada por duas transições, a de ativação que habilita o comando registrar através da fusão do espaço “Registrar” com a sub-rede de transmissão do módulo sensor. A transição de desativação é utilizada para desativar módulos sensores redundantes ou com problemas de *hardware*.

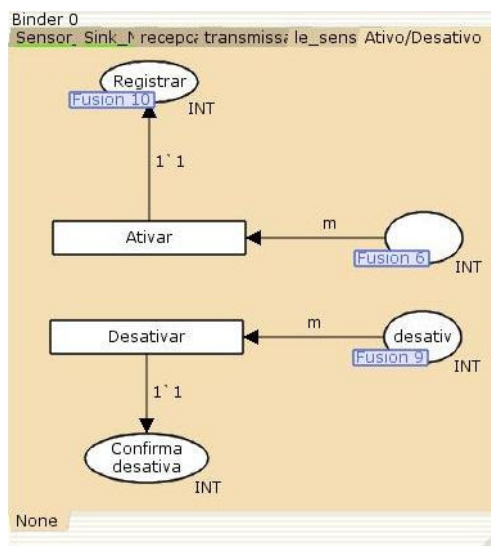


Figura 3.4. Sub-Rede de Ativação e Desativação do módulo remoto.

A sub-rede “Sleep” (ver Figura 3.3) é habilitada logo após o procedimento de registro do módulo sensor com o módulo mestre e foi modelada para simulação do estado de sono do módulo remoto, este modelo funciona como uma sub-rede de atraso onde o sistema permanece durante um número definido de disparos da transição “Sleep” mostrada na Figura 3.5. O número de disparos dessa transição é definido em uma condição de guarda, anexada à transição, ditando o tempo de sono do módulo.

A sub-rede “lê_sensor” foi modelada somente para simular a disponibilidade de dados aqisitados dos sensores de temperatura e umidade, valores inteiros pré-fixados, utilizados nas interações entre os módulos remotos e mestre na execução dos pedidos de coleta de dados.

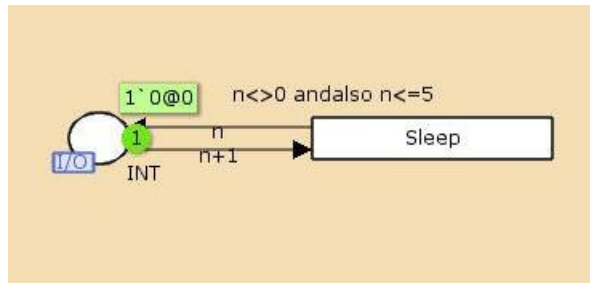


Figura 3.5. Transição do modo “Sleep”

Na sub-rede “recepção” (ver Figura 3.3) foi modelado o algoritmo de verificação da origem dos pacotes recebidos e direcionamento dos comandos de funcionamento do módulo remoto. Na Figura 3.6 é mostrada a parte da modelagem de recepção referente à verificação dos endereços de origem e destino e extração da mensagem com informações válidas para o controle do módulo.

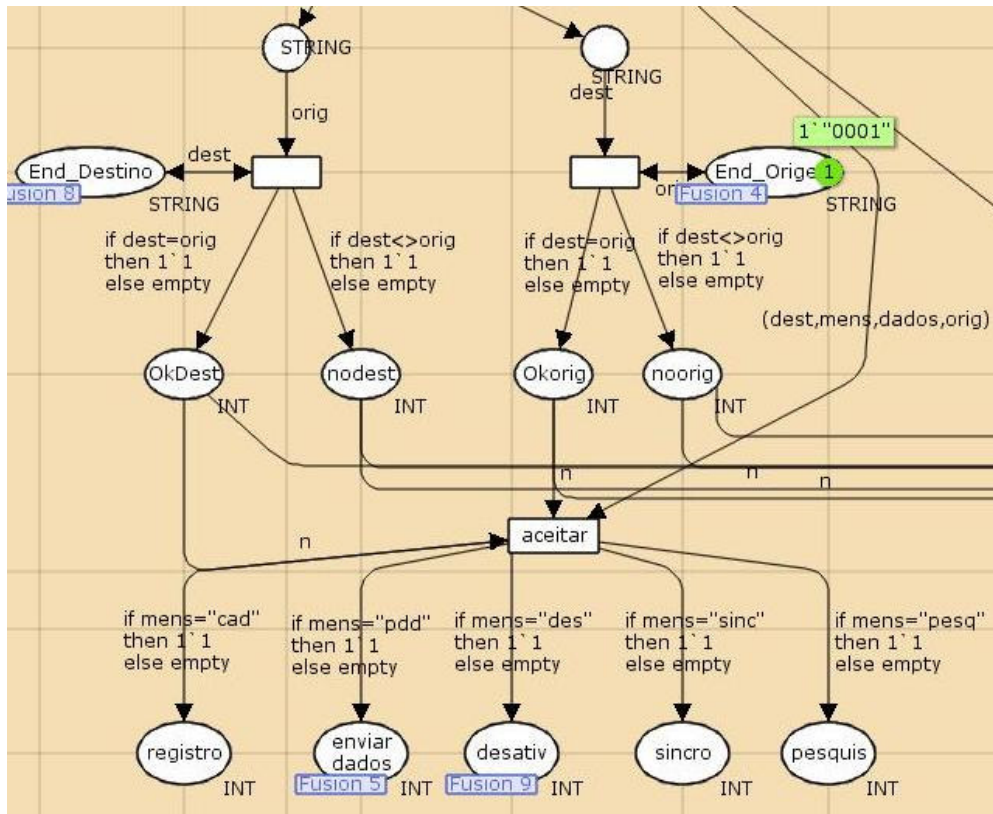


Figura 3.6. Verificação dos pacotes recebidos na modelagem da recepção.

Na Figura 3.6 são mostrados os lugares “End_Destino” e “End_Origem”, reservados para os respectivos valores de endereçamento do módulo remoto e mestre. O pacote recebido é formado inicialmente por três partes, duas de endereçamento e uma de informação válida contendo o comando junto dos seus parâmetros. Os comandos enviar dados, desativar, sincronismo e pesquisa foram modelados como lugares.

A sub-rede de transmissão mostrada na Figura 3.7 modela as funções de registro dos módulos e transmissão dos dados através das transições “transmiregistro” e “transmidados” respectivamente. Neste modelo é feita a montagem do pacote de informações a serem transmitidas de acordo com os comandos recebidos do módulo mestre. A partir das inferências impostas pelos comandos e da métrica dos dados define-se a quantidade de bytes necessários em cada pacote, considerações levantadas no desenvolvimento das rotinas de comunicação dos transceptores.

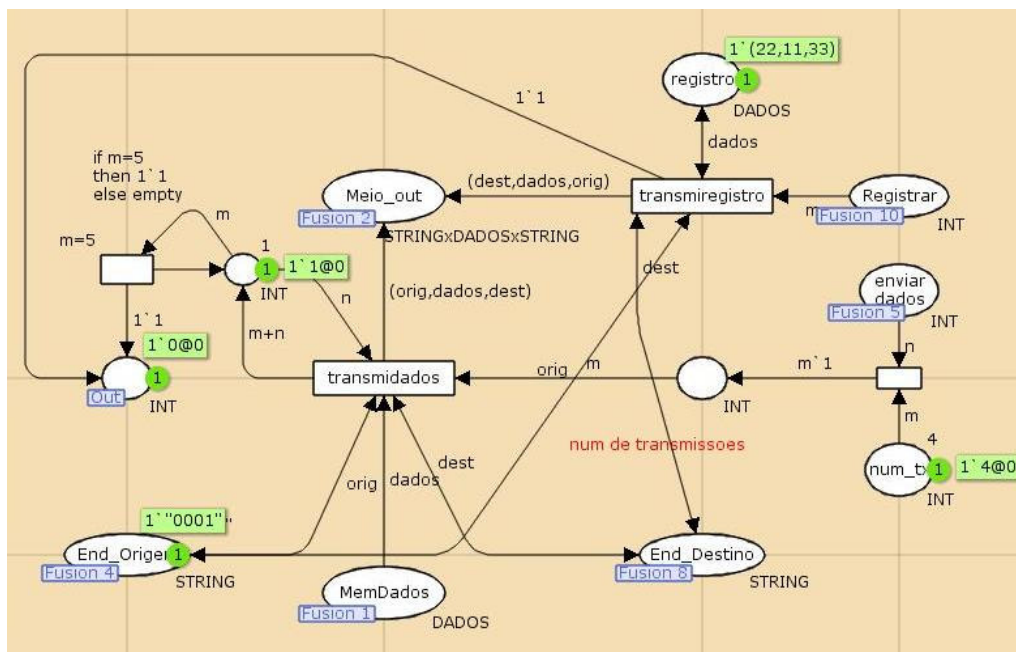


Figura 3.7. Etapa de transmissão de dados e registro.

O funcionamento do módulo mestre foi modelado em cinco sub-redes, de acordo com os serviços de administração e controle dos módulos sensores. As sub-redes são as seguintes: Acorda_Nos, Registra_Nos, Coleta_dados, Sink_Rx, Sink_Tx, conforme apresentado na Figura 3.8 da área de modelagem do CPNTools.

Figura 3.8. Modelagem *Sink Nodo*

A modelagem do “Sink_No” possui configuração similar a dos módulos remotos. As exceções são as sub-rede “Acorda_Nos” e “Registra_Nos”, responsáveis pelos comandos de ativação dos módulos remotos e registro dos módulos em biblioteca constando seus números identificadores. O lugar de registro dos módulos remotos é mostrado na Figura 3.8 da modelagem da sub-rede “Registra_Nos”.

Os módulos remotos enviam o comando “reg” para se registrarem no módulo mestre. Este comando vai acompanhado de seu número de identificação. Ao receber o pacote, o módulo mestre verifica através da transição “checar” se o módulo remoto já não consta na biblioteca registros, caso contrário o número de identificação é lançado em um lugar de espera de registro, mantendo a transição “cadastra” habilitada. No disparo da transição cadastra, no processo de registro (Figura 3.9), o módulo sensor recebe um valor inteiro que o posicionará na fila de módulos remotos. A Fila é utilizada na construção de uma seqüência síncrona de coleta de dados.

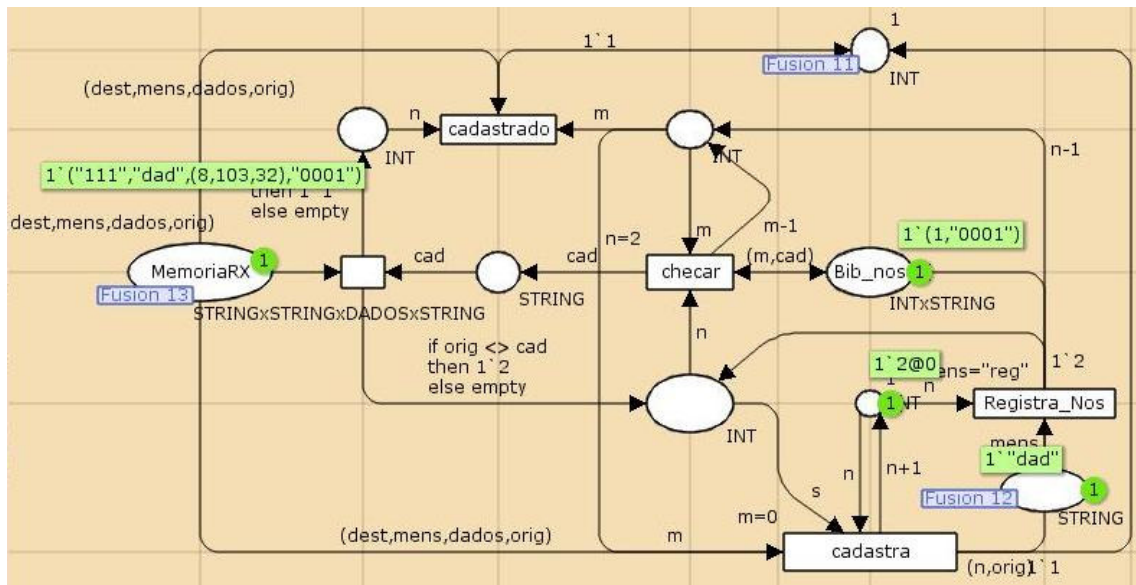


Figura 3.9. Modelagem de registro dos módulos remotos

O modelo de rede de Petri colorida da comunicação entre os módulos, apresentado neste capítulo, foi analisado através da verificação das propriedades do modelo e sua análise mostrou que o mesmo realiza a especificação de funcionamento proposta. O modelo também foi analisado através de simulação. Em todas as simulações realizadas, o mesmo se comportou segundo as especificações. Baseado neste modelo é que foi implementado o protocolo de comunicação do sistema.

3.3. Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foi tratada a etapa de modelagem através de redes de Petri coloridas utilizando a ferramenta *CPNTools*. Através da modelagem foi realizada a simulação do funcionamento da rede quanto ao protocolo de comunicação entre os módulos remotos e a base conectada ao computador. Na modelagem também foram tratados o processo de coleta de dados relativo aos intervalos de leitura, tempo de estabilização dos sensores de umidade e temperatura, armazenamento em memória e envio dos pacotes (parâmetros previstos e simulados na rede).

O resultado da simulação apontou para os desafios a serem tratados no desenvolvimento do hardware e seu respectivo firmware. Dentre os itens observados, na modelagem, destacaram-se como pontos de maior dedicação nas etapas seguintes do projeto, o dimensionamento dos pacotes de dados de acordo com especificações do transceptor utilizado e os critérios da aplicação de monitoramento. A relação entre os intervalos de leitura dos sensores, transmissão dos dados adquiridos, administração do consumo de energia da bateria, intercalando os estados de funcionamento do módulo remoto com o estado de baixo consumo (modo *sleep*), foi modelado de forma a se obter o maior intervalo possível, garantindo maior tempo atuação da rede. Outro ponto de dificuldade revelado na modelagem, dada a necessidade de comprovação experimental do modelo proposto, foi transferido para a etapa seguinte e trata-se da implementação do algoritmo de roteamento entre os módulos remotos (*multihop*).

Baseada nessa modelagem sedimentou-se a base para o desenvolvimento das rotinas de comunicação dos transceptores e controle dos sensores, fundamentais para o funcionamento básico dos módulos remotos e mestre.

No Capítulo 4, a seguir, é apresentado o desenvolvimento do protótipo, seu *hardware*, *firmware* e o aplicativo de interface com o PC.

Capítulo 4

Montagem Experimental

4.1. Introdução

Neste capítulo são apresentadas as etapas de desenvolvimento do hardware do sistema de monitoramento, explorando os recursos técnicos disponíveis e as exigências da aplicação.

A caracterização do sistema proposto é apresentado no Tópico 4.2 com os requisitos necessários ao desenvolvimento do projeto, no Tópico 4.3 são apresentados os testes preliminares realizados seguidos do projeto do protótipo no Tópico 4.4 com o processo de desenvolvimento do *hardware*, dos módulos remotos e da estação base (unidade mestre). A montagem do Protótipo e dos módulos são detalhadas nos Tópicos 4.5 e 4.6 com detalhes da elaboração da fonte de alimentação, da comunicação serial com o computador e da conexão com o rádio transceptor. Ainda no Tópico 4.6 é feita a observação de alguns detalhes importantes do microcontrolador utilizado. O Tópico 4.7 foi dedicado ao detalhamento do módulo remoto quanto à alimentação do microcontrolador e operação dos sensores. No Tópico 4.8, último do Capítulo 4, é apresentada a interface de controle de aquisição de dados desenvolvida em linguagem C para administração da comunicação entre o módulo mestre e um computador pessoal do tipo IBM-PC ou compatível.

4.2. Características do Sistema Proposto

O foco desse trabalho é a elaboração de um sistema de aquisição de dados remoto, capaz de oferecer, à agricultura de precisão, as vantagens da comunicação sem fio aplicada à coleta de dados no campo.

As considerações quanto às características e requisitos para o projeto são:

- **Eficiência Energética:** os nodos sensores devem ser eficientes no consumo de energia. Os módulos remotos têm uma quantidade limitada de energia que determina seu tempo de vida. Considerando que algumas aplicações podem contar com dezenas de unidades, em curtos intervalos de tempo, torna-se inviável a recarga.

Conseqüentemente energia é o recurso fundamental, sendo a principal métrica no dimensionamento dos circuitos e protocolos de comunicação e controle.

- Bateria de reserva: os nodos sensores possuem uma pequena bateria que mantém o mesmo em modo de baixo consumo durante o tempo de substituição de sua bateria principal.
- Potência Monitorada: o *hardware* deve ser capaz de medir a sua energia disponível e através do algoritmo embarcado tomar decisões quanto ao seu funcionamento.
- Baixo Custo: é desejável que os módulos remotos sejam baratos, pelo fato de redes de sensores poderem ter dezenas ou centenas de nodos sensores. Portanto o circuito só deve utilizar o estritamente necessário.
- Sensoriamento Distribuído: usando uma rede de sensores sem fio espera-se coletar muitos dados, quando comparados a somente um sensor. Distribuindo vários sensores em longas distâncias podem surgir obstruções. Contando com isso o sistema deve ser capaz de se adaptar a esses obstáculos naturais.
- *Multi-hop* (múltiplos saltos): o alcance de um nodo sensor pode não chegar à estação base. A solução para a cobertura de grandes áreas é a comunicação por múltiplos saltos. Outra vantagem de se utilizar rotinas *Multi-hop* é quando o rádio utilizado permite o controle de sua potência de transmissão, pois o custo de energia em transmissões de curta distância é menor. Assim, o nodo sensor funcionando como estação de retransmissão precisa ter uma comunicação bidirecional.
- Programável: considerando que este componente é um protótipo de teste, será reprogramado freqüentemente para o desenvolvimento de novos protocolos de comunicação e outras aplicações de sensoriamento. Conseqüentemente, a programação deve ser fácil. O sistema deve usar um microcontrolador com compiladores acessíveis para depuração de seu *software* embutido.
- Expansível: o projeto do hardware deve ser expansível a vários sensores, para apoiar uma maior variedade de aplicações.
- Tamanho: para propósitos de demonstração os dispositivos devem ser razoavelmente pequenos. Entretanto, a aplicação deste projeto não exige que os módulos sejam tão pequenos quanto os sensores sem fios comercializados.

4.3. Testes Preliminares

Definidos os parâmetros do sistema proposto e com o objetivo de testar experimentalmente o sistema modelado, antes da confecção de circuitos, os testes foram realizados em placas de desenvolvimento. Na primeira montagem realizada, um conjunto de dois módulos remotos e um módulo mestre foram configurados e o teste de controle e comunicação realizado através de um microcomputador. Nos testes realizados, em laboratório e no campo, foram utilizados somente sensores de umidade.

Na Figura 4.1 é ilustrado o esquema de teste adotado na bancada. Inicialmente os módulos transceptores eram testados dentro das pequenas dimensões do laboratório e posteriormente distanciados dentro de um galpão. A taxa de transmissão era aumentada à medida que a quantidade de pacotes trocados em determinada distância, entre os módulos, atingia índices satisfatórios.



Figura 4.1 – Bancada de Trabalho com as placas de desenvolvimento

As placas de desenvolvimento possuem duas portas seriais onde uma é utilizada para a programação *in-circuit* do microcontrolador e a outra é reservada para a interface de comunicação com o módulo mestre. As placas de desenvolvimento dotadas de display (LCD) e quatro teclas, mostradas na Figura 4.3, foram inicialmente conectadas a um PC com quatro portas seriais, o que facilitou a depuração do *firmware* nos primeiros testes dos módulos comunicadores. Esse processo mostrou-se bastante eficaz na etapa de desenvolvimento das primeiras rotinas, fazendo a transição entre a modelagem do sistema, discutida no capítulo 3 e

sua implementação em *hardware* e *software*.

O rádio transceptor utilizado foi o da Laipac, modelo TRF2.4 GHz, mostrado na Figura 4.2.

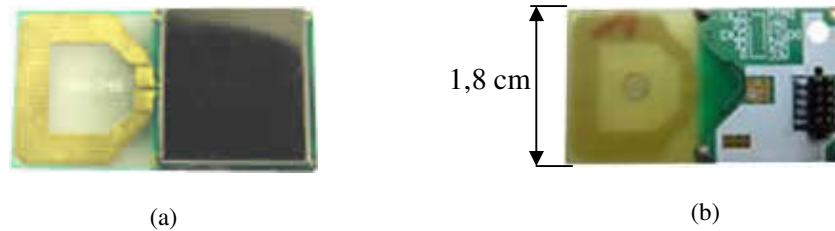


Figura 4.2. Rádio transceptor da Laipac, modelo TRF2.4 GHz vista de frente (a) e vista do conector (b).

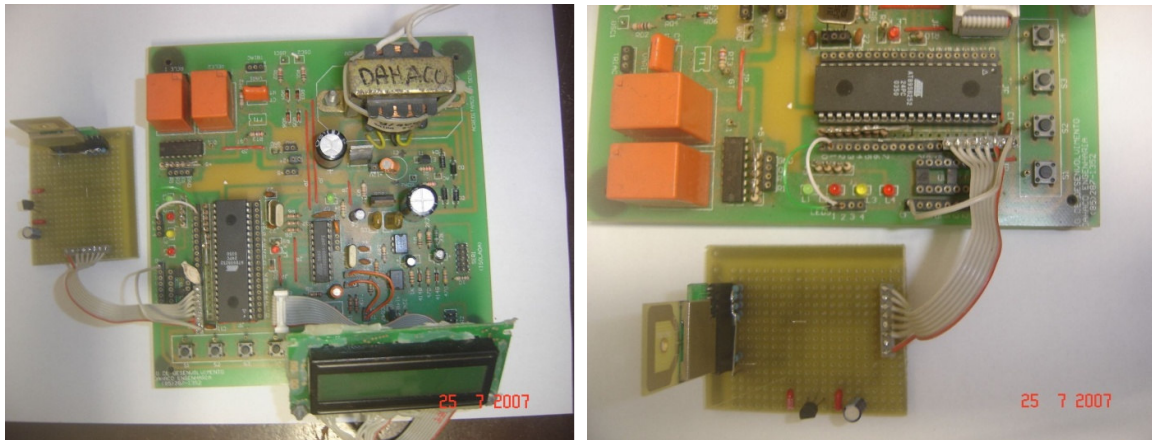
A rotina de controle do transceptor foi a primeira etapa dos testes. Nos primeiros testes foram desenvolvidas pequenas rotinas para a contagem de pacotes enviados e recebidos. O *display* (LCD) das placas de desenvolvimento foi utilizado para visualização das taxas de desempenho da comunicação.

O desenvolvimento do programa, em linguagem C, foi feito através dos compiladores CCS, Source Boost e de um emulador, desenvolvido por um de nossos colaboradores. Este kit de desenvolvimento é formado por um compilador e placas dotadas de vários recursos baseadas no microcontrolador 8051, especificamente o modelo AT89S8252 DIP 40 da Atmel com clock de 11 MHz.

A linguagem de programação C foi escolhida, por sua praticidade e transportabilidade, recurso muito importante para etapas de desenvolvimento, permitindo a fácil migração para outros microcontroladores de mais baixo custo, menor consumo de energia e dimensões reduzidas.

Nos testes uma das placas de desenvolvimento foi configurada para ser o módulo Mestre e as outras duas os módulos sensores, podendo ser vistas na Figura 4.3, já com o módulo transceptor montado em um circuito de interface e conectado à placa de desenvolvimento.

Para o ajuste das tensões de operação e comunicação do rádio, (típico de 3,3 volts), com a placa de desenvolvimento de cinco volts, torna-se necessário o uso do circuito de interface. Alguns poucos componentes são necessários para implementar um canal com o radio transceptor Laipac 2.4GHz: um regulador de tensão e algumas resistências de *pull-up*.



(a)

(b)

Figura 4.3. (a) Placa de desenvolvimento do AT89S8252 (b) com o módulo LAIPAC.

Inicialmente a interface foi montada em uma *proto-board*, mas logo as interferências começaram a induzir dúvidas quanto ao desempenho do rádio, sendo necessária a utilização de placas universais. Nessa interface foi utilizado o regulador de tensão LP2950CZ de 3.3 volts e resistências de $2k2 \Omega$. O esquema de conexão do rádio com a placa pode ser visto na Figura 4.4. O esquema mostra ainda os pinos ociosos DR2, CLK2, OUT2 que se referem a um segundo canal de recepção e formam mais uma opção de comunicação disponível nesse transceptor.

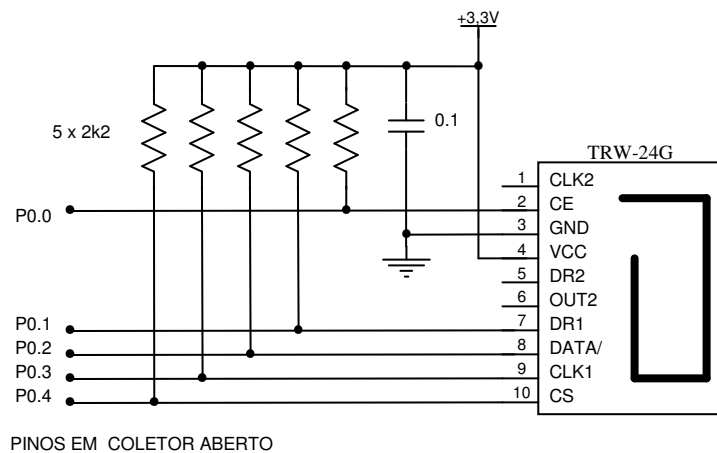


Figura. 4.4. Interface Transceptor com o Microcontrolador 89S8252 / 5V.

Os testes nas placas de desenvolvimento serviram para constatar a funcionalidade deste rádio para o projeto, pois foi comprovada a sua eficiência no envio dos dados e no alcance de distâncias satisfatórias.

4.4. Projeto do Protótipo

Nesta etapa inicia-se o processo de desenvolvimento do *hardware*, módulos remotos e estação base (unidade mestre), de acordo com os requisitos abordados nos Tópicos 4.1, 4.2 e 4.3 desta unidade. O sistema organizado em blocos foi apresentado na Figura 3.1 do Capítulo 3.

Baseado na proposta de sistema e nos resultados dos testes realizados com as placas de desenvolvimento iniciou-se a elaboração dos módulos alimentados por baterias e com um microcontrolador dotado de mais recursos. A unidade de processamento escolhida para os módulos remotos e a estação base (mestre) foi o PIC18F4550 da Microchip. No Quadro 4.1 são mostradas suas características básicas.

Tabela 4.1. Especificações do Microcontrolador PIC18F4550

Característica	Valor
Frequência de Operação	48 MHz
Memória Flash	32 Kbytes
Memória de Dados	2048 bytes
Memória de EEPROM	256 bytes
Portas de Entrada/Saída	5
Instruções	16384
Comunicações Seriais	SPI, I ² C, USART, USB
Timers 1 (3)	8 (16) bits
Conversor AD	1 de 10 bits e 13 (ch)
Comparadores	2

As rotinas testadas antes, nas placas de desenvolvimento, sofreram pequenas alterações, e perderam a facilidade da programação *in-circuit*. Passou-se então a se utilizar um programador universal mais robusto, tornando necessária, a cada modificação na rotina, a remoção do microcontrolador do circuito para uma nova gravação.

4.5. Montagem do Protótipo

A montagem deste projeto foi executada no Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA), localizado no Campus do Pici, integrado ao departamento de Engenharia Agrícola da UFC. O laboratório vem sendo equipado para dar suporte à instrumentação eletrônica. As pesquisas desenvolvidas no ramo da instrumentação direcionam-se a trabalhos de automação e coleta de dados aplicados à agricultura de precisão.

A montagem do Protótipo dividiu-se na confecção dos módulos mestre e sensores e no desenvolvimento do programa de interface com o sistema, ver Figura 3.1 do diagrama em blocos do sistema.

4.6. Montagem dos Módulos

A montagem dos módulos iniciou-se a partir dos ensaios básicos, ainda na matriz de contatos, à medida que os circuitos eram definidos e o desempenho dos componentes comprovado, estes passavam, então, a fazer parte da lista de orçamento. A pesquisa de preços somada à facilidade de compra tornava-se o próximo quesito de seleção do componente para o projeto.

4.6.1. O Módulo Base (Mestre)

O primeiro bloco montado foi o da estação base, o módulo mestre. A plataforma de desenvolvimento antes usada nos primeiros testes de configuração dos transceptores foi agora utilizada para os testes de comunicação no desenvolvimento do módulo mestre. Na Figura 4.5 é mostrado o módulo mestre e sua etapa de conexão serial com um computador e unidade de comunicação RF, além da fonte de alimentação.

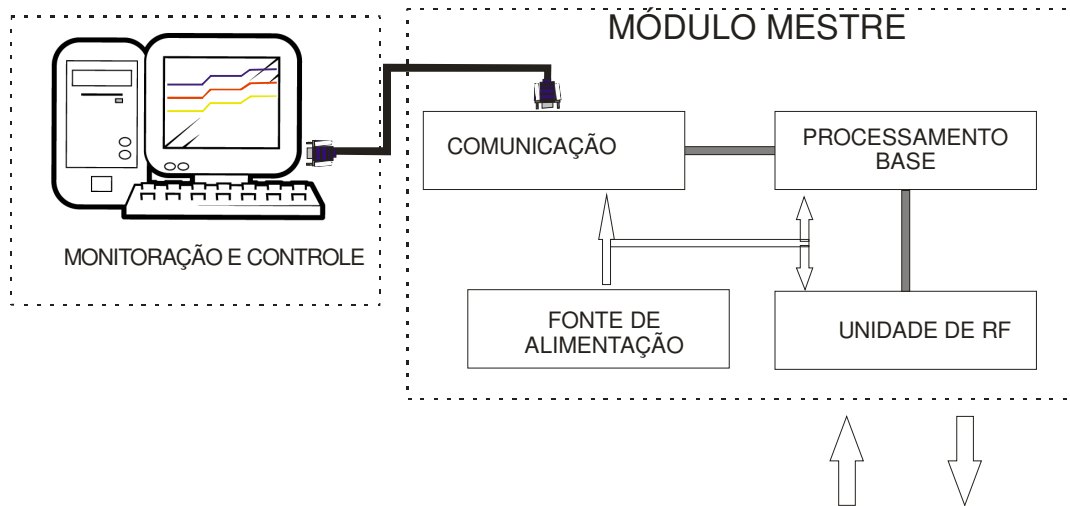


Figura 4.5. Diagrama Módulo Mestre.

4.6.2. Elaboração da Fonte do Módulo Mestre

A fonte desse módulo não envolve grandes desafios, considerando que em seu ponto de instalação encontra-se disponível tensão da rede elétrica ou em situações mais críticas poderá fazer-se uso de células solares. O circuito da fonte do módulo base pode ser visto na Figura 4.6.

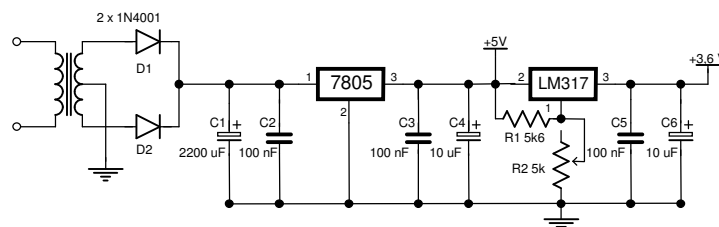


Figura 4.6. O circuito da fonte do módulo base (mestre).

As experiências de bancada revelam que este tipo de fonte apresenta uma tensão de saída bem estável, sendo ideal quando se trabalha com níveis de corrente que não ultrapassem 1A. A tensão de 5 volts é utilizada na alimentação de maior parte do módulo mestre envolvendo o microcontrolador, LCD (Display) e bloco de comunicação RS232. O regulador de tensão LM317 foi ajustado para uma tensão de saída de 3,6 volts, tensão máxima tolerada pelo rádio transceptor.

4.6.3. Comunicação Serial com o Computador

O bloco de comunicação do módulo mestre com o computador é baseado no padrão de comunicação serial RS232, por ser, ainda, uma maneira muito difundida e de custo reduzido. A conexão serial trabalhando em conjunto com o programa de interface permitiu o controle, configuração e coleta de dados dos módulos remotos. A implementação desta etapa de comunicação é baseada no circuito integrado MAX232, já muito difundido. O bloco de comunicação conta com poucos componentes para seu funcionamento, conforme mostrado na Figura 4.7.

O módulo mestre é conectado ao PC utilizando uma das portas seriais disponíveis, COM 0, COM 1 ou outras, através de um cabo com conectores do tipo DB9. O CI MAX232 é utilizado para compatibilizar os níveis de tensão apresentados pela porta serial (-12V/+12 volts) com os níveis de alimentação TTL de +5 volts aceitos pelo microcontrolador.

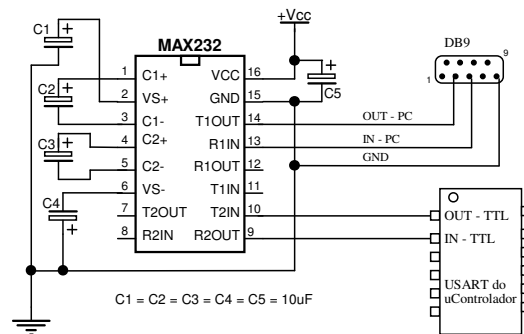


Figura 4.7. Esquema de ligação do MAX232.

4.6.4. Conexão com o Transceptor

O Laipac TRW-24G é um transceptor de 2.4GHz e utiliza o chip nRF2401a da Nordic Semiconductor incluindo todos os componentes necessários. O TRW-24G (também chamado de RF-24G e TXRX24G) aceita uma alimentação de no máximo 3,6 volts. A unidade de processamento e o módulo transceptor estão ambos alimentados com a mesma tensão regulada de 3,3 volts, o que facilita bastante a conexão dos blocos sem intermédio de componentes.

4.6.5. O Microcontrolador

O microcontrolador utilizado foi da Microchip, modelo PIC18LF4550, com um cristal de 16MHz e taxa de comunicação de 9600 bauds. O PIC18LF4550 roda em uma velocidade máxima de 48MHz. No entanto, no projeto, os módulos remotos foram alimentados com uma tensão de 3,3 volts, limitando assim a frequência de trabalho do microcontrolador a 16 MHz, conforme exposto no gráfico da Figura 4.8, extraído do *data-sheet* do componente.

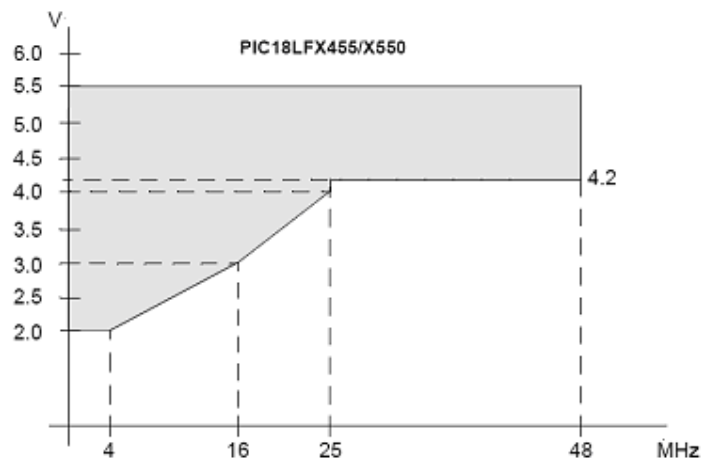


Figura 4.8. Gráfico da frequência em função da tensão de alimentação

O microcontrolador na estação base está encarregado de fazer a conexão entre o bloco de RF e o bloco de comunicação serial com o computador.

4.7. Os Módulos Remotos

O diagrama em blocos dos módulos sensores é mostrado na Figura 4.9. Conforme tratado, anteriormente, no Capítulo 3, o módulo remoto é constituído de sete blocos. O bloco de comunicação utiliza um transceptor idêntico ao utilizado no módulo mestre, entretanto sua conexão com o bloco de processamento, o microcontrolador, possui diferenças com relação ao módulo mestre. O bloco de processamento do nodo sensor, além das funções de interface com a unidade de RF, precisa controlar sua fonte de energia, conforme os ciclos de atividade do circuito. O processador também precisa monitorar a carga da bateria e informar o seu nível de tensão à estação base e controlar a unidade de sensores realizando a leitura multiplexada dos sensores instalados.

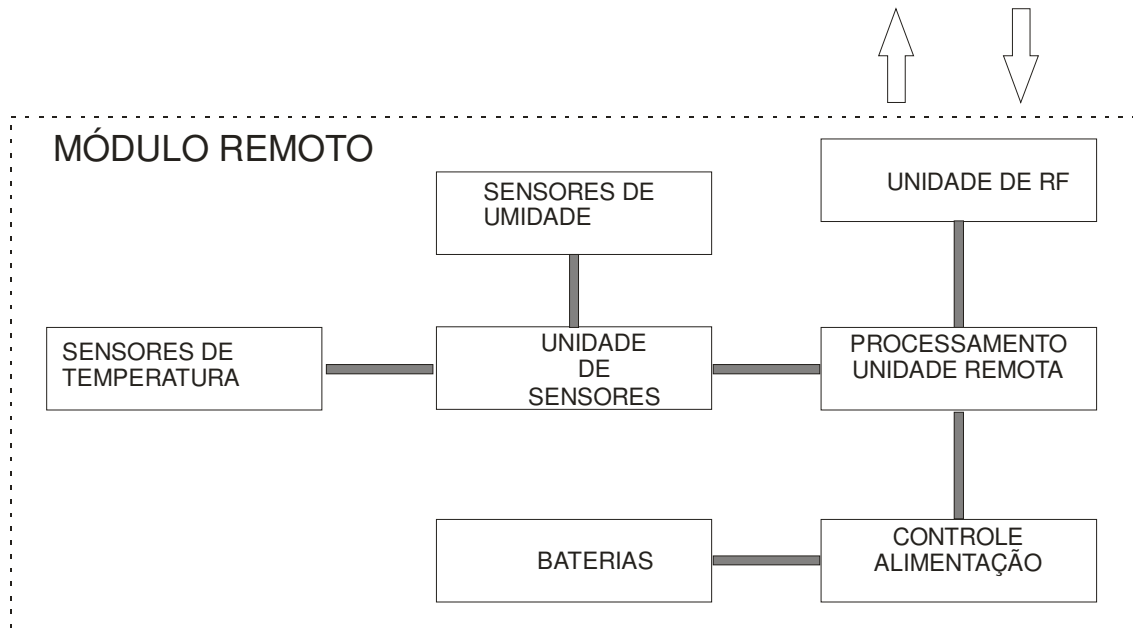


Figura 4.9. Diagrama em blocos do módulo sensor

4.7.1. Elaboração da Fonte do Módulo Remoto

Diferente das placas de desenvolvimento utilizadas inicialmente, conectadas à rede externa de 220 V_{CA} e com fonte regulada de 5 volts, as placas desenvolvidas para os módulos sensores passam a ter como fonte de alimentação, somente a tensão fornecida por uma bateria previamente carregada. A fonte provê tensões diferentes ao circuito, para alimentação dos sensores, módulo de comunicação e bloco de processamento. O sensor de umidade, por exemplo, foi calibrado e validado com uma tensão de 6,6 volts, já o circuito do microcontrolador e transceptor funciona com a tensão de 3,3 volts. Foi escolhida para este projeto uma bateria de 12 volts e 1,3 Ah da marca HAZE POWER, bateria recarregável constituída de chumbo, ácido sulfúrico e polipropileno, facilmente encontrada no comércio local.

O desenvolvimento da fonte deve garantir condições de controle das tensões e ainda ser capaz de informar a situação de carga da bateria. Para isso, um circuito de chaveamento da bateria foi elaborado permitindo que o microcontrolador possa, no estado de baixo consumo, desacoplar a bateria do restante do circuito. O circuito pode ser visto na Figura 4.10.

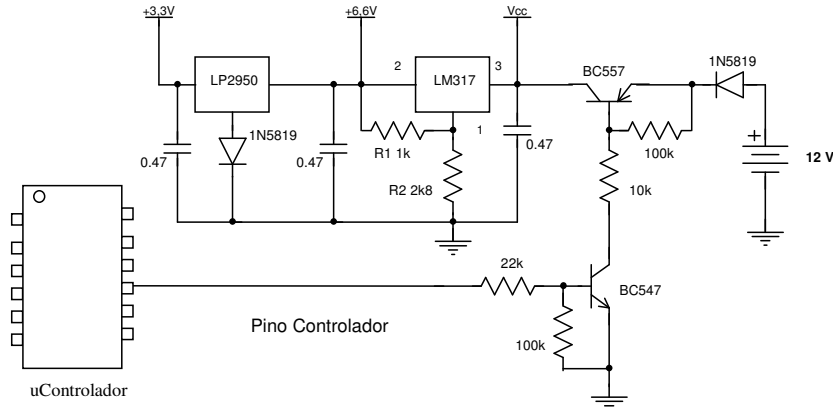


Figura 4.10. Esquema da fonte dos módulos remotos

A regulagem da tensão de alimentação, dos sensores de umidade de 6,6 volts, foi implementada com um regulador LM317LZ. O componente tem baixa corrente de dreno, no máximo 100 μA e fornece uma saída de tensão estável a uma corrente de até 100 mA. Este regulador se revelou uma boa opção para o projeto, por permitir um fino ajuste da tensão e ser encontrado no encapsulamento TO-92, interessante para as pequenas dimensões do circuito.

A tensão de alimentação do microcontrolador e do rádio, 3,3 volts, é regulada pelo LP2950 versão 3,3 volts com baixo consumo de corrente, 75 μA , produzindo uma tensão de saída estável a uma corrente de até 100 mA, componente também encontrado no encapsulamento TO-92.

4.7.2. Alimentação do Microcontrolador

A alimentação do microcontrolador no estado de baixo consumo (modo *sleep*) é garantida por dois capacitores de 2200 μF , de acordo com o esquema mostrado na Figura 4.11. Neste estado, o microcontrolador mantém somente o *timer* do relógio de tempo real ativo, com um clock de 32.768 kHz, o que reduz a corrente de consumo para valores próximos dos 14 μA . Para o caso de descarga total da bateria, ou recebimento do comando de desativação enviado pelo módulo mestre, foi colocada no circuito uma bateria de Lítium tipo botão de 3 volts CR2025 garantindo a manutenção das configurações e do relógio de tempo real. Isso ocorre porque a cada chaveamento de alimentação da bateria de 12 volts (ver Figura 4.10), os capacitores de 2200 μF mostrados na Figura 4.11 são recarregados, garantindo um intervalo de Δt_c relativo ao tempo de descarga dos capacitores.

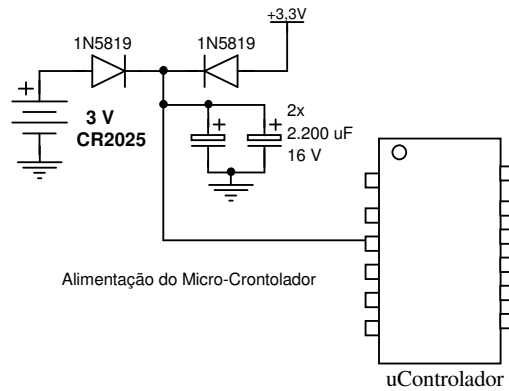


Figura 4.11. Esquema de alimentação do Microcontrolador no módulo sensor.

O tempo de descarga é o parâmetro utilizado no dimensionamento dos intervalos de sono (modo *sleep*) ao qual o microcontrolador é submetido, com o propósito de poupar energia da bateria. O cálculo do Δt_c pode ser definido a partir da equação que rege o funcionamento do capacitor, conforme dado na equação 4.1:

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt + V_{co} \tag{4.1}$$

Assumindo que a corrente é constante pode-se chegar à equação 4.2.

$$\Delta V_c = \frac{I}{C} * \Delta t \tag{4.2}$$

A partir da equação 4.2 e considerando que a corrente de consumo medida no modo *sleep* é constante e de aproximadamente 14 μA e a capacitância C é de 4400 μF pode-se deduzir o intervalo Δt_c de acordo com as equações 4.3 e 4.4.

$$\Delta t_c = \Delta V_c * \frac{C}{I} \tag{4.3}$$

Considerando ainda que, ΔV_c é igual à diferença entre V_o , carga inicial dos capacitores, igual à tensão fornecida pela fonte de 3,3 volts e V_L tensão mínima de funcionamento do microcontrolador, onde de acordo com o *data sheet* é igual a 2,0 volts, concluímos com a Equação 4.4 que o intervalo máximo Δt_c até o desligamento do micro é de:

$$\Delta t_c = (V_o - V_L) * \frac{C}{I} \quad (4.4)$$

em que atribuindo os respectivos valores, tem-se:

$$\Delta t_c = (3,3 - 2,0)V * 314,28 \frac{F}{A}$$

obté-m-se o valor de Δt_c :

$$\Delta t_c = 408,57s \cong 6,8 \text{ min}$$

Entretanto, observando o esquema da Figura 4.11 constata-se que o valor mínimo V_L será definido, não pela tensão mínima de funcionamento do microcontrolador, mas pela tensão resultante da associação em série da bateria CR2025 e o diodo *Schottky* 1N5819, com uma tensão reversa de 0,6 volts, que resultam no valor de 2,4 volts para V_L . Portanto, o intervalo máximo para o modo *sleep* fica limitado a um ΔV_c de 0,9 volts, ou seja, aproximadamente 4,7 minutos, para que não haja consumo da bateria de Lítium. Esta bateria possui uma carga de 170 mAh e deve ser utilizada somente para manutenção das configurações básicas e do RTC, no modo desativado. O modo desativado é o estado assumido pelo controlador após detectar a queda de tensão da bateria de 12 volts, ao menor valor tolerado pela etapa de regulagem da fonte. O módulo sensor permanecerá nesse estado até a manutenção de sua bateria, troca ou recarga. Neste modo desativado, o consumo do microcontrolador é de apenas 14 μA , o que garante a manutenção dos dados da memória e do relógio durante um período de até 12.140 horas.

4.7.3. Unidade de Sensores

O bloco da unidade de sensores foi desenvolvido em uma placa separada e removível, permitindo assim o uso alternativo de outros tipos de sensores. Na Figura 4.12 é mostrado o esquema de alimentação e multiplexação dos sensores de umidade. Todos os resistores deste circuito são de 1/8 watts

A unidade de sensores desenvolvida, para este protótipo, suporta a conexão de até três sensores de umidade e um sensor de temperatura agregado a um deles, preferencialmente no sensor instalado mais próximo à superfície, sendo esta configuração suficiente aos objetivos de monitoração do projeto.

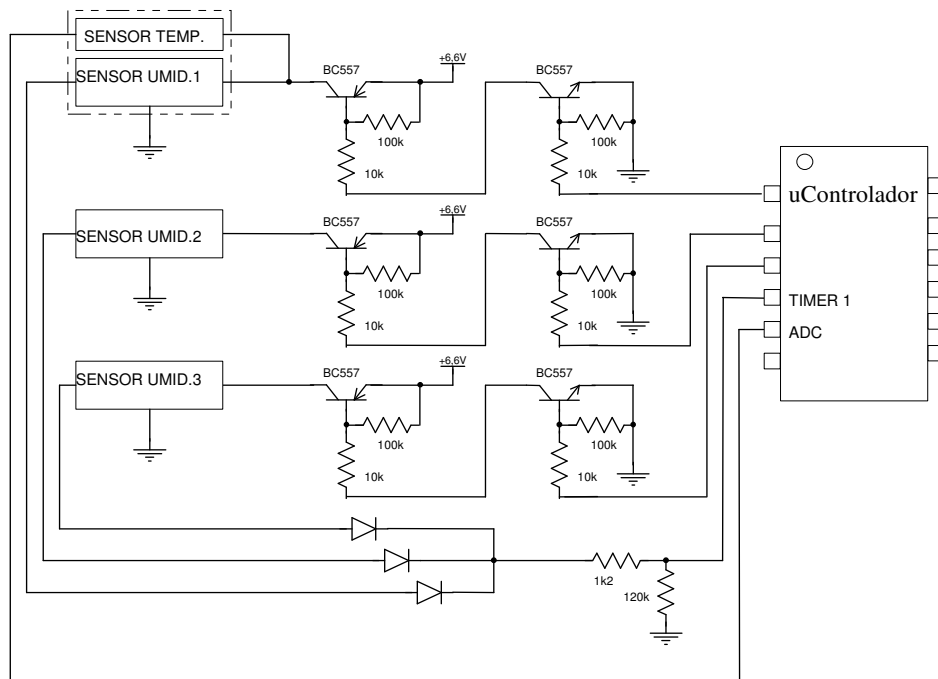


Figura 4.12. Esquema do circuito de controle dos sensores.

O *layout* das placas pode ser visto na Figura 4.13. A placa foi confeccionada no método de foto revelação positiva, em placa de fenolite de uma camada. A confecção das placas dos módulos remotos na forma circular tem o objetivo de modularizar o protótipo de forma compacta a ser acondicionado em peças de PVC, de fácil aquisição no comércio de equipamentos hidráulicos.

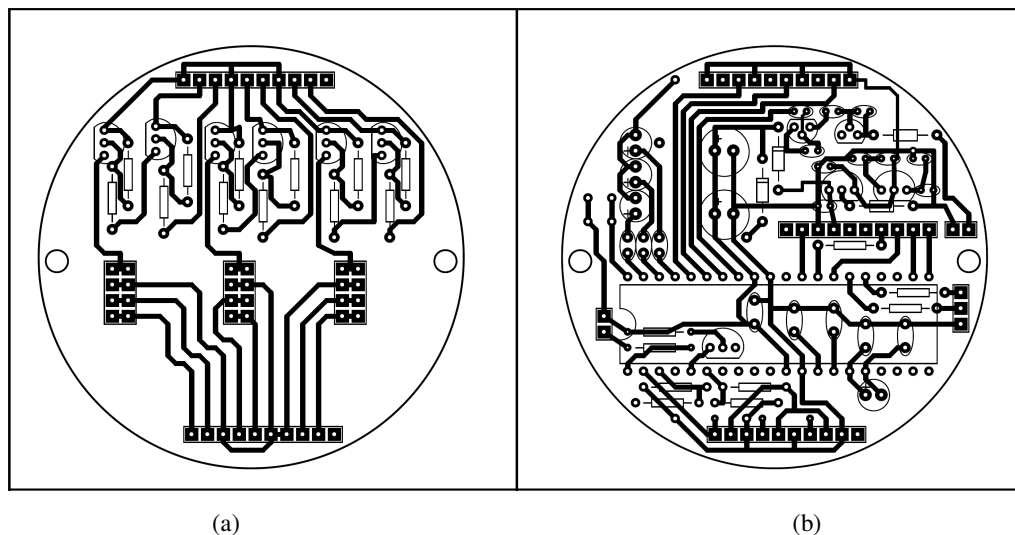


Figura 4.13. (a) Placa de sensores e (b) placa de processamento dos módulos remotos.

O uso dos tubos de PVC como embalagem do circuito traz várias vantagens a começar pelo fácil manuseio com ferramentas simples, comprovada resistência às intempéries de umidade e radiação do meio rural e ainda garantir uma relativa estética ao produto final. A modularização do circuito prevê ainda a conexão de mais camadas de placas, onde outros sensores, além dos já testados, poderão ser adicionados ao módulo e multiplexados por sua unidade de processamento. Na Figura 4.14 são mostradas as placas do módulo remoto conectadas e prontas para serem acondicionadas no tubos de PVC.

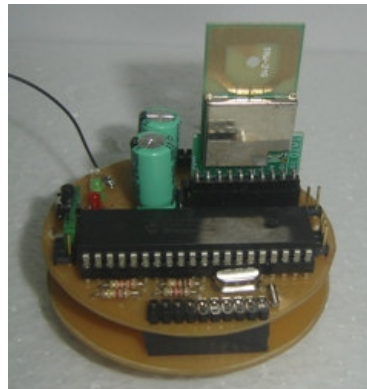


Figura 4.14. Placas do módulo remoto montadas e conectadas.

Os sensores de umidade utilizados no trabalho foram desenvolvidos, testados e validados no LEMA, medem a umidade do solo a partir da constante dielétrica da mistura solo, ar e água. Os sensores são constituídos de um circuito oscilador, cuja a frequência é definida pelo sensor capacitivo de entrada, o circuito é formado por um (Inversor *Schmitt-Trigger* com seis saídas) para dar maior definição aos sinais de entrada sem causar variação de atraso. Um contador de pulsos (contador/divisor de frequência de ondulação de 12 estágios com “vai um”). Na Figura 4.15 é mostrado o arranjo de placas para formação do sensor capacitivo e na Figura 4.16 é mostrada a montagem do protótipo do módulo sensor na peças de embalagem.

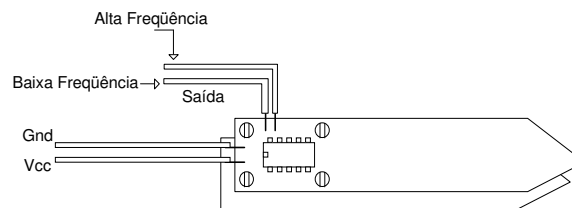
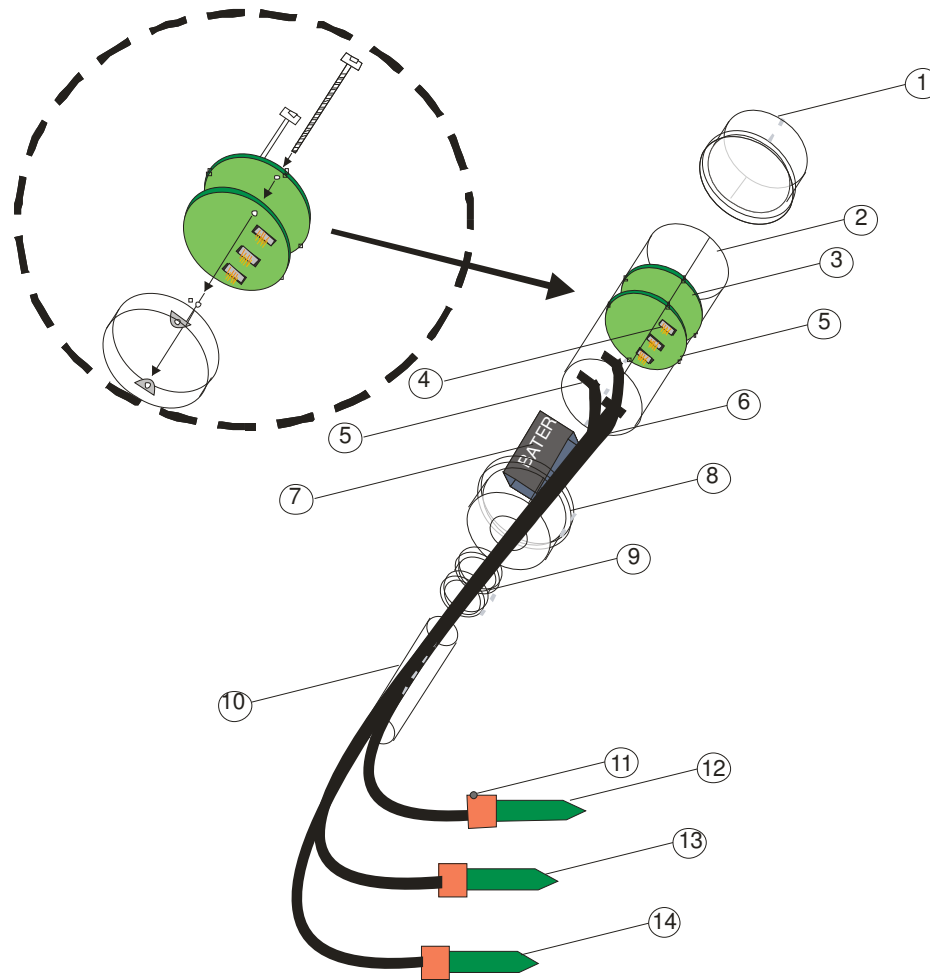


Figura 4.15. Arranjo das placas do sensor capacitivo.



1	Tampa superior (cap. 75 mm)	9	Bucha de redução 1/4 para 1"
2	Tubo PVC 3"	10	Cano de extensão 1"
3	Placa de processamento	11	Sensor de Temperatura embutido
4	Placa de sensores	12	Sensor de umidade – 1
5	Conectores da placa	13	Sensor de umidade – 2
6	Conectores dos Cabos	14	Sensor de umidade – 3
7	Cabos de extensão dos sensores		
8	Tampa inferior (cap. 75 mm)		

Figura 4.16. Montagem Interna do Módulo Remoto.

4.8. Interface de Controle e Aquisição de Dados

Foi desenvolvida uma interface de aquisição e controle implementada em linguagem C para realizar a comunicação entre o módulo mestre e um computador pessoal do tipo IBM-PC ou compatível, possibilitando a configuração dos módulos remotos via rádio e o armazenamento dos dados adquiridos.

A interface integra as ferramentas de acesso do operador aos recursos de ajuste do sistema para tomada de dados e organização dos módulos. Na Figura 4.17 é mostrada a tela principal da interface de controle e comunicação dos módulos. O objetivo principal da interface, nesta fase é a de auxiliar na depuração dos erros e testar, ainda que de forma primária, os recursos de comunicação. Através desta interface pode-se configurar remotamente via rádio, os parâmetros básicos dos módulos. O botão “Acquire AUTO” faz a coleta automaticamente e de acordo com o valor definido no campo “intervalo”, de uma seqüência de nós sensores definidos ainda na rotina.

As variáveis estão expostas no quadro da direita da área de trabalho da interface, onde o primeiro campo de cima para baixo “No” atribui um novo número ao módulo. O segundo campo “Soneca” faz o ajuste do intervalo de sono (modo *sleep*). O terceiro campo “Tacordado” define o intervalo de tempo em que o módulo ficará acordado monitorando o meio, com o rádio receptor ativado. O quarto campo “Taco.exten” refere-se a um incremento ao intervalo de tempo acordado quando o nó sensor detecta transmissão proveniente do módulo mestre, constituindo-se de uma margem de espera a um provável comando destinado ao seu endereço. Os dois últimos campos “Estabilização” e “Intervalo auto” são responsáveis pela configuração de leitura dos sensores, respectivamente pelo tempo de alimentação necessário para que o sensor atinja uma leitura estável e o intervalo de tomadas de dados, ou seja, a freqüência de aquisição.

O quadro à esquerda na interface é constituído das teclas criadas para os testes de comunicação dos módulos. Os botões se referem aos endereços fixos atribuídos aos módulos na etapa de configuração. Os botões com os endereços foram utilizados para os testes de comunicação direta dos módulos remotos com o módulo mestre. O botão “ADQUIRE CASCATA” foi montado para testar a comunicação em cascata, utilizando-se os quatro campos logo acima do botão para montar a seqüência de módulos. A seqüência configura da esquerda para a direita, sendo o primeiro módulo a origem e o último o destino.

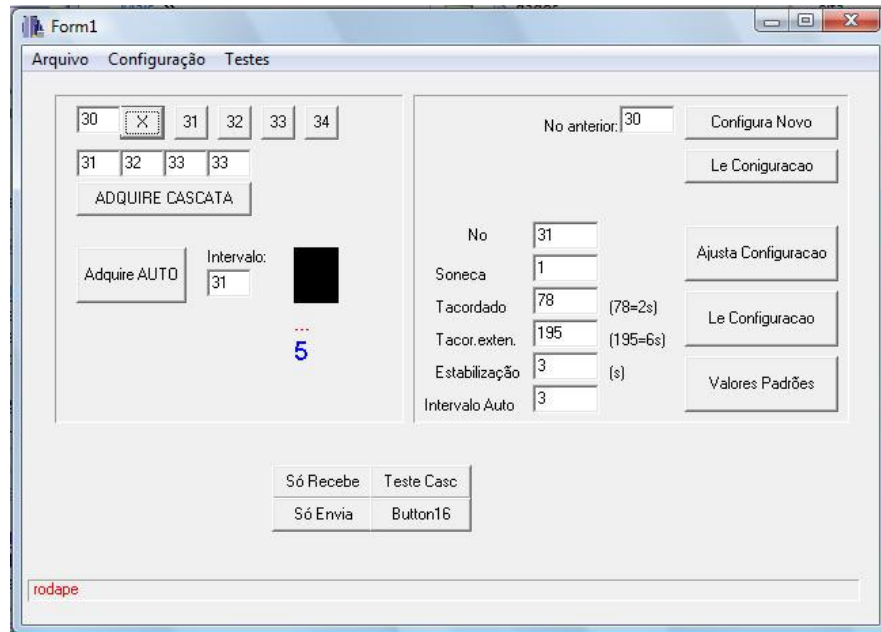


Figura 4.17. Tela Principal da Interface.

4.8.1. Dados Coletados

Na Figura 4.18 são mostrados dados coletados pelo módulo remoto, em testes no laboratório. Nesta coleta são dispostos em colunas, da esquerda para a direita, os itens:

- 1- Hora e data de envio do pacote;
- 2- Hora e data de realização da coleta;
- 3- O valor S30 se refere à identificação do módulo de origem dos dados;
- 4- As colunas FA, FB e FC são relativas aos três sensores de umidade, ou seja, as suas respectivas frequências. O valor zero, nas colunas de dados dos sensores, denuncia que neste instante não há nenhum instalado;
- 5- A coluna “BAT” declara a tensão real da bateria;
- 6- A coluna “TEMP” refere-se à temperatura medida.

Neste exemplo, já pode ser feita observação quanto ao comportamento, aparentemente instável, da temperatura. A variação dos valores é justificada por se tratarem das primeiras coletas, intervalo em que o sensor ainda não atingiu um bom equilíbrio térmico.

[21:31:37 19/11/2007][21:31:36 19/11/2007]	S30 FA=	0 FB=	0 FC=	0 BAT=11.44	TEMP= 24.6
[21:32:25 19/11/2007][21:32:24 19/11/2007]	S30 FA=	0 FB=	0 FC=	0 BAT=11.46	TEMP= 24.8
[21:33:13 19/11/2007][21:33:12 19/11/2007]	S30 FA=	0 FB=	0 FC=	0 BAT=11.46	TEMP= 23.6
[21:34:01 19/11/2007][21:34:00 19/11/2007]	S30 FA=	0 FB=	0 FC=	0 BAT=11.46	TEMP= 23.6
[20:21:14 20/11/2007][00:22:44 01/01/1970]	S30 FA=	0 FB=	0 FC=	0 BAT=11.44	TEMP= 27.5
[20:28:14 20/11/2007][20:28:15 20/11/2007]	S30 FA=	0 FB=	0 FC=	0 BAT=11.44	TEMP= 28.7
[20:32:15 20/11/2007][20:32:15 20/11/2007]	S30 FA=	0 FB=	0 FC=	0 BAT=11.44	TEMP= 28.2
[20:33:10 20/11/2007][20:33:03 20/11/2007]	S30 FA=	0 FB=	0 FC=	0 BAT=11.44	TEMP= 27.0
[20:34:14 20/11/2007][20:34:15 20/11/2007]	S30 FA=	0 FB=	0 FC=	0 BAT=11.44	TEMP= 27.7
[20:35:03 20/11/2007][20:35:03 20/11/2007]	S30 FA=	0 FB=	0 FC=	0 BAT=11.44	TEMP= 28.7
[20:35:50 20/11/2007][20:35:51 20/11/2007]	S30 FA=	0 FB=	0 FC=	0 BAT=11.44	TEMP= 27.5
[20:36:38 20/11/2007][20:36:39 20/11/2007]	S30 FA=	0 FB=	0 FC=	0 BAT=11.44	TEMP= 28.2
[20:37:26 20/11/2007][20:37:27 20/11/2007]	S30 FA=	0 FB=	0 FC=	0 BAT=11.44	TEMP= 28.5

Figura 4.18. Dados de temperatura e tensão da bateria coletados

Os dados depois de adquiridos são organizados e tratados em planilha eletrônica do tipo Excel ou Origin. O exemplo já denota a possibilidade de avaliação do desempenho de consumo da bateria. Esta variável definirá o tempo de vida do módulo sensor. A melhor administração, dos recursos de energia da rede, está relacionada à frequência na coleta dos dados. A forma como os dados devem ser coletados está intrinsecamente relacionada com o tipo de controle que se deseja implementar ou com o fenômeno ao qual se pretende monitorar. Os protocolos que controlam os intervalos de atividade e inatividade (modo *sleep*) formam outra área de desenvolvimento dentro do contexto das RSSF e devem ser transparentes ao operador da rede, que não tem o interesse de explorar esse tema e que se limita ao uso dos sensores em pesquisas de monitoramento e controle.

4.9. Conclusões do Capítulo

A partir das especificações definidas no Tópico 4.2. e da adoção de uma metodologia de trabalho baseada nas modelagens e simulações, matrizes de contato e placas de desenvolvimento, conseguiu-se desenvolver o *hardware* e o *software* de maneira prática e eficiente, ganhando-se tempo e reduzindo-se as perdas de materiais.

O processo de desenvolvimento dos módulos remotos e estação base (unidade mestre), desde o projeto à montagem, foram executados no Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA), do departamento de Engenharia Agrícola da UFC. O trabalho serviu para definir as necessidades de instrumentação e testar os recursos já disponíveis no laboratório. A montagem dos módulos atingiu os objetivos funcionais, almejados para uma primeira versão, de um sistema de monitoramento sem fio, ainda experimental.

Os testes de bancada revelaram a funcionalidade da fonte de alimentação, do processamento e comunicação dos blocos constituintes do sistema. A fonte do módulo remoto atendeu às expectativas de controle de consumo e ajuste das tensões necessárias para o funcionamento dos sensores e módulo transceptor.

O uso do padrão de comunicação serial RS232, por ser uma maneira muito difundida e de baixo custo atendeu satisfatoriamente à comunicação entre o módulo mestre e o computador. Entretanto essa etapa deixa clara a necessidade de investimento em trabalhos futuros, no padrão USB de conexão dos módulos com computadores pessoais.

O transceptor Laipac TRW-24G utilizado foi programado e utilizado parcialmente ficando muito de seus recursos ainda disponíveis para serem explorados em futuros trabalhos, relativos ao controle da potência do sinal de transmissão e ganho na recepção, utilização de seu segundo receptor independente e seu modo de baixo consumo stand-by. O preço do módulo é outra motivação para o teste de outros transceptores ou mesmo o desenvolvimento de um módulo de comunicação baseado em *microchips* transceptores de menor custo e disponíveis no comércio.

O microcontrolador da Microchip utilizado neste trabalho foi o modelo PIC18F4550, escolhido por ser o mais completo de sua categoria e composto de vários recursos, os quais permitiram, durante o desenvolvimento do hardware, maior flexibilidade no ajuste e depuração de erros. Outro fator positivo na utilização deste microcontrolador na primeira versão do sistema de sensoriamento remoto foi a redução de circuitos externos do

tipo memórias, AD's ou mesmo relógios de tempo real, unidades que foram implementadas no próprio microcontrolador de cada unidade.

O uso dos tubos de PVC como embalagem dos circuitos revelou-se bastante prática e robusta para a exposição às intempéries do meio de monitoramento proposto.

A interface de aquisição e controle implementada em linguagem C para realizar a comunicação entre o módulo mestre e um computador pessoal do tipo IBM-PC possibilitou a configuração dos módulos remotos via rádio e os testes de aquisição e armazenamento dos dados adquiridos. Contudo, ainda é necessário o aperfeiçoamento das ferramentas de roteamento da rede e conversão das unidades de controle dos módulos para variáveis mais interativas e claras para operadores leigos.

Os módulos sensores testados em laboratório, nesta etapa, já se apresentam aptos a aplicações de monitoramento em ambientes internos.

No próximo capítulo são apresentados novos testes de laboratório aos quais os módulos foram submetidos, bem como os primeiros testes de campo montados em uma área de cultivo irrigada, experimentando as reais dimensões do campo de aplicação.

Capítulo 5

Estudo de Caso

Neste Capítulo é apresentado um estudo de caso que ilustra como o sistema proposto nesta dissertação, uma plataforma de coleta de dados sem fio, pode ser utilizado em aplicações de monitoramento remoto. O estudo de caso consiste na avaliação dos parâmetros básicos de funcionamento do sistema em condições de campo. A visualização do desempenho dos módulos é relacionada às condições da área de testes, suas dimensões, obstáculos e características da cultura a ser monitorada.

Na Seção 5.1 são apresentadas as características da cultura, relevantes ao dimensionamento real de uma rede. O número de sensores por ponto de coleta, o tempo de funcionamento da rede e a quantidade de dados por unidade de tempo são alguns dos parâmetros definidos pelas características da cultura explorada, do tipo de solo e clima da região. Na Seção 5.2 é descrita a operação de configuração dos módulos. Na Seção 5.3 é detalhado o processo de instalação dos módulos no ponto de observação. E, por fim, na Seção 5.4 é apresentada uma avaliação da eficiência do sistema, justificando a viabilidade de sua aplicação.

5.1. Condições de teste

A área de teste é uma propriedade do Baixo Acaraú, localizada na região norte do Estado do Ceará, no trecho final da bacia do rio Acaraú. A área faz parte do perímetro irrigado do Baixo Acaraú, projeto de irrigação iniciado pelo DNOCS em 1983 e que entrou em funcionamento operacional no início de 2001.

O acesso ao perímetro é feito a partir da cidade de Fortaleza pela BR 222, até a cidade de Umirim, e, em seguida, pela CE-016. A propriedade utilizada para os testes fica no município de Marco e suas coordenadas geográficas são 3°06'55" S e 40°05'47" W.

O clima da região é o Aw Tropical Chuvoso, com uma precipitação média anual de 900 mm, atingindo a temperatura mínima anual de 22,8° C, máxima anual de 34,7° C e média anual de 28,1° C. A insolação na região é de 2.650 h/ano e a velocidade média dos ventos é de 3,0 m/s. A evaporação média anual é de 1600 mm (DNOCS, 2008).

Os solos da região, em geral, são profundos, bem drenados, de textura média ou média leve e muito permeável.

A região é atualmente produtora de abacaxi, banana, melão, melancia, feijão e milho. A propriedade utilizada para os testes tem 8 hectares, sendo 200 m de frente e 400 m de lateral. Dentro da propriedade, a área cultivada atualmente com melancia é de 1,1 hectares, sendo as dimensões de 100 m de frente por 110 m de lateral. Nesta área foi instalada a malha hidráulica do sistema de irrigação, dividindo-se em 32 linhas de 110 metros com espaçamento de 30 cm entre os gotejadores.

A melancia era a cultura explorada no momento dos testes, já em sua fase final de desenvolvimento e às vésperas da colheita.

O fruto é uma planta herbácea de ciclo vegetativo anual. O sistema radicular é extenso, mas superficial, com um predomínio de raízes nos primeiros 60 cm do solo. Os caules rastejantes são angulosos, estriados e ramificados.

As exigências climáticas da cultura da melancia são semelhantes às do melão, sendo, entretanto, um pouco mais exigente em temperatura. A cultura necessita de um período livre de chuvas e de temperaturas médias elevadas, sendo também, uma cultura muito exigente em intensidade luminosa.

Os solos devem ser férteis, ricos em matéria orgânica. Os solos pesados ou com riscos de encharcamento devem ser evitados, por ser esta, uma cultura que exige bom arejamento do solo.

A cultura apresenta, ainda, um grande desenvolvimento vegetativo, o que pode tornar a evapotranspiração muito elevada. A melancia é uma cultura tolerante à seca, mas obtém-se maior produtividade com a irrigação.

O sistema de irrigação adotado na propriedade é o de gotejamento, segundo a literatura, com rendimento de aproveitamento de água em torno de 80 %. O sistema usa linhas de gotejadores para cada fileira de plantas, formando uma faixa contínua de distribuição de água. A meta desse sistema é evitar déficit hídrico espacial na zona padrão de exploração das raízes, consistindo em um dos sistemas mais eficientes em rendimento de água. A pressurização da malha hidráulica é garantida por uma bomba com potência de 3 (três) cv.

A maior eficiência da irrigação é alcançada com o conhecimento das exigências de cada espécie com a qual se está trabalhando e do período crítico ao déficit hídrico, do início até o amadurecimento do fruto. O adequado suprimento de água nessa fase proporciona melhor desenvolvimento da planta, produção, peso médio e maior número de frutos.

O esquema da malha hidráulica de irrigação pode ser visto na Figura 5.1 onde os pontos de gotejamento são instalados próximos aos locais de eclosão da planta. O gotejador é formador de uma região úmida tridimensional chamada bulbo úmido. A região do bulbo é

onde devem ser instalados os sensores capacitivos de umidade assunto que será tratado no Tópico 5.3, Instalação dos Módulos.

Os sensores capacitivos foram instalados logo após o plantio das sementes e foram utilizados para o manejo da irrigação em todas as etapas de desenvolvimento da cultura. A área de cultivo foi dividida em duas sub-áreas, onde uma foi escolhida para instalação dos sensores. O critério utilizado para distribuição de sete pares de sensores, entre as 32 sub-linhas da malha hidráulica foi aleatório. A organização das linhas e a localização dos sensores, dentro da área, são mostradas na Figura 5.1.

Cada ponto monitorado é constituído de dois sensores capacitivos, posicionados no primeiro terço do comprimento da linha de gotejadores, próximos à adutora principal, em profundidades diferentes. A coleta de dados nos sensores, durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura, foi manual. O operário rural foi previamente treinado a utilizar um instrumento de medição, um freqüencímetro portátil e uma fonte regulada, alimentada por bateria. A fonte com baterias é utilizada para energização dos sensores instalados no solo.

As medidas são coletadas duas vezes ao dia, uma em cada turno, onde o funcionário percorre os pontos onde foram instalados os sensores, conectando-os ao aparelho de medida e registrando os dados em uma planilha. Os dados, respectivos ao primeiro turno, eram então, ditados, por telefone, para um aluno responsável em inserir as informações em uma planilha eletrônica de cálculo do tempo de vazão para o próximo intervalo de irrigação.

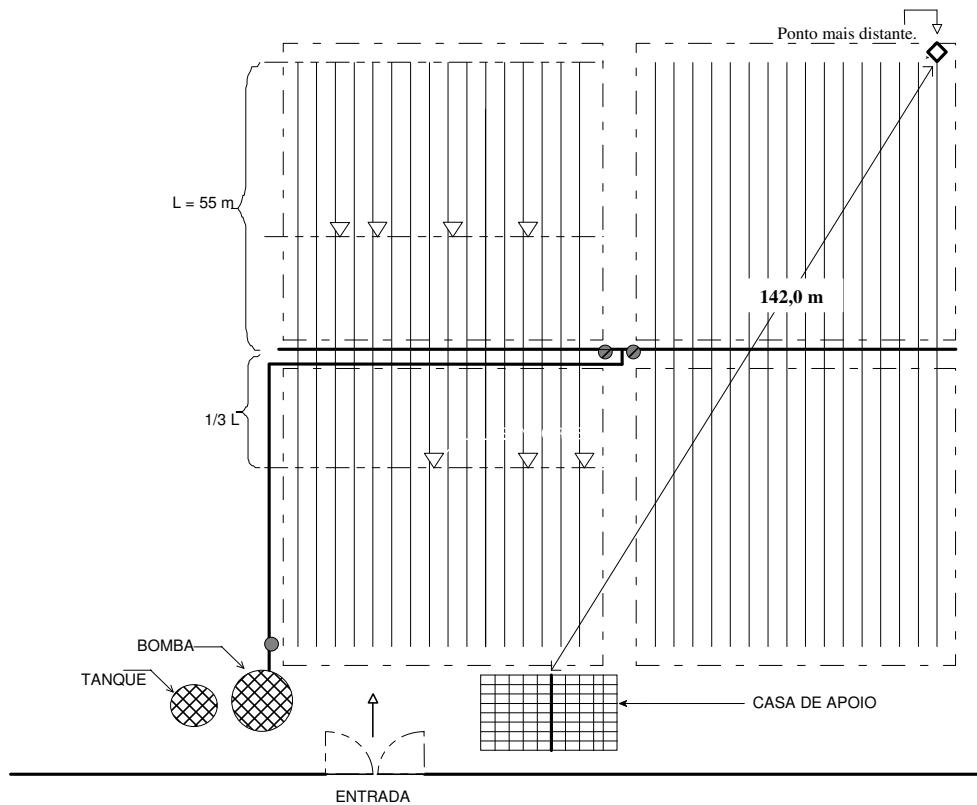


Figura 5.1. Esquema da malha hidráulica e distribuição dos sensores na área irrigada.

5.2. Configuração dos Módulos Remotos

Os módulos mestre e escravo foram instalados na área descrita no tópico 5.1. O protocolo usado nesse teste tinha o objetivo de avaliar o alcance e a quantidade de dados recebidos em função da distância. A maior distância encontrada dentro da área explorada foi de 142 m, conforme ilustrado na Figura 5.1

A primeira etapa de configuração dos módulos é feita ainda na casa de apoio, com as baterias escolhidas para os testes totalmente carregadas. Nesta fase, o módulo encontra-se, ainda, com o número de identificação padrão, o número 30 (trinta). Os módulos devem então ser ligados e configurados um a um remotamente e, para isso, deve-se iniciar a interface com PC e sua comunicação com o módulo mestre. A confirmação da conexão serial do módulo mestre com o PC é verificada quando, no rodapé da interface, aparecer a resposta “RS232 OK” conforme mostrado na Figura 5.2.

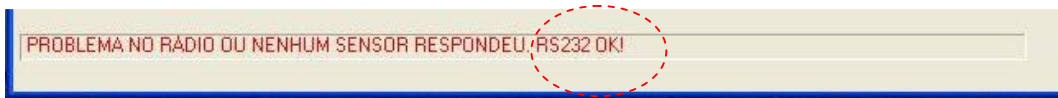


Figura 5.2. Resposta de comunicação com o módulo mestre.

A configuração do primeiro módulo é iniciada com a confirmação de comunicação via transceptores. Para isso deve-se entrar com os parâmetros nos campos de configuração da interface conforme pode ser visto na Figura 5.3. No teste de comunicação, utilizou-se o comando da interface “Le Configuração”.

No anterior:	30	Configura Novo
		Le Configuracao
No	31	Ajusta Configuracao
Soneca	1	Le Configuracao
Tacordado	78 (78=2s)	Valores Padrões
Tacor.exten.	195 (195=6s)	
Estabilização	3 (s)	
Intervalo Auto	1	

Figura 5.3. Parâmetros de configuração dos módulos remotos

O módulo deverá responder com sua configuração padrão. Para a primeira comunicação devem ser feitas algumas tentativas até uma confirmação. Caso não se consiga tal confirmação, o módulo remoto deve ser *resetado*, a conexão com a bateria revista e o módulo reiniciado. A re-inicialização do módulo é confirmada com uma piscada seriada nos três Led's de cores diferentes, dispostos na placa de processamento do módulo sensor, utilizados para visualização do estado de funcionamento do circuito.

A resposta do módulo é visualizada através da barra no rodapé da interface. As informações visualizadas são data e hora do computador, data e hora da aquisição dos dados, identificação do módulo sensor, SONECA (*intervalo sleep*), TACOR, TAE, TE e ILA visualizadas no rodapé da interface (Figura 5.4).

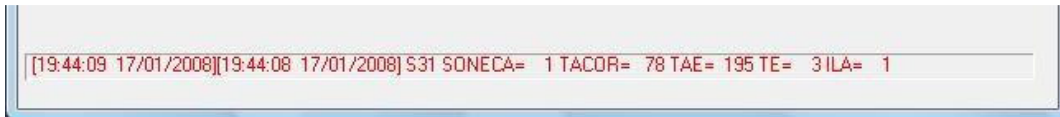


Figura 5.4. Resposta com a configuração do módulo remoto.

A configuração do primeiro módulo irá defini-lo com um novo número de identificação. Para isso, basta modificar, se necessário, o valor no campo “No”, novo módulo, por exemplo, pelo número 31 (Trinta e Um). Feita a alteração no campo deve-se pressionar na interface o botão “Configura Novo”. A resposta de confirmação é vista no rodapé, com a nova configuração do módulo. Os parâmetros de configuração podem ser gravados todos de uma única vez ou individualmente a critério do operador.

Para o teste executado na propriedade, foram escolhidos parâmetros de intervalo de coleta e sono, bem estreitos, com o objetivo de avaliar o consumo da bateria do módulo remoto e a quantidade de dados recebidos. A condição de maior frequência na coleta de dados, para a aplicação, se encontra na fase de avaliação do comportamento hídrico do solo, ou seja, o fenômeno observado é o de infiltração e de depleção de água no solo. O conhecimento deste processo requer uma maior quantidade de dados em um menor intervalo de coleta, algo em torno de 24 horas. O gráfico mostrado na Figura 5.5 nos dá uma idéia do comportamento hídrico do solo da região. Os dados foram coletados a partir de sensores monitorados via cabo com uma taxa de aquisição de três tomadas a cada 5,2 segundos. Neste gráfico os dados ainda estão em valores de frequência segundo a resposta dos sensores em função da umidade. A Figura 5.6 apresenta os mesmos valores já tratados no gráfico da Figura 5.5 entretanto os valores agora foram convertidos para o percentual de umidade relativa à capacidade de retenção do solo da área de monitoramento. O trabalho de dissertação de Oliveira em 2008 com o título “Avaliação do Sensor de Umidade TOPDEA no manejo da irrigação”, apresenta a técnica utilizada para obtenção da equação que relaciona a umidade do solo com a resposta de frequência dos sensores capacitivos.

O maior conhecimento do comportamento hídrico do solo definirá a curva característica de retenção da umidade. A informação é utilizada para o dimensionamento da malha hidráulica e da estimação dos ciclos de irrigação.

A diferença entre a coleta de dados realizada com fio e a implementada com os módulos de rádio, diz respeito ao principal fator limitante, a fonte de energia. No caso da coleta feita via cabo, a alimentação dos sensores pode ser contínua, garantida por uma fonte ligada à rede de energia, ou mesmo com baterias mais robustas. Entretanto no caso dos

módulos remotos, contamos apenas com baterias de pequena carga, e para garantia de sua longevidade, é necessário administrar com maior eficiência a alimentação dos sensores.

A definição do menor tempo para estabilização da leitura dos sensores foi extraída de testes realizados no LEMA, com a bancada de calibração dos sensores capacitivos. O valor encontrado nesses testes foi de três segundos, para cada sensor multiplexado, valor configurado no campo de parâmetro “TE” (Tempo de Estabilização do sensor) da interface.

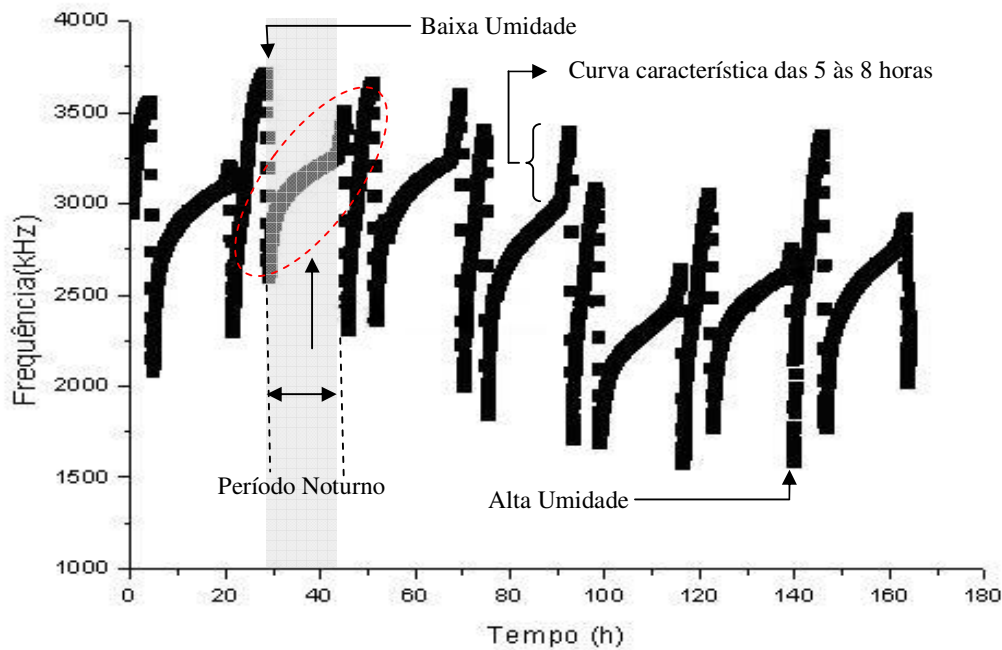


Figura 5.5. Gráfico do comportamento hídrico do solo em frequência.

O gráfico da Figura 5.5 revela, ainda, característica do comportamento hídrico do solo, mostrando um maior tempo de retenção da umidade no período noturno. A explicação para tal comportamento são as baixas temperaturas neste período somado-se à pequena necessidade hídrica da planta na fase escura da Fotossíntese. A maior frequência ocorre entre as cinco e oito horas da manhã, intervalo em que o sol nasce e ocorre a explosão de crescimento do fruto. A utilização dessa observação, na configuração da rede, permite a redução da frequência de coleta neste período. O recurso de redução da frequência na coleta de dados é muito conveniente quando se almeja a utilização da rede de sensores em uma malha de controle, por permitir um maior aproveitamento de carga das baterias dos módulos sensores. O conhecimento da curva característica de umidade de solo promove uma maior adaptação do sistema às tomadas críticas dos valores limiares, ou seja, investindo mais

energia na precisão de captura do melhor momento de início e término da irrigação. A menor frequência de coleta, poupando as baterias, fica então reservada ao longo intervalo de infiltração e retenção da umidade, processo posterior à irrigação, e que depende de dados do solo, do clima e da cultura.

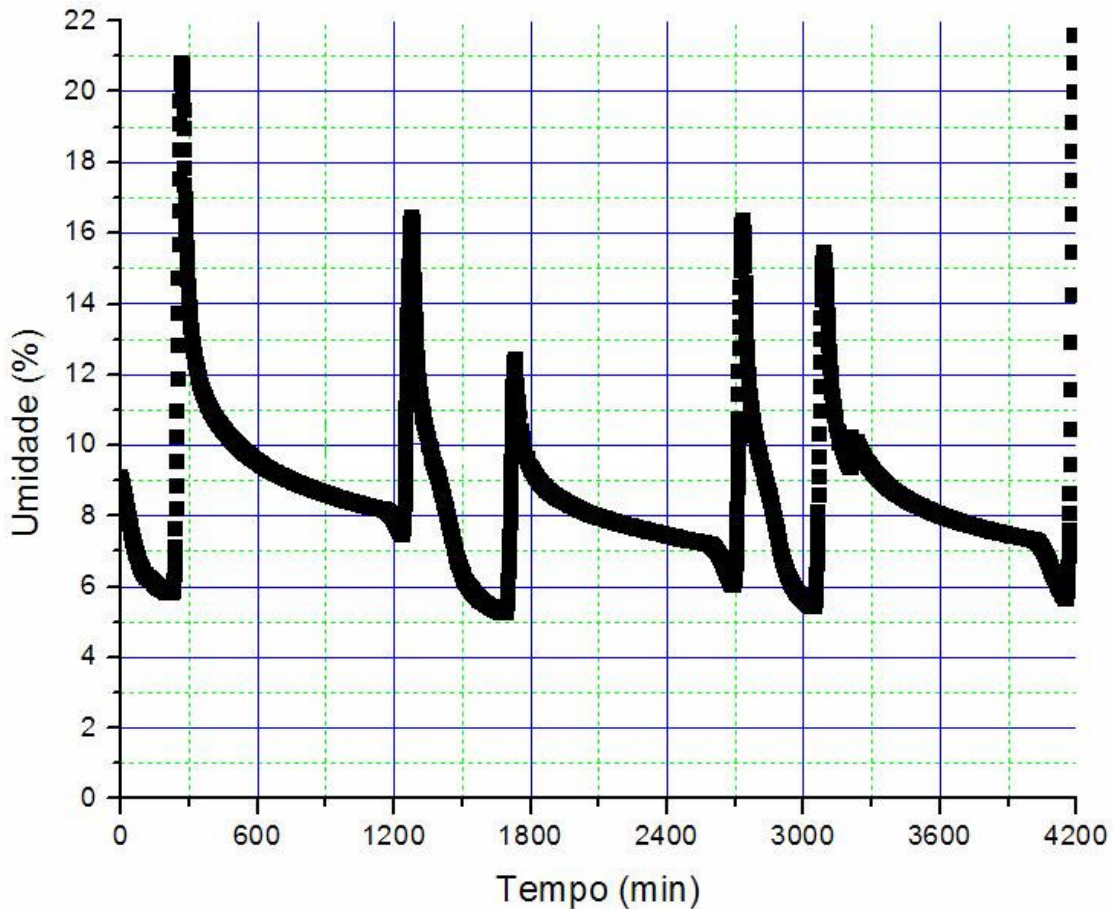


Figura 5.6. Gráfico do comportamento hídrico do solo em umidade percentual (OLIVEIRA, 2008).

A Figura 5.7 apresenta uma menor amostra tomada na escala de tempo da Figura 5.6, permitindo observar com mais detalhes a lenta redução de 2% na umidade, fenômeno que ocorre das 18 às 5 h, ao passo que a redução torna-se acentuada no curto intervalo entre 5 e 6 h atingindo 0,8% e significando que, praticamente 28,6% da ETc ocorrida entre o intervalo de 18 às 6 h aconteceu na primeira hora de luz. Na Figura 5.7 é possível identificar com distinção o comportamento hídrico do solo nos períodos diurno e noturno.

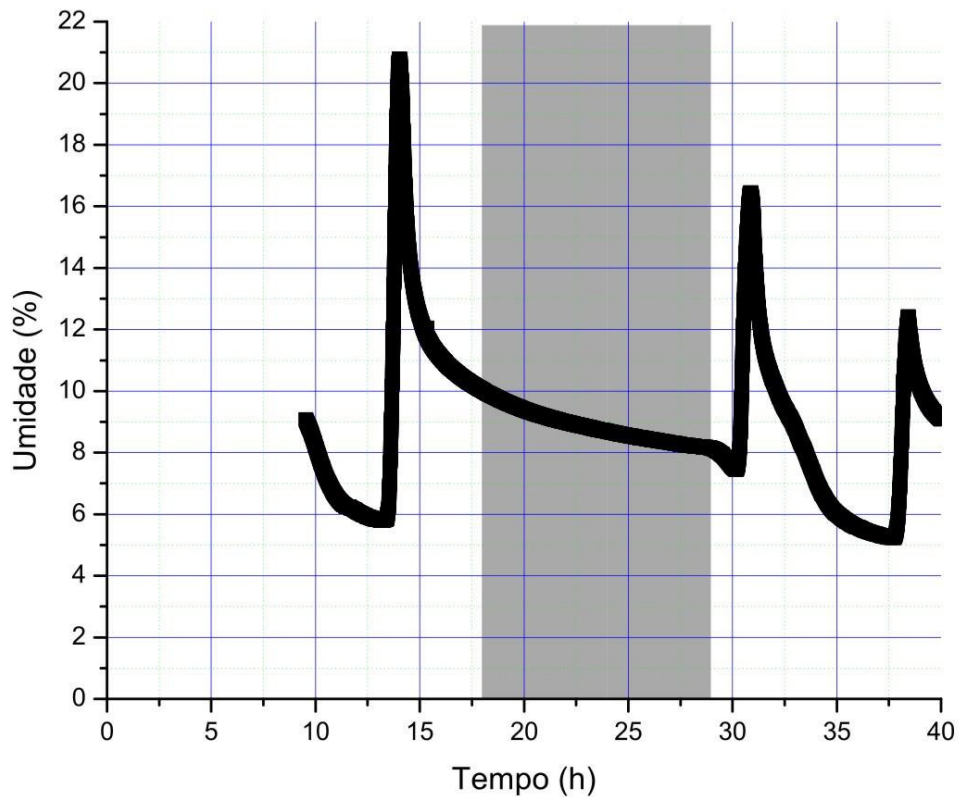


Figura 5.7. Detalhe da perda de umidade no período noturno (OLIVEIRA, 2008).

A variação automática no número de coleta de dados, dentro do intervalo de um ciclo de irrigação, é uma função que exige um maior grau de inteligência por parte dos algoritmos de controle dos módulos sensores. O controle inteligente está relacionado com a definição de um instante seguro para a próxima leitura dos sensores, pois a partir do conhecimento prévio da curva característica de umidade do solo pode-se estimar, a cada leitura, um intervalo seguro para a próxima tomada de dados. O objetivo é garantir o acompanhamento eficiente da umidade do solo combinado à otimização no consumo das baterias em aplicações onde o monitoramento da umidade tem como função o controle da irrigação. Entretanto, não coube na proposta desse trabalho explorar o desenvolvimento dessas rotinas, ficando como uma proposta de trabalho futuro.

5.3. Instalação dos módulos

A instalação dos módulos deve considerar um conjunto de parâmetros relacionados às características da cultura, da região e dos limites operacionais do sistema. As características referentes ao tipo de cultura já foram bastante discutidas no primeiro tópico do capítulo e são relativas à melancia. O intervalo do ciclo produtivo, da semeadura à colheita, define o primeiro parâmetro no dimensionamento dos módulos, o tempo de vida da rede de sensores. As baterias deverão ter condições de manter o sistema ativo durante todo o ciclo de cultivo. No caso da cultura da melancia, trabalha-se com períodos estimados em sessenta dias. A rede deve comportar recursos para manutenção da coleta de dados durante todo o processo, pois é com esse foco que a capacidade das baterias e o número de sensores utilizados devem ser definidos.

Os sensores de umidade foram instalados em profundidades de 5 cm e 15 cm e os cabos conectados ao módulo, conforme é visto na Figura 5.6.

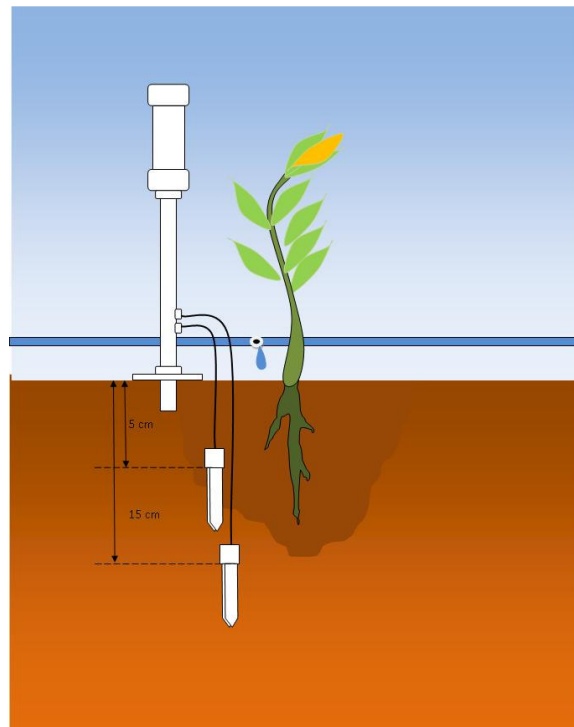


Figura 5.6. Instalação do módulo com sensores de umidade no solo.

5.4. Testes Realizados no Laboratório

Utilizando dois sensores de umidade capacitivos e um de temperatura, foi possível fazer uma estimativa do tempo de latência de um módulo sensor. Os sensores capacitivos de umidade do solo revelaram um consumo de 92,4 mW, quando o dielétrico entre seus terminais é somente o ar, ou seja, quando o sinal de resposta do sensor alcança as mais altas frequências. Mesmo durante os períodos de baixa umidade do solo a corrente ainda não alcança esse limite por termos como dielétrico, a mistura de solo e ar. A corrente de alimentação dos sensores cai para 10 mA, quando totalmente imerso em água. O consumo médio do transceptor é de 34,65 mW para transmissão e 59,4 mW para recepção. Nesta configuração a quantidade de energia gasta pelo sensor é muito maior que a quantidade gasta pelos outros dispositivos consumidores, considerando para esta conclusão, que foi dedicado a cada sensor de umidade um intervalo para estabilização de três segundos, tempo em que o sensor é alimentado continuamente. Os módulos foram montados para trabalhar com até três sensores de umidade e um de temperatura fator que multiplica o consumo de energia do processo de coleta. No Gráfico da Figura 5.7 é mostrado o consumo da bateria em um teste de bancada com um módulo remoto enviando dados a uma taxa de dezesseis segundos.

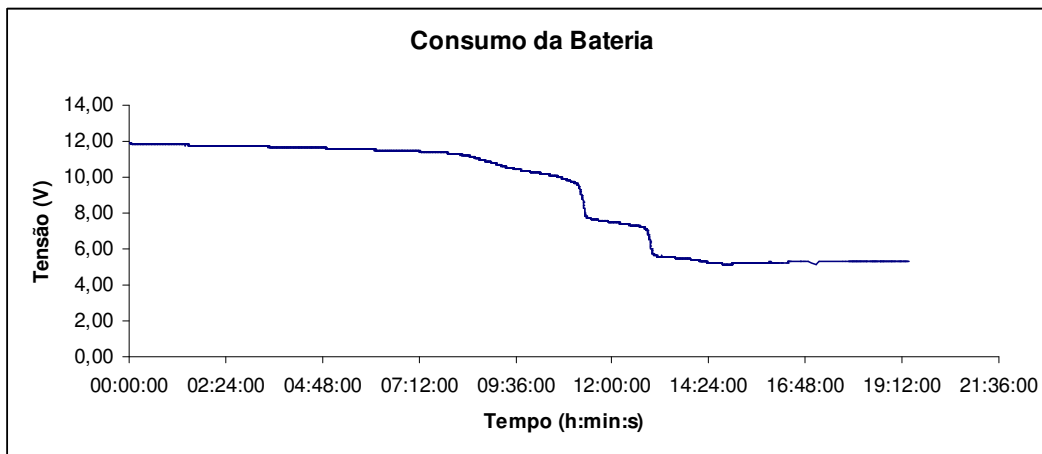


Figura 5.7. Variação da tensão da bateria do módulo remoto com dois sensores de umidade.

Os sensores de umidade utilizados foram colocados em situações distintas, com um imerso em água e outro suspenso no ar. A curva característica da variação de tensão da bateria serve para orientação no dimensionamento da frequência de leituras no monitoramento de um de um dado processo. No teste a tensão mínima na bateria, para a qual o regulador do módulo manteve estável a tensão de alimentação dos sensores foi de aproximadamente 8 volts. Abaixo dos 8 volts as leituras devem ser ignoradas por não mais apresentarem precisão nas medidas tomadas.

As observações relativas ao consumo da bateria, quando submetida a protocolos de intenso envio de pacotes, abrem caminho para avaliação do custo de energia dispensado ao excessivo envio de pequenos pacotes de dados para acompanhamento de um evento em tempo real. A utilização da memória EEPROM do microcontrolador deve ser um recurso considerado quando na aplicação se almeja a observação e não o controle. O envio de pacotes maiores, com mais de uma tomada, pode ser suficiente, até mesmo em aplicações de controle, onde as variáveis monitoradas demandam de longos intervalos até a aproximação dos valores críticos. O tratamento de um Sistema de Tempo Real deve ser capaz de oferecer garantias de correção na sua atuação, conforme sua restrição temporal.

A distribuição dos módulos remotos foi realizada na área de plantio experimental, do departamento de Engenharia Agrícola. Na Figura 5.8 é mostrada a área onde foram realizados os testes de distribuição dos módulos para comunicação *multi-hop*. As posições foram adquiridas com o uso de um GPS e depois lançadas no *Google Earth* para aquisição da imagem com os respectivos pontos geográficos.

Na tabela 5.1 são mostradas as posições dos pontos de distribuição dos módulos remotos e mestre e suas distâncias relativas.



Figura 5.8. Distribuição geográfica dos módulos no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola .

TABELA 5.1. Coordenadas UTM e distâncias (m) da distribuição dos módulos em *multi-hop*.

Posições	Lema (Mestre)	Ar-Cond (P1)	Árvore (P2)	Cerca (P3)
Coordenadas				
Y =	9.585.953	9.585.956	9.585.945	9.585.945
X =	546.533	546.505	546.484	546.435
Distância relativa ao módulo mestre (m):		28,16026	49,64877	98,32599
Distância relativa ao módulo (P1) (m):			23,70654	70,85901

Nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 são mostradas as topologias de comunicação entre os módulos, testadas em laboratório.

Na Figura 5.9 é mostrado o teste em que os módulos foram organizados em série, de maneira que o sensor S31 fica responsável de transmitir os pacotes de dados enviados aos módulos S32 e S33, sendo o módulo com maior atividade de transmissão e recepção e por consequência consumindo mais energia de sua bateria do que os demais.

O tempo de vida da rede está diretamente relacionado com a integridade funcional e carga de energia do módulo S31, ou seja, em determinado instante a rede terá os módulos S32 e S33 ativos, porém, sem uma rota de comunicação com o módulo mestre. A distância de 230m ilustrada nessa configuração é a sugerida pelo fabricante dos módulos transceptores e alcançada em situações livres de obstáculos como árvores e paredes.

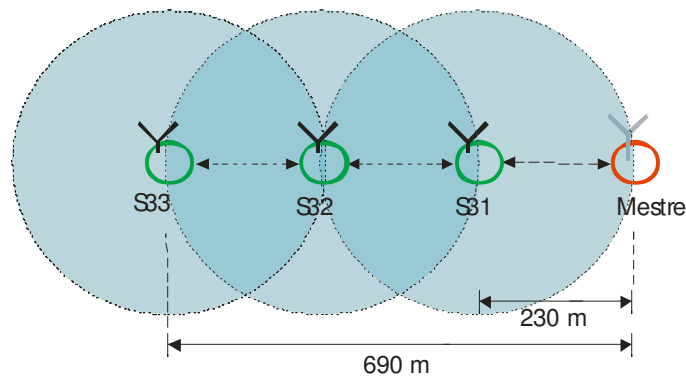


Figura 5.9. Os módulos organizados em série.

A solução para redução da sobrecarga de comunicação, sobre um único módulo, pode ser a alternância das rotas entre os módulos que se encontram fora da área de alcance do módulo mestre. Na Figura 5.10 é apresentada a topologia em uma situação em que o módulo S31 tem duas opções de rotas.

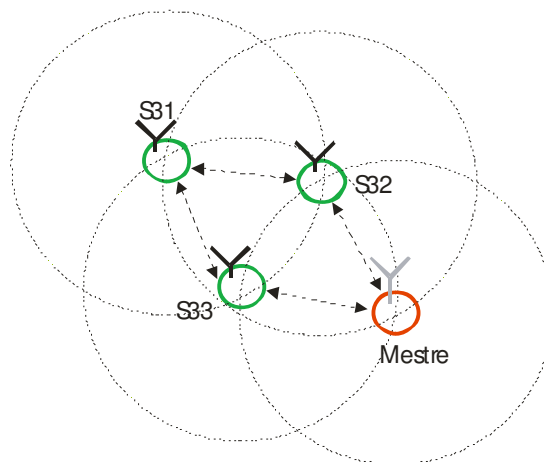


Figura 5.10. Rotas alternativas para módulos fora do alcance do mestre.

A alternância entre as rotas pode ser contínua ou seletiva durante um ciclo de coleta. Conforme o critério da aplicação pode ser feita uma escolha entre os módulos S32 ou S33. O selecionado será o primeiro a ser ativado e usado como rota do módulo S31 até que sua carga atinja o limite mínimo. O módulo S32 permanece em repouso até o comando de ativação do mestre, passando a ser uma nova área de monitoramento e também uma nova rota para o módulo S31.

Dentre as topologias testadas, a que se revelou mais simples e fácil de ser implementada é a mostrada na Figura 5.11. A simetria, nas distâncias e na distribuição dos nodos sensores garante maior segurança no sincronismo da comunicação com o módulo mestre.

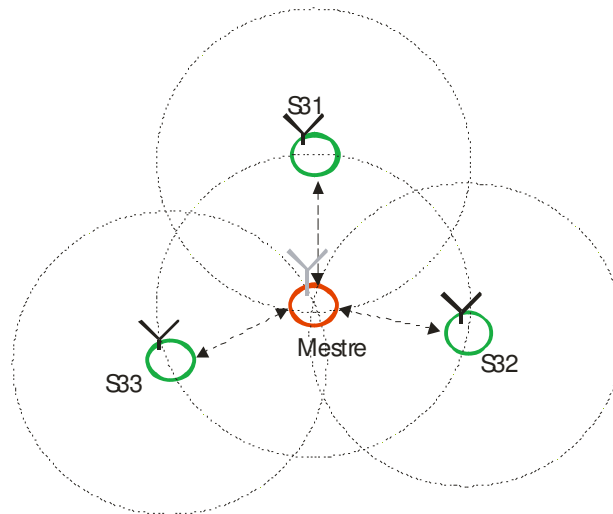


Figura 5.11. Topologia com módulos líderes.

As rotinas *multi-hop* foram testadas nas proximidades do LEMA, com os módulos expostos aos ruídos do ambiente urbano apresentando bom desempenho, com cobertura de distâncias favoráveis à aplicação nas topologias apresentadas.

5.5. Testes Realizados no Campo

O principal objetivo do teste em campo era avaliar a distância máxima entre os módulos, por isso o teste foi limitado à utilização de somente um par de módulos, mestre e escravo.

O procedimento de instalação do módulo remoto foi realizado pelo funcionário da propriedade, conforme é mostrado na Figura 5.12 e se revelou bastante prático. Antes da conexão dos sensores ao módulo era feita uma última leitura dos sensores com um freqüencímetro manual, para confirmação do seu funcionamento. Os dados eram anotados e o

procedimento de conexão dos cabos realizado. Imediatamente após a conexão dos cabos o módulo mestre começa a receber os valores coletados nos sensores. Os valores recebidos são, então, comparados com os valores anotados antes da conexão e caso ocorram pequenas diferenças, estas são registradas e passam a fazer parte da equação de calibração dos sensores na planilha de cálculo da umidade.



Figura 5.12. Instalação do módulo por um operário da propriedade.

Nos testes realizados no campo foi possível se estabelecer *links* diretos de comunicação entre os módulos em todos os pontos onde já existiam sensores instalados. O esquema de distribuição espacial dos sensores já foi mostrado na Figura 5.1, onde é visto, também, um ponto extremo da área de testes, simbolizado pelo ponto amarelo, distante aproximadamente 142 metros do módulo mestre, instalado na casa de apoio da propriedade. Neste ponto de alcance foram utilizados dois sensores sendo um suspenso no ar e outro imerso em água, para avaliação dos dados recebidos. A 142 m, a perda de pacotes aumentou bastante, o que motivou o teste dos módulos em alturas maiores. O módulo mestre foi então instalado no extremo de um poste com aproximadamente três metros de altura e o módulo remoto instalado em uma haste de um metro e meio. A partir da alteração das alturas iniciais conseguiu-se aumentar o desempenho da comunicação.

O sensor de temperatura utilizado apresentou grande instabilidade em suas leituras, com oscilações superiores a 1° C. A avaliação do problema revelou uma influência das capacitâncias produzidas pelo comprimento do cabo de conexão do sensor ao módulo remoto. A solução encontrada foi a utilização de capacitores conectados diretamente nos terminais do sensor LM35 na extremidade do cabo.

Na Figura 5.13 são mostradas as condições de instalação do módulo mestre em uma das colunas da casa de apoio. O módulo alimentado por bateria foi conectado através de um cabo serial a um Notebook, que ficava responsável por armazenar os dados coletados e configurar o módulo remoto.



Figura 5.13. Módulo mestre instalado na casa da propriedade com visibilidade da plantação.

5.6. Avaliação de eficiência do sistema

Os módulos foram submetidos aos testes de campo nas condições reais de uma área irrigada e também nas proximidades do LEMA, dentro do campus do Pici - UFC. Nas duas situações, os testes visavam o estabelecimento dos canais de comunicação a distâncias viáveis às aplicações de monitoramento agrícola. Outro ponto de interesse nos ensaios realizados focalizava o consumo da bateria em rotinas de intensa coleta de dados.

Na Tabela 5.1. é mostrado um intervalo com 30 minutos de dados coletados nos sensores instalados na linha 20 da malha hidráulica mostrada na Figura 5.1. Os sensores são identificados por Sensor A e Sensor B, respectivamente instalados a profundidades de 5 cm e 15 cm. A posição dos sensores na linha 20 é bastante favorável por possuir uma visada direta

com o módulo mestre a uma distância de aproximadamente 73 m. Os gráficos das Figuras 5.14. e 5.15 foram traçados a partir dos dados da Tabela 5.2 e revelam a perda de umidade sofrida pelo solo em um horário de moderada evapotranspiração, das nove horas e vinte oito minutos às dez horas e sete minutos da manhã, como pode ser visto na primeira coluna da tabela.

TABELA 5.2. Dados coletas pelo módulo 30 na linha 20, sensores A (5 cm)e B (15cm)

Data	Hora	Módulo	Sensores Umidade			Bat.	Temp.	
16/11/2007	09:28:41	S30	FB=	2549,76	FC=	3460,48	11,49	27,0
16/11/2007	09:29:25	S30	FB=	2549,76	FC=	3460,48	11,49	27,0
16/11/2007	09:30:17	S30	FB=	2550,40	FC=	3459,84	11,49	28,7
16/11/2007	09:31:09	S30	FB=	2549,76	FC=	3459,20	11,49	26,6
16/11/2007	09:31:53	S30	FB=	2549,76	FC=	3459,20	11,48	26,6
16/11/2007	09:32:45	S30	FB=	2548,48	FC=	3459,84	11,49	29,6
16/11/2007	09:33:29	S30	FB=	2548,48	FC=	3459,84	11,48	29,6
16/11/2007	09:34:21	S30	FB=	2546,56	FC=	3456,64	11,48	27,4
16/11/2007	09:35:13	S30	FB=	2546,56	FC=	3456,00	11,48	26,4
16/11/2007	09:35:59	S30	FB=	2546,56	FC=	3456,00	11,48	26,4
16/11/2007	09:36:49	S30	FB=	2545,92	FC=	3454,72	11,48	26,8
16/11/2007	09:37:33	S30	FB=	2545,92	FC=	3454,72	11,48	26,8
16/11/2007	09:38:25	S30	FB=	2545,28	FC=	3454,08	11,48	27,2
16/11/2007	09:39:09	S30	FB=	2545,28	FC=	3454,08	11,48	27,2
16/11/2007	09:40:01	S30	FB=	2544,64	FC=	3452,80	11,48	27,2
16/11/2007	09:40:45	S30	FB=	2544,64	FC=	3452,80	11,48	27,2
16/11/2007	09:41:37	S30	FB=	2544,00	FC=	3452,16	11,48	26,8
16/11/2007	09:42:21	S30	FB=	2544,00	FC=	3452,16	11,48	26,8
16/11/2007	09:43:13	S30	FB=	2543,36	FC=	3450,88	11,48	29,4
16/11/2007	09:43:57	S30	FB=	2543,36	FC=	3450,88	11,48	29,4
16/11/2007	09:44:49	S30	FB=	2542,72	FC=	3450,24	11,48	27,6
16/11/2007	09:45:33	S30	FB=	2542,72	FC=	3450,24	11,48	27,6
16/11/2007	09:46:25	S30	FB=	2542,08	FC=	3449,60	11,48	27,0
16/11/2007	09:47:09	S30	FB=	2542,08	FC=	3449,60	11,48	27,0
16/11/2007	09:48:01	S30	FB=	2541,44	FC=	3450,88	11,48	26,8
16/11/2007	09:48:45	S30	FB=	2541,44	FC=	3450,88	11,48	26,8
16/11/2007	09:49:37	S30	FB=	2540,80	FC=	3449,60	11,48	27,7
16/11/2007	09:50:21	S30	FB=	2540,80	FC=	3449,60	11,48	27,7
16/11/2007	09:51:13	S30	FB=	2540,16	FC=	3448,96	11,48	26,8
16/11/2007	09:51:57	S30	FB=	2540,16	FC=	3448,96	11,48	26,8
16/11/2007	09:52:49	S30	FB=	2539,52	FC=	3448,32	11,48	27,0
16/11/2007	09:53:33	S30	FB=	2539,52	FC=	3448,32	11,48	27,0
16/11/2007	09:54:25	S30	FB=	2538,88	FC=	3447,68	11,48	27,6
16/11/2007	09:55:09	S30	FB=	2538,88	FC=	3447,68	11,48	27,6
16/11/2007	09:56:01	S30	FB=	2538,24	FC=	3444,48	11,48	28,7
16/11/2007	09:56:45	S30	FB=	2538,24	FC=	3444,48	11,48	28,7
16/11/2007	09:57:37	S30	FB=	2537,60	FC=	3445,76	11,48	27,2
16/11/2007	09:58:21	S30	FB=	2537,60	FC=	3445,76	11,48	27,2
16/11/2007	09:59:13	S30	FB=	2537,60	FC=	3445,12	11,48	27,6
16/11/2007	09:59:57	S30	FB=	2537,60	FC=	3445,12	11,48	27,6
16/11/2007	10:00:49	S30	FB=	2536,32	FC=	3443,84	11,48	29,2

16/11/2007	10:01:33	S30	FB=	2536,32	FC=	3443,84	11,48	29,2
16/11/2007	10:02:25	S30	FB=	2535,68	FC=	3440,64	11,48	27,4
16/11/2007	10:03:09	S30	FB=	2535,68	FC=	3440,64	11,48	27,4
16/11/2007	10:04:01	S30	FB=	2535,04	FC=	3441,92	11,48	27,2
16/11/2007	10:04:45	S30	FB=	2535,04	FC=	3441,92	11,48	27,2
16/11/2007	10:05:37	S30	FB=	2535,04	FC=	3441,28	11,48	30,9
16/11/2007	10:06:21	S30	FB=	2535,04	FC=	3441,28	11,48	30,9
16/11/2007	10:07:13	S30	FB=	2534,40	FC=	3437,44	11,48	31,3
16/11/2007	10:07:57	S30	FB=	2534,40	FC=	3437,44	11,48	31,3

Os termos FA, FB e FC são relativos às posições de conexão dos sensores na placa de multiplexação dos módulos remotos. Na Tabela 5.2 são mostrados os dados coletados pelo módulo sensor trinta “S30”, com os sensores de umidade conectados às suas portas FB e FC, respectivamente os sensores A e B instalados em profundidades diferentes. Os gráficos das Figuras 5.14 e 5.15, gerados, a partir dos valores adquiridos pelos sensores estão em função do intervalo de aquisição e proporcionam uma visão, mais clara, do processo de infiltração da água no solo. Nestes exemplos, o solo acabara de ser irrigado. Pelos gráficos pode-se perceber um aumento de umidade detectado pelos sensores, visto que, com o passar do tempo, a frequência, que é o sinal de saída dos sensores, vai diminuindo.

A leitura dos sensores capacitivos realizada pelo módulo remoto é enviada para o módulo mestre sem nenhum tratamento de seus valores. O cálculo de conversão e a correção dos valores adquiridos são realizados pela interface instalada no PC.

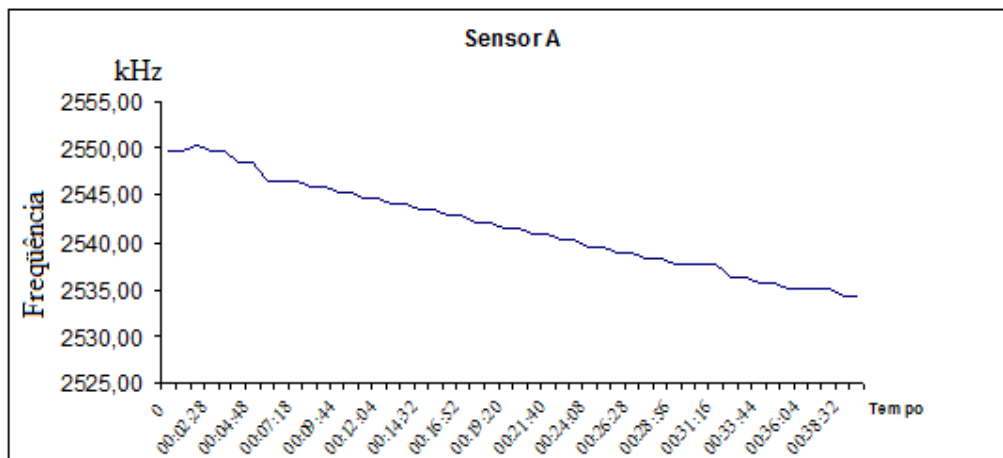


Figura 5.14. Aumento de umidade monitorado pelo sensor A, instalado a 5 cm da superfície.

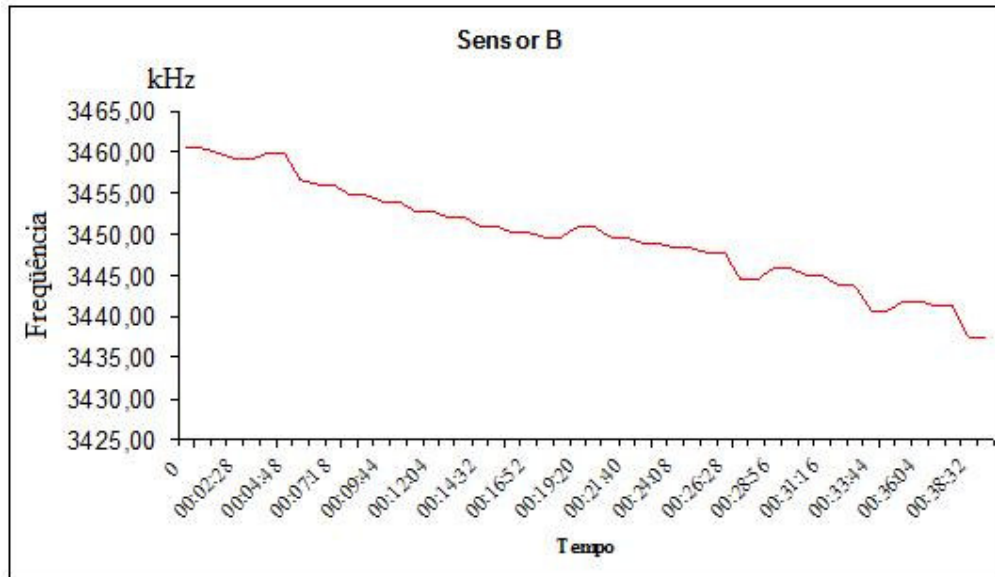


Figura 5.15. Aumento de umidade monitorado pelo sensor B, instalado a 15 cm da superfície.

5.7. Conclusões do Capítulo

A avaliação da distância máxima entre os módulos mestre e remoto, no teste de campo provou a viabilidade de utilização da rede de sensores sem fio em áreas de dimensões similares as apresentadas neste capítulo e exploradas por culturas de estrutura e ciclos próximos ao da melancia.

O uso dos sensores de umidade capacitivos já desenvolvidos se revelou compatível com as características de baixo consumo dos módulos remotos.

O procedimento de instalação do módulo remoto foi reproduzido por um funcionário da propriedade e se revelou bastante prático e de fácil manuseio. Os módulos foram submetidos aos testes de campo nas condições reais de uma área irrigada e estabelecendo canais de comunicação a distâncias viáveis às aplicações de monitoramento agrícola realizando a leitura dos sensores capacitivos pelo módulo remoto e enviando para o módulo mestre os seus valores aquisitados junto aos sensores de umidade e temperatura do solo para posterior armazenamento em um computador pessoal.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalhos Futuros

6.1. Conclusão

Neste trabalho foram apresentados a modelagem, implementação e teste de um sistema de sensoriamento remoto para irrigação de precisão. O sistema é constituído de módulos remotos dotados de sensores, rádio, bateria e unidade de processamento com funcionamento autônomo para serem distribuídos dentro de uma área agrícola irrigada.

A pesquisa efetuada ao longo do projeto permitiu avaliar tecnologias de transmissão sem fio, existentes e disponíveis comercialmente. A evolução dos trabalhos nesse segmento aponta para um futuro, onde, o sensoriamento remoto tornar-se-á presente em uma grande variedade de aplicações.

As Redes de Sensores Sem Fios (RSSF) são dependentes da aplicação. Assim, o projeto e o desenvolvimento dos componentes da rede de sensores ficam diretamente ligados à aplicação que se deseja trabalhar. Existem módulos sensores que, dadas as suas dimensões, taxa de transmissão e alcance, por exemplo, são ideais para uma aplicação e totalmente inadequados para outras. Em outros casos, módulos que parecem adequados a um tipo de aplicação no que diz respeito ao hardware, acabam por apresentar limitações quanto ao software que se quer utilizar. O desenvolvimento de sistemas capazes de atender a uma grande variedade de aplicações resulta em produtos de alto custo e com aplicações restritas ao campo da pesquisa.

O esforço desse projeto resultou no desenvolvimento de uma plataforma capaz de atender ao pesquisador e ser acessível ao produtor agrícola que deseja reduzir seus custos com água, energia e insumos a partir do investimento em tecnologias de suporte.

A construção do primeiro protótipo, capaz de atender às exigências impostas pelo campo agrícola, alcançou a sua primeira instância, flexibilizando a implantação rápida de sensores em uma área monitorada, para isso, o trabalho contou com o apoio conjunto de membros do departamento de Engenharia Agrícola, definindo os reais parâmetros de funcionalidade do sistema.

Este trabalho corresponde a uma primeira versão de desenvolvimento de um sistema de coleta de dados, via rádio, de umidade e temperatura do solo a ser aplicado na agricultura irrigada de precisão, eliminando a inconveniente instalação de cabos dentro das áreas de cultivo e viabilizando o uso de sensores em culturas de curto ciclo.

O desempenho de cobertura dos módulos, quando administrados por protocolos de comunicação cooperativa *multi-hop*, atende à necessidade de supervisionar grandes áreas cultivadas. A utilização de vários destes módulos permite ao Engenheiro, técnico e produtor agrícola um maior conhecimento da distribuição da umidade dentro da área irrigada oferecendo condições de administrar com maior praticidade a irrigação de diferentes tipos de culturas parceladas dentro de uma mesma área produtiva.

A principal vantagem do sistema desenvolvido está no baixo custo (quando comparado com os sistemas disponíveis comercialmente), por ter sido desenvolvido com componentes de fácil aquisição e, também, por fazer uso de uma interface simples capaz de funcionar em qualquer computador de baixo processamento. O microcontrolador escolhido inicialmente atendeu ao objetivo de integrar o máximo possível os acessórios necessários ao hardware, como exemplo do relógio de tempo real (RTC), memória EEPROM, timers, conversores e demais circuitos. A integração resultou em um *layout* de circuito compacto mesmo com uso de componentes em encapsulamentos, ainda, convencionais.

O layout do módulo de comunicações foi bem sucedido, tanto pelo fato de ter funcionado, como por ter alcançado as distâncias impostas dentro de uma real área de cultivo (142 metros de alcance). Conseguiu-se uma comunicação entre um módulo sensor e mestre distantes 200 metros, por intermédio da cooperação de outros módulos *multi-hop* e com um “baud rate” de 38.4 kbit/s.

O módulo é passível de adaptação a outras aplicações de monitoramento sendo necessário, somente, o desenvolvimento de uma nova placa de sensores conectada ao bloco de processamento.

O módulo atendeu às expectativas da aplicação oferecendo condições de uso similares aos atuais dispositivos do segmento de rádio transmissão de dados, deixando a expectativa, de que a inserção dos sensores sem fio na agricultura de precisão possa proporcionar um novo paradigma no monitoramento das variáveis físicas que regem o manejo da irrigação.

6.2. Trabalhos Futuros

A interface desenvolvida para a configuração e o controle dos módulos sensores ainda precisa ser melhorada na apresentação dos dados, para promover uma interação mais rápida com o operador.

Novos protocolos de comunicação devem ser testados e desenvolvidos para garantir maior praticidade, segurança e inteligência ao sistema, por exemplo, em rotinas de auto-organização e adaptação a falhas de comunicação.

A localização é outro importante aspecto a ser desenvolvido nesses módulos. A adição de um bloco GPS (Posicionamento Geográfico por Satélite) ao *hardware* de alguns módulos remotos na rede e fazendo-se uso de rotinas de trilateração e triangulação será possível nomear os dados coletados com coordenadas espaciais, ao contrário da nomeação direta dos nodos da rede, como está sendo feito atualmente.

A utilização dos módulos remotos na agricultura de precisão viabiliza uma série de novos trabalhos, dentre os quais podemos citar:

- O desenvolvimento de estratégias de automação em outros sistemas de irrigação como a Microaspersão e Pivô-central;
- O monitoramento de outras culturas do semi-árido nordestino, com diferentes ciclos de produtividade;
- O uso de outros tipos de sensores para o controle de deficiências minerais do solo e a presença de doenças e pragas na cultura.

Bibliografia

ANDRADE, P.; AGUERA, J.; UPADHYAYA, S.; JENKINS, B.; ROSA, U.; JOSIAH, M. **Evaluation of a dielectric-based moisture and salinity sensor for in-situ applications**. An ASAE Meeting Presentation, Paper Number: 011010, July 28-August 1, 2001.

ARCOVERDE, A.; ALVES, G.; LIMA, R.; MACIEL, P.; OLIVEIRA, M.; BARRETO, R.; **EZPetri: A Petri Net interchange framework for Eclipse based on PNML**. In: ISoLA 2004- 1st International Symposium on Leveraging Applications of Formal Methods. Paphos, Cyprus. 2004.

AU. **University of Aarhus**. Department of Computer Science Computer, Tool for Coloured Petri Nets. Disponível em: (<http://wiki.daimi.au.dk/cpntools/cpntools.wiki>). Acessado em: Fevereiro 2008.

BARR, M. **Programming Embedded Systems in C and C++**. O Reilly, 1999.

CARDOSO, J.; VALETTE, R; **Redes de Petri**. Florianópolis: Editora. da UFSC, 212p. 1997.

CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). **Cadastro de outorga d`água. 2002**. [Fortaleza], 2002. Disquete 31/2 pol. Excel.

CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). **Cadastro atualizado de usuários e vazão do Canal do Trabalhador: set 2004**. Planilha eletrônica Microsoft Excel. [Fortaleza], 2004.

CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). **Plano de gerenciamento das águas da bacia do rio Jaguaribe - CE**. [Fortaleza]: Engesoft Engenharia e Consultoria, 2000. 1 CD-ROM.

CHAFFIN, F. B., **Estimativa das Necessidades de Irrigação e Avaliação do Impacto da Cobrança pelo uso de Recursos Hídricos na Bacia do Baixo Jaguaribe – CE**, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará – UFC, Março de 2005.

COELHO, S. L. **Desenvolvimento de um Tensiômetro Eletrônico para o Monitoramento do Potencial da Água do Solo**. Universidade Federal do Ceará – UFC, 2003.

DASTANE, N.G. **Effective rainfall and irrigated water requirements**. Rome: FAO, Irrigation and Drainage Paper 25. 1974. 68p

DNOCS. **Departamento Nacional de Obras Contra as Secas**. Disponível em: (www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros_irrigados/ce/baixo_acarau.html). Acessado em: Fevereiro de 2008.

EMBRAPA, **Missão da Unidade Embrapa Instrumentação Agropecuária**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: (http://www.cnpdia.embrapa.br/_missao.html). Acessado em Fevereiro. 2008.

FAO. **Es necesario mejorar las prácticas agrícolas**. Março de 2007. Disponível em: (https://www.fao.org.br/vernoticias.asp?id_noticia=46). Acesso em: 31 de agosto de 2007.

FETRAECE, Federação dos Trabalhadores na Agricultura do Estado do Ceará. Disponível em: (<http://www.fetraece.org.br/campanha/padrss.htm>). Acessado em Fevereiro de 2008.

HEUSER C.A. **Modelagem Conceitual de Sistemas**. (1ª. Edição, EBAI - 1988) 2a. Edição, Campinas: UNICAMP (IV Escola Brasileiro-Argentina de Informática), 150 pág, 1991.

JENSEN, K. **Coloured Petri Nets: A High Level Language for System Design and Analysis**. Lecture Notes in Computer Science, v. 483, p. 342-416, Springer-Verlag, 1990.

KEMPER, K. E. **O custo da água gratuita: alocação e uso dos recursos hídricos no Vale**

do Curu, Ceará, Nordeste Brasileiro. Linkoping: Linkoping University, 1997. 236 p. (Linkoping Studies in Arts and Science, 152).

LEE, T. Y., HSIUNG, P. A., **Embedded Software Synthesis and Prototyping.** IEEE Transactions on Consumer Electronics, v. 50, n. 1, fevereiro. 2004.

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

MARTINS, M. G. M., **Modelagem e Análise Formal de Algumas Funcionalidades de um Protocolo de Transporte Através das redes de Petri.** 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) – INATEL, Instituto Nacional de Telecomunicações, dezembro. 2003.

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

MICROCHIP, Microchip Technology Inc. *Leading Provider of Microcontroller & Analog Semiconductors.* Disponível em: (www.microchip.com). Acessado em fevereiro de 2008.

MOLIN, J. P., **Agricultura de Precisão. Parte I: O que é o Estado da Arte em ensorimento.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.17, n.2, p.97-107, dezembro. 2003.

MORAN, M. S., CLARKE, T. R., Qi, J. and PINTER, P. J. Jr. **MADMAC: A test of multispectral imagery as a farm management tool.** Pp. 612-617 in Proceedings of the 26th International Symposium on Remote Sensing Environment, March 25-29, Vancouver, Canada. 1996.

MURATA, T. **Petri net: properties, analysis and applications.** *Proceedings of the IEEE*, v.77, n.4, p.541-579, 1989.

OLIVEIRA, A. D. S. **Avaliação do Sensor de Umidade TOPDEA no manejo da**

irrigação. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 69 p. 2008.

ONU. **Falta água potável para 1,1 bilhão no mundo.** Setembro de 2006. Disponível em: http://www.onu-brasil.org.br/view_news.php?id=3741 . Acesso em 31 de agosto de 2007.

PÁDUA, S. I. D.V. de; SILVA, A. R. Y. da; PORTO, A. J. V.; INAMASU, R. Y. **O Potencial das redes de Petri em Modelagem e Análise de Processos de Negócio.** Revista Gestão & Produção, v. 11, n. 1, p. 109 – 119, janeiro e abril. 2004.

PEATMAN, J. B., **Embedded design with the PIC18F452 Microcontroller.** Prentice Hall, 1nd Edition, USA, 2003

RAMANATHAN, N., L. BALZANO, M. BURT, D. ESTRIN, T., HARMON, C. HARVEY, J. JAY, E. KOHLER, S. **Monitoring a toxin in a rural rice field with a wireless sensor network.** *CENS Technical Report*, Rothenberg & M.Srivastava (2006).

REISIG, W. **Petri Nets: An Introduction.** Em: **Monographs on Theoretical Computer Science.** v. 4, Springer Verlag 1985.

ROCHA J. W. V. **Estudo da tecnologia de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) baseadas nos protocolos do IEEE e seus principais protocolos e aplicações.** Disponível em: (<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialrssf/default.asp>). Publicado em: 20/08/2007, Acessado em: Fevereiro de 2008.

RUIZ, L. B. “**MANÁ: Uma Arquitetura para Gerenciamento de Redes de Sensores Sem Fio**”, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Dezembro de 2003, 214p.

SIKKA, P.; CORKE, P.; VALENCIA, P.; CROSSMAN, C.; SWAIN, D.; BISHOP-HURLEY, G., **Wireless Adhoc Sensor and Actuator Networks on the Farm.** IPSN'06, Nashville, Tennessee, USA, April 19-21. 2006.

SILVA, F. M. da, **Uso Eficiente de Energia Em Redes de Sensores**. GTA, Grupo de Teleinformática e Automação. UFRJ, 2005.

SILVA, I. de O., TEIXEIRA, A. dos S., CANAFISTULA, F. J. F., LEÃO, R. A. de O. **Development of a capacitive sensor for monitoring soil moisture**. In: 2005 ASAE MEETING, 2005, Tampa Bay. Proceedings of the 2005 ASAE Meeting. St. Joseph: ASAE, 2005.

SILVA, I. O. **Desenvolvimento de um sensor capacitivo para o monitoramento de umidade do solo**. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 86 p. 2005.

SILVEIRA, P. M. da; STONE, L. F. **Manejo da irrigação do feijoeiro: uso do tensiômetro e avaliação do desempenho do pivô central**. Brasília: Embrapa/SPI, 1994, 46 p. (EMBRAPA-CNPAP. Circular Técnica, 27).

SONKA, S. T., M. E. BAUER and E. T. CHERRY, et al. **Precision Agriculture in the 21st Century Geospatial and Information Technologies in Crop Management**. 1997.

SOUSA, F. **Irrigação Desenvolvimento e Tecnologia**, Imprensa Universitária. Fortaleza: UFC, 2000. 94 p.

SOUSA, J. R. B.; SAUSENT, P. S.; LIMAT, A. M. N.; PERKUSICH, A., **Rede de Petri Híbridas Diferenciais: Aplicação na Modelagem e no Gerenciamento Dinâmico de Energia de Redes de Sensores Sem Fio**. Revista Controle & Automação, v. 31, n. 3, agosto e setembro. 2007.

TATE, D. M. **Principios del uso eficiente del agua**. Disponível em: http://www.unesco.org/uy/phi/libros/uso_eficiente/cap2.htm . Acesso em: 15 jan.2005.

TATO, Equipamento Eletrônicos. Código de exemplo em C para teste dos módulos

transceptores da Laipac TRW 2.4GHz. Disponível em (<http://www.tato.ind.br/files/RF-24G-Example.c>) Acessado em fevereiro de 2008.


TILAK, S., ABU-GHAZALEH, N.B. e HEINZELMAN, W. **A taxonomy of wireless micro-sensor network models**. In Proceedings of the ACM Workshop on Wireless Security, ACM Press, 2002, pp 28-36.

TSCHIEDEL, M., FERREIRA, M. F. **Introdução à Agricultura de Precisão: Conceitos e Vantagens**. Ciência Rural v.32 n.1 Santa Maria jan./fev. 2002.

WERKHOVEN, C. **Sensors for irrigation scheduling of cultures in the field**. Acta-Horticulturae. In: International workshop on sensors in horticulture, I, Noordwijkerhout, Netherlands, n. 304, p. 259-264. 1991.

YODER, R. E.; JOHNSON, D. L.; WILKERSON, J. B.; YODER, D. C. Soil Water Sensor Performance. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph-MI, v. 14, n. 2, p. 121-133, 1998.

ANEXO A - Características Básicas do Microcontrolador PIC18F4550



MICROCHIP PIC18F2455/2550/4455/4550

28/40/44-Pin High-Performance, Enhanced Flash USB Microcontrollers with nanoWatt Technology

Universal Serial Bus Features:

- USB V2.0 Compliant
- Low Speed (1.5 Mb/s) and Full Speed (12 Mb/s)
- Supports Control, Interrupt, Isochronous and Bulk Transfers
- Supports up to 32 endpoints (16 bidirectional)
- 1-Kbyte dual access RAM for USB
- On-chip USB transceiver with on-chip voltage regulator
- Interface for off-chip USB transceiver
- Streaming Parallel Port (SPP) for USB streaming transfers (40/44-pin devices only)

Power-Managed Modes:

- Run: CPU on, peripherals on
- Idle: CPU off, peripherals on
- Sleep: CPU off, peripherals off
- Idle mode currents down to 5.8 μ A typical
- Sleep mode currents down to 0.1 μ A typical
- Timer1 oscillator: 1.1 μ A typical, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer: 2.1 μ A typical
- Two-Speed Oscillator Start-up

Flexible Oscillator Structure:

- Four Crystal modes including High Precision PLL for USB
- Two External Clock modes, up to 48 MHz
- Internal oscillator block:
 - 8 user-selectable frequencies, from 31 kHz to 8 MHz
 - User-tunable to compensate for frequency drift
- Secondary oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Dual oscillator options allow microcontroller and USB module to run at different clock speeds
- Fail-Safe Clock Monitor
 - Allows for safe shutdown if any clock stops

Peripheral Highlights:

- High-current sink/source 25 mA/25 mA
- Three external interrupts
- Four Timer modules (Timer0 to Timer3)
- Up to 2 Capture/Compare/PWM (CCP) modules:
 - Capture is 16-bit, max. resolution 6.25 ns ($T_{CY}/16$)
 - Compare is 16-bit, max. resolution 100 ns (T_{CY})
 - PWM output: PWM resolution is 1 to 10-bit
- Enhanced Capture/Compare/PWM (ECCP) module:
 - Multiple output modes
 - Selectable polarity
 - Programmable dead time
 - Auto-Shutdown and Auto-Restart
- Enhanced USART module:
 - LIN bus support
- Master Synchronous Serial Port (MSSP) module supporting 3-wire SPI™ (all 4 modes) and I²C™ Master and Slave modes
- 10-bit, up to 13-channels Analog-to-Digital Converter module (A/D) with programmable acquisition time
- Dual analog comparators with input multiplexing

Special Microcontroller Features:

- C compiler optimized architecture with optional extended instruction set
- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM memory typical
- Flash/Data EEPROM Retention: > 40 years
- Self-programmable under software control
- Priority levels for interrupts
- 8 x 8 Single-Cycle Hardware Multiplier
- Extended Watchdog Timer (WDT):
 - Programmable period from 41 ms to 131s
- Programmable Code Protection
- Single-Supply 5V In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins
- Optional dedicated ICD/ICSP port (44-pin devices only)
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-bit A/D (ch)	CCP/ECCP (PWM)	SPP	MSSP		EAUSART	Comparators	Timers 8/16-bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					SPI™	Master I ² C™			
PIC18F2455	24K	12288	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2550	32K	16384	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4455	24K	12288	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4550	32K	16384	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3

Figura 6.1. Página inicial do Data-Sheet (MICROCHIP, 2004).

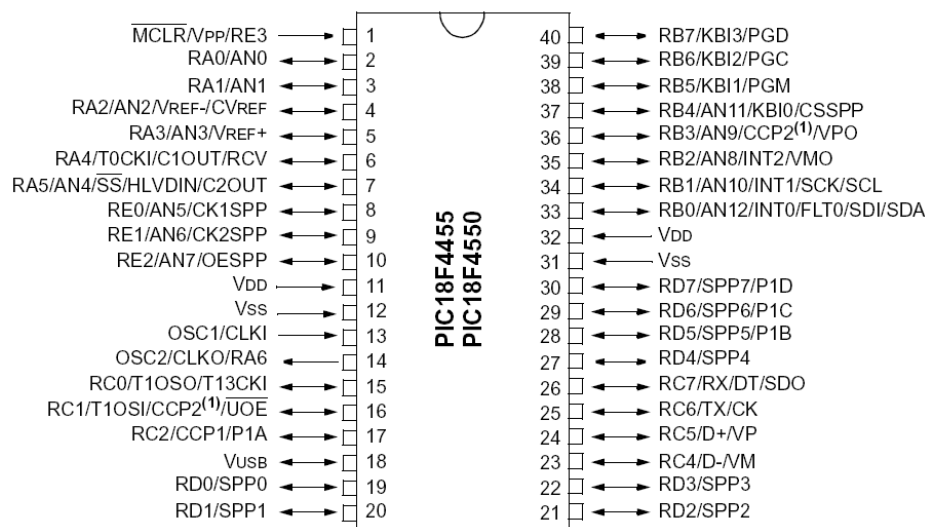


Figura 6.2. Diagrama de pinos (MICROCHIP, 2004).

Features	PIC18F2455	PIC18F2550	PIC18F4455	PIC18F4550
Operating Frequency	DC – 48 MHz	DC – 48 MHz	DC – 48 MHz	DC – 48 MHz
Program Memory (Bytes)	24576	32768	24576	32768
Program Memory (Instructions)	12288	16384	12288	16384
Data Memory (Bytes)	2048	2048	2048	2048
Data EEPROM Memory (Bytes)	256	256	256	256
Interrupt Sources	19	19	20	20
I/O Ports	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, D, E	Ports A, B, C, D, E
Timers	4	4	4	4
Capture/Compare/PWM Modules	2	2	1	1
Enhanced Capture/Compare/PWM Modules	0	0	1	1
Serial Communications	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART
Universal Serial Bus (USB) Module	1	1	1	1
Streaming Parallel Port (SPP)	No	No	Yes	Yes
10-bit Analog-to-Digital Module	10 Input Channels	10 Input Channels	13 Input Channels	13 Input Channels
Comparators	2	2	2	2
Resets (and Delays)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT
Programmable Low-Voltage Detect	Yes	Yes	Yes	Yes
Programmable Brown-out Reset	Yes	Yes	Yes	Yes
Instruction Set	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled
Packages	28-pin PDIP 28-pin SOIC	28-pin PDIP 28-pin SOIC	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP

Figura 6.3. Características do dispositivo (MICROCHIP, 2004).

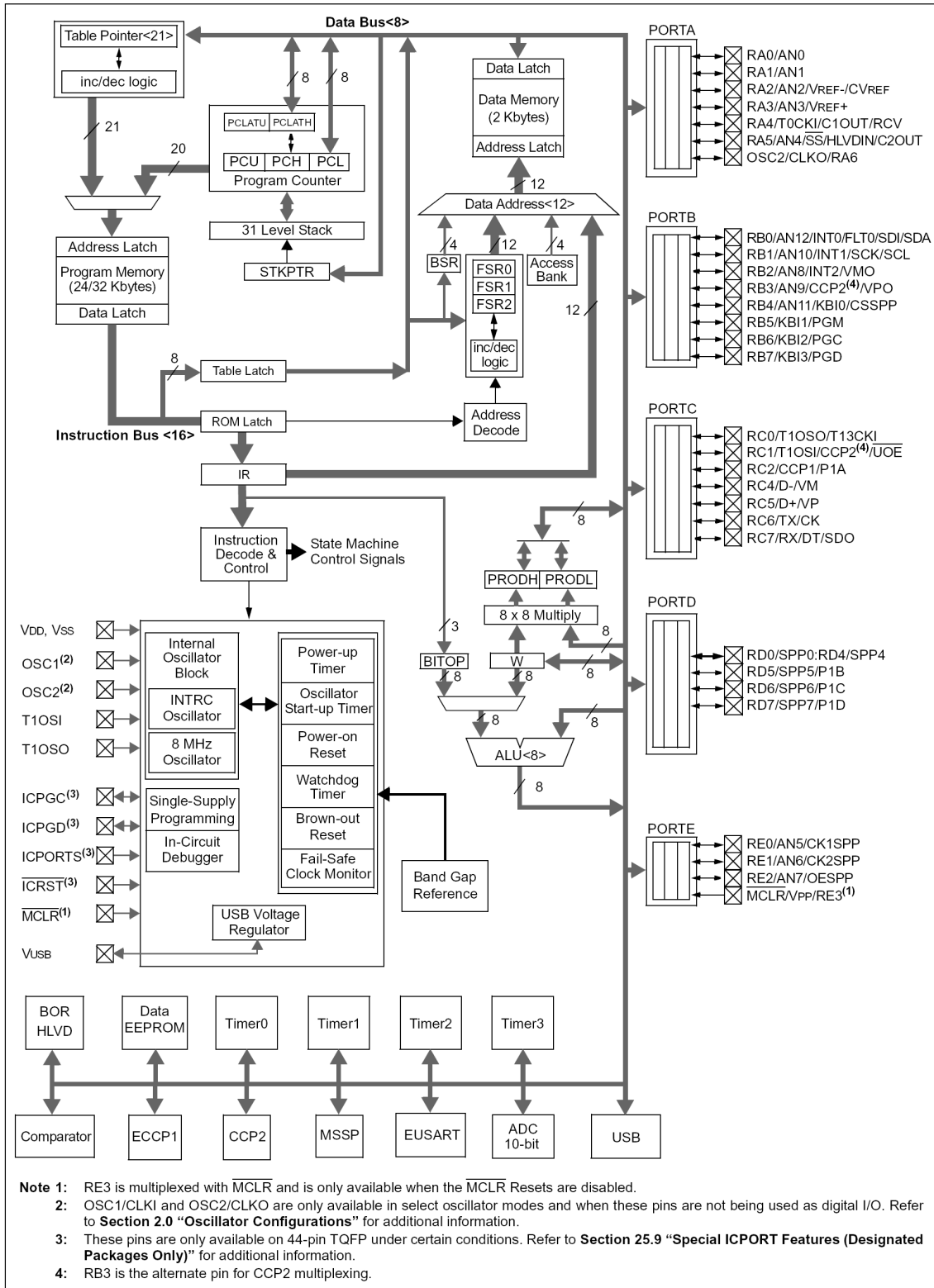


Figura 6.4. Diagrama em blocos do PIC18F4455/4550.

ANEXO B – Características Básicas do Transceptor Laipac TRW 2.4GHz.

High frequency TRF-2.4G Transceiver module

Specification

- Frequency Range: 2.4~2.524 GHz ISM band
- Modulate Mode: GFSK
- Data Rate: 1Mbps; 250Kbps
- Multi channel operation: 125 channels, Channel switching time<200uS, Support frequency hopping
- Emulated full duplex RF link due to the 1Mbits/s on the air data rate
- Simultaneous dual receiver
- Data slicer / clock recovery of data
- Including decoder, encoder and data buffer and CRC computation
- ShockBurst mode for ultra-low power operation and relaxed MCU performance
- Sensitivity: -90dBm
- Built in antenna
- Power supply range: 1.9 to 3.6 V
- Low supply current (TX), typical 10.5mA peak@ -5dBm output power
- Low supply current (RX), typical 18mA peak in receive mode
- Supply current in Power Down Mode: 1 uA
- Operating Temperature: -40~+85 Centigrade
- Size: 20.5*36.5*2.4mm
- 100% RF tested
- Competitive price

Applications

- Wireless mouse, keyboard, joystick
- Wireless data communication
- Alarm and security systems
- Home automation
- Wireless Earphone
- Telemetry
- Surveillance
- Automotive

GENERAL DESCRIPTION

Laipac TRF-2.4G Module is an easy to use radio transceiver for the world wide 2.4 - 2.5 GHz ISM band. The transceiver consists of an antenna, a fully integrated frequency synthesizer, a power amplifier, a crystal oscillator and a modulator. Output power and frequency channels are easily programmable by use of the 3-wire serial interface. Current consumption is very low, only 10.5mA at an output power of -5dBm and 18mA in receive mode. Built-in Power Down modes makes power saving easily realizable.

Figura 6.5 Especificações gerais do transceptor TRW 2.4GHz.

Conditions: VCC = +3V, VSS = 0V, T_A = - 40°C to + 85°C

Symbol	Parameter (condition)	Notes	Min.	Ttp.	Max.	Units
Operating conditions						
VCC	Supply voltage		1.9	3.0	3.6	V
TEMP	Operating Temperature		-40	+27	+85	°C
Digital input pin						
V _{IH}	HIGH level input voltage		VCC-0.3		VCC	V
V _{IL}	LOW level input voltage		V _{ss}		0.3	V
Digital output pin						
V _{OH}	HIGH level output voltage (I _{OH} =-0.5mA)		VCC-0.3		VCC	V
V _{OL}	LOW level output voltage (I _{OL} =0.5mA)		V _{ss}		0.3	V
General RF conditions						
f _{OP}	Operating frequency	1)	2400		2524	MHz
Δf	Frequency deviation			±156		kHz
R _{GFSK}	Data rate ShockBurst		>0		1000	kbps
R _{GFSK}	Data rate Direct Mode	2)	250		1000	kbps
F _{CHANNEL}	Channel spacing			1		MHz
Transmitter operation						
PRF	Maximum Output Power	3)		0	+4	dBm
PRFC	RF Power Control Range		16	20		dB
PRFCR	RF Power Control Range Resolution				±3	dB
PBW	20dB Bandwidth for Modulated Carrier				1000	kHz
PRF2	2 nd Adjacent Channel Transmit Power 2MHz				-20	dBm
PRF3	3 rd Adjacent Channel Transmit Power 3MHz				-40	dBm
I _{VCC}	Supply current @ 0dBm output power	4)		13		mA
I _{VCC}	Supply current @ -20dBm output power	4)		8.8		mA
I _{VCC}	Average Supply current @ -5dBm output power, ShockBurst	5)		0.8		mA
I _{VCC}	Average Supply current in stand-by mode	6)		12		μA
I _{VCC}	Average Supply current in power down			1		μA
Receiver operation						
I _{VCC}	Supply current one channel 250kbps			18		mA
I _{VCC}	Supply current one channel 1000kbps			19		mA
I _{VCC}	Supply current two channels 250kbps			23		mA
I _{VCC}	Supply current two channels 1000kbps			25		mA
R _{XSENS}	Sensitivity at 0.1%BER (@250kbps)			-90		dBm
R _{XSENS}	Sensitivity at 0.1%BER (@1000kbps)			-80		dBm

Figura 6.6. Especificações elétricas do transceptor TRW 2.4GHz..

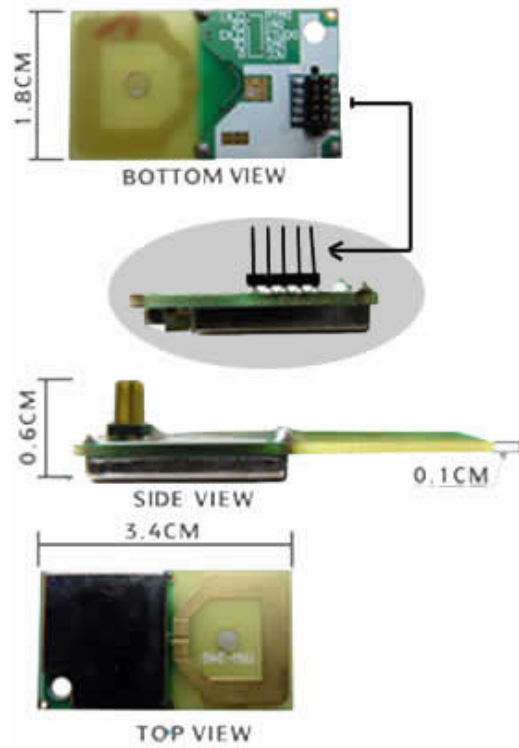


Figura 6.7. Dimensões do módulo TRF-2.4 GHz.

ANEXO C – Rotina para teste do Módulo Transceptor.

/*

RF-24G Configuration and testing. The 24G requires 500ns between Data Setup and Clk, so we ran this on a 16F88 at

internal 8MHz which turns into 500ns per instruction. Imagine a breadboard with a 16F88 connected to two transceivers

inserted into the same breadboard about 4 inches apart. This made it easy for testing the setup on the units and proof of transmission, but not a good setup for testing the effective communication distance.

The RF-24G requires 3V!! No 5V! So we ran our 16F88 (not 16LF88) at 3V and at 8MHz. This is out of spec for both minimum

voltage (4V) and maximum frequency at 3V (4MHz) but it worked great! Of course it shouldn't be used for a deployed design.

The time delay between clocking in the next data is given by the equation on page 31.

Time On Air = (databits+1) / datarate

T(OA) = 266 bits (max) / 1,000,000 bps = 266us

NOTE: If you enable the receiver (set CE high), the receiver will start monitoring the air. With the CRC set to 8 bit (default) the receiver will find all sorts of junk in the air with a correct CRC tag. Our recommendation

is to either transmit a reasonably constant stream of data, use 16-bit CRC, and/or use additional header/end bytes in

the payload to verify incoming packets.

config_setup word 16 bits found on pages 13-15

23: 0 Payloads have an 8 bit address

22: 0

21: 1

20: 0

19: 0

18: 0

17: 1 16-Bit CRC

16: 1 CRC Enabled

15: 0 One channel receive

14: 1 ShockBurst Mode

13: 1 1Mbps Transmission Rate

12: 0

11: 1

10: 1

9: 1 RF Output Power

8: 0 RF Output Power

7: 0 Channel select (channel 2)

6: 0

5: 0

4: 0

3: 0

2: 1

1: 0

0: 0 Transmit mode

*/

#define Clock_8MHz

```

#define Baud_9600

#include "d:\Pics\c\16F88.h"

//There is no config word because this program tested on a 16F88 using Bloder the boot load program

#pragma origin 4

#include "d:\Pics\code\Delay.c" // Delays
#include "d:\Pics\code\Stdio.c" // Basic Serial IO

#define TX_CE    PORTB.0
#define TX_CS    PORTB.1
#define TX_CLK1  PORTB.3
#define TX_DATA  PORTB.4

#define RX_CE    PORTA.2
#define RX_CS    PORTA.3
#define RX_CLK1  PORTA.4
#define RX_DATA  PORTA.1
#define RX_DR    PORTA.0

uns8 data_array[4];
uns8 counter;

void boot_up(void);
void configure_receiver(void);
void configure_transmitter(void);
void transmit_data(void);
void receive_data(void);

void main()
{
    uns16 elapsed_time;

    counter = 0;

    boot_up();

    while(1)
    {
        counter++;

        data_array[0] = 0x12;
        data_array[1] = 0x34;
        data_array[2] = 0xAB;
        data_array[3] = counter;

        printf("\n\rSending data...\n\r", 0);
        transmit_data();

        //Here we monitor how many clock cycles it takes for the receiver to register good data
        //elapsed_time is in cycles - each cycles is 500ns at 8MHz so 541 cycles = 270.5us
        //=====
        TMR1IF = 0;
        TMR1L = 0 ; TMR1H = 0 ; TMR1ON = 1;
        while(RX_DR == 0)
            if (TMR1IF == 1) break; //If timer1 rolls over waiting for data, then break
        TMR1ON = 0;
        elapsed_time.high8 = TMR1H;
    }
}

```



```

    elapsed_time.low8 = TMR1L;
    printf("Time to receive = %d\n\r", elapsed_time);
    //=====

    if(RX_DR == 1) //We have data!
        receive_data();
    else
        printf("No data found!\n\r", 0);

    delay_ms(1000); //Have a second between transmissions just for evaluation
}
}

void boot_up(void)
{
    OSCCON = 0b.0111.0000; //Setup internal oscillator for 8MHz
    while(OSCCON.2 == 0); //Wait for frequency to stabilize

    ANSEL = 0b.0000.0000; //Turn pins to Digital instead of Analog
    CMCON = 0b.0000.0111; //Turn off comparator on RA port

    PORTA = 0b.0000.0000;
    TRISA = 0b.0000.0001; //0 = Output, 1 = Input (RX_DR is on RA0)

    PORTB = 0b.0000.0000;
    TRISB = 0b.0000.0100; //0 = Output, 1 = Input (RX is an input)

    enable_uart_TX(0); //Setup the hardware UART for 20MHz at 9600bps
    enable_uart_RX(0); //Take a look at header files - it's not that hard to setup the UART

    printf("\n\rRF-24G Testing:\n\r", 0);

    delay_ms(100);

    configure_transmitter();
    configure_receiver();
}

//This will clock out the current payload into the data_array
void receive_data(void)
{
    uns8 i, j, temp;

    RX_CE = 0; //Power down RF Front end

    //Erase the current data array so that we know we are looking at actual received data
    data_array[0] = 0x00;
    data_array[1] = 0x00;
    data_array[2] = 0x00;
    data_array[3] = 0x00;

    //Clock in data, we are setup for 32-bit payloads
    for(i = 0 ; i < 4 ; i++) //4 bytes
    {
        for(j = 0 ; j < 8 ; j++) //8 bits each
        {
            temp <<= 1;

```

```

    temp.0 = RX_DATA;

    RX_CLK1 = 1;
    RX_CLK1 = 0;
}

data_array[i] = temp; //Store this byte
}

if(RX_DR == 0) //Once the data is clocked completely, the receiver should make DR go low
    printf("DR went low\n\r", 0);

printf("\n\rData Received:\n\r", 0);
printf("[0] : %h\n\r", data_array[0]);
printf("[1] : %h\n\r", data_array[1]);
printf("[2] : %h\n\r", data_array[2]);
printf("[3] : %h\n\r", data_array[3]);

RX_CE = 1; //Power up RF Front end
}

//This sends out the data stored in the data_array
//data_array must be setup before calling this function
void transmit_data(void)
{
    uns8 i, j, temp, rf_address;

    TX_CE = 1;

    //Clock in address
    rf_address = 0b.1110.0111; //Power-on Default for all units (on page 11)
    for(i = 0 ; i < 8 ; i++)
    {
        TX_DATA = rf_address.7;
        TX_CLK1 = 1;
        TX_CLK1 = 0;

        rf_address <<= 1;
    }

    //Clock in the data_array
    for(i = 0 ; i < 4 ; i++) //4 bytes
    {
        temp = data_array[i];

        for(j = 0 ; j < 8 ; j++) //One bit at a time
        {
            TX_DATA = temp.7;
            TX_CLK1 = 1;
            TX_CLK1 = 0;

            temp <<= 1;
        }
    }

    TX_CE = 0; //Start transmission
}

//2.4G Configuration - Receiver
//This setups up a RF-24G for receiving at 1mbps

```

```
void configure_receiver(void)
{
    uns8 i;
    uns24 config_setup;

    //During configuration of the receiver, we need RX_DATA as an output
    PORTA = 0b.0000.0000;
    TRISA = 0b.0000.0001; //0 = Output, 1 = Input (RX_DR is on RA0) (RX_DATA is on RA1)

    //Config Mode
    RX_CE = 0; RX_CS = 1;

    //Delay of 5us from CS to Data (page 30) is taken care of by the for loop

    //Setup configuration word
    config_setup = 0b.0010.0011.0110.1110.0000.0101; //Look at pages 13-15 for more bit info

    for(i = 0 ; i < 24 ; i++)
    {
        RX_DATA = config_setup.23;
        RX_CLK1 = 1;
        RX_CLK1 = 0;

        config_setup <<= 1;
    }

    //Configuration is actived on falling edge of CS (page 10)
    RX_CE = 0; RX_CS = 0;

    //After configuration of the receiver, we need RX_DATA as an input
    PORTA = 0b.0000.0000;
    TRISA = 0b.0000.0011; //0 = Output, 1 = Input (RX_DR is on RA0) (RX_DATA is on RA1)

    //Start monitoring the air
    RX_CE = 1; RX_CS = 0;

    printf("RX Configuration finished...\n\r", 0);
}

//2.4G Configuration - Transmitter
//This sets up one RF-24G for shockburst transmission
void configure_transmitter(void)
{
    uns8 i;
    uns24 config_setup;

    //Config Mode
    TX_CE = 0; TX_CS = 1;

    //Delay of 5us from CS to Data (page 30) is taken care of by the for loop

    //Setup configuration word
    config_setup = 0b.0010.0011.0110.1110.0000.0100; //Look at pages 13-15 for more bit info

    for(i = 0 ; i < 24 ; i++)
    {
        TX_DATA = config_setup.23;
        TX_CLK1 = 1;
        TX_CLK1 = 0;
    }
}
```

```
    config_setup <<= 1;
}

//Configuration is activated on falling edge of CS (page 10)
TX_CE = 0; TX_CS = 0;

printf("TX Configuration finished...\n\r", 0);
}
```

(TATO, 2008)

ANEXO D – Características do Sensor Capacitivo de Umidade

1. Tempo de resposta

O tempo de resposta do sensor, a uma mudança na umidade do solo, foi verificado por SILVA (2005) com um sensor instalado em um tubo de PVC (Figura 6.8) em um solo de textura arenosa.

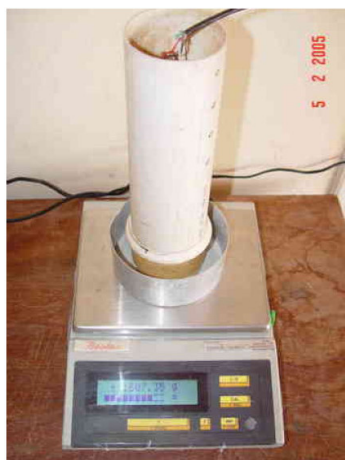


Figura 6.8. Sensor instalado em tubo de PVC de 2'' preenchido com solo (SILVA, 2005).

O solo seco ao sol, teve água adicionada de baixo para cima. A resposta do sensor foi monitorada e encontra-se representada na Figura 6.9. Nesta figura, verifica-se que a resposta do sensor à variação da umidade do solo foi imediata e, após 4.000 segundos (cerca de 1 hora e 15 minutos), encontrava-se no valor mínimo e estável, indicando que o solo encontrava-se novamente saturado (SILVA, 2005).

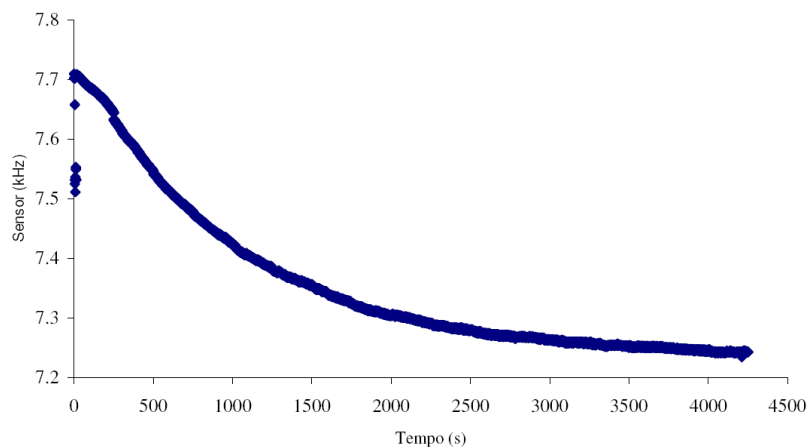


Figura 6.9. Resposta do sensor a variação de umidade do solo (SILVA, 2005).

2. Calibração dos sensores capacitivos

Os sensores capacitivos foram calibrados para a obtenção da relação funcional entre a frequência de saída e o valor do número de contadores, adquiridos no conversor analógico digital ligado à célula de carga (SILVA, 2005).

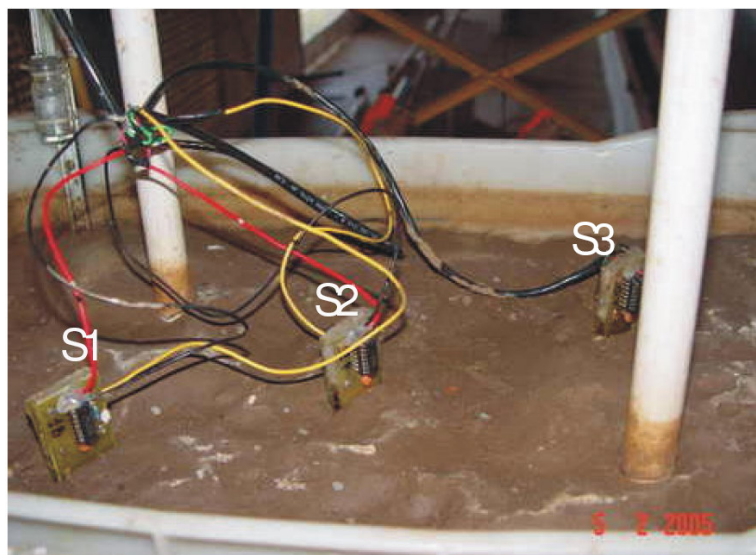


Figura 6.10. Três sensores capacitivos foram instalados em caixa contendo solo e suspenso em estrutura de ferro para ser calibrada usando célula de carga (SILVA, 2005).

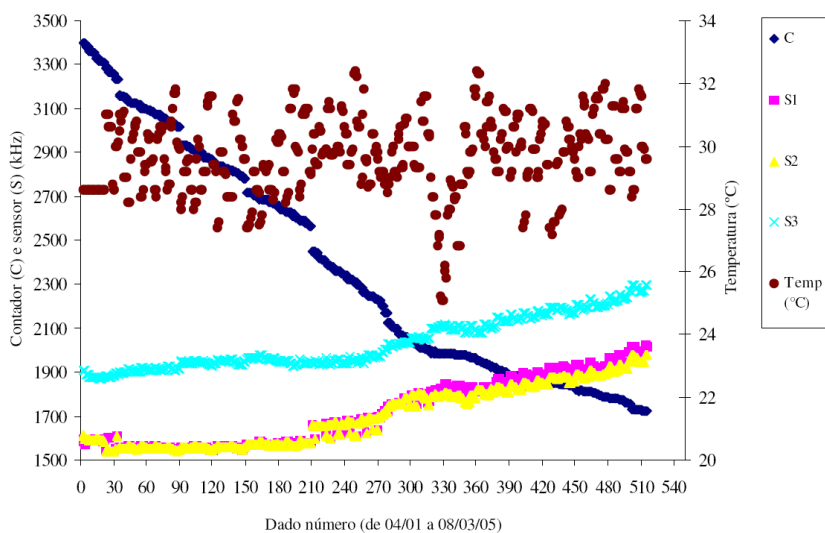


Figura 6.11. Monitoramento da variação dos sensores capacitivos, da massa de água no solo e da temperatura Ambiente (SILVA, 2005).

ANEXO E – Características do Sensor de Temperatura LM35



July 1999

LM35

Precision Centigrade Temperature Sensors

General Description

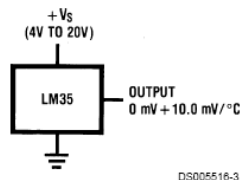
The LM35 series are precision integrated-circuit temperature sensors, whose output voltage is linearly proportional to the Celsius (Centigrade) temperature. The LM35 thus has an advantage over linear temperature sensors calibrated in ° Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from its output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of $\pm 1/4^\circ\text{C}$ at room temperature and $\pm 3/4^\circ\text{C}$ over a full -55 to $+150^\circ\text{C}$ temperature range. Low cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The LM35's low output impedance, linear output, and precise inherent calibration make interfacing to readout or control circuitry especially easy. It can be used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As it draws only $60\ \mu\text{A}$ from its supply, it has very low self-heating, less than 0.1°C in still air. The LM35 is rated to operate over a -55 to $+150^\circ\text{C}$ temperature range, while the LM35C is rated for a -40 to $+110^\circ\text{C}$ range (-10 with improved accuracy). The LM35 series is available packaged in

hermetic TO-46 transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D are also available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D is also available in an 8-lead surface mount small outline package and a plastic TO-220 package.

Features

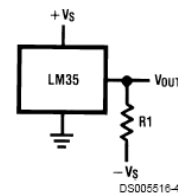
- Calibrated directly in ° Celsius (Centigrade)
- Linear $+10.0\ \text{mV}/^\circ\text{C}$ scale factor
- 0.5°C accuracy guaranteeable (at $+25^\circ\text{C}$)
- Rated for full -55 to $+150^\circ\text{C}$ range
- Suitable for remote applications
- Low cost due to wafer-level trimming
- Operates from 4 to 30 volts
- Less than $60\ \mu\text{A}$ current drain
- Low self-heating, 0.08°C in still air
- Nonlinearity only $\pm 1/4^\circ\text{C}$ typical
- Low impedance output, $0.1\ \Omega$ for 1 mA load

Typical Applications



DS005516-3

FIGURE 1. Basic Centigrade Temperature Sensor
($+2^\circ\text{C}$ to $+150^\circ\text{C}$)



DS005516-4

Choose $R_1 = -V_S/50\ \mu\text{A}$
 $V_{\text{OUT}} = +1,500\ \text{mV}$ at $+150^\circ\text{C}$
 $= +250\ \text{mV}$ at $+25^\circ\text{C}$
 $= -550\ \text{mV}$ at -55°C

FIGURE 2. Full-Range Centigrade Temperature Sensor

TRI-STATE® is a registered trademark of National Semiconductor Corporation.

Absolute Maximum Ratings (Note 10) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/ Distributors for availability and specifications.		TO-92 and TO-220 Package, (Soldering, 10 seconds)		SO Package (Note 12) Vapor Phase (60 seconds) Infrared (15 seconds)		ESD Susceptibility (Note 11) Specified Operating Temperature Range: T_{MIN} to T_{MAX} (Note 2)	
Supply Voltage	+35V to -0.2V					260°C	
Output Voltage	+6V to -1.0V					215°C	
Output Current	10 mA					220°C	
Storage Temp.;						2500V	
TO-46 Package,	-60°C to +180°C			LM35, LM35A		-55°C to +150°C	
TO-92 Package,	-60°C to +150°C			LM35C, LM35CA		-40°C to +110°C	
SO-8 Package,	-65°C to +150°C			LM35D		0°C to +100°C	
TO-220 Package,	-65°C to +150°C						
Lead Temp.:							
TO-46 Package, (Soldering, 10 seconds)	300°C						

Electrical Characteristics (Notes 1, 6)								
Parameter	Conditions	LM35A			LM35CA			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.2	± 0.5		± 0.2	± 0.5		°C
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	± 0.3			± 0.3		± 1.0	°C
	$T_A = T_{MAX}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		°C
	$T_A = T_{MIN}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4		± 1.5	°C
Nonlinearity (Note 8)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	± 0.18		± 0.35	± 0.15		± 0.3	°C
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	+10.0	+9.9, +10.1		+10.0		+9.9, +10.1	mV/°C
Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1$ mA	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		mV/mA
	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	± 0.5		± 3.0	± 0.5		± 3.0	mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.01	± 0.05		± 0.01	± 0.05		mV/V
	$4V \leq V_S \leq 30V$	± 0.02		± 0.1	± 0.02		± 0.1	mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_S = +5V, +25^\circ\text{C}$	56	67		56	67		µA
	$V_S = +5V$	105		131	91		114	µA
	$V_S = +30V, +25^\circ\text{C}$	56.2	68		56.2	68		µA
	$V_S = +30V$	105.5		133	91.5		116	µA
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4V \leq V_S \leq 30V, +25^\circ\text{C}$	0.2	1.0		0.2	1.0		µA
	$4V \leq V_S \leq 30V$	0.5		2.0	0.5		2.0	µA
Temperature Coefficient of Quiescent Current		+0.39		+0.5	+0.39		+0.5	µA/°C
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of <i>Figure 1</i> , $I_L = 0$	+1.5		+2.0	+1.5		+2.0	°C
Long Term Stability	$T_J = T_{MAX}$, for 1000 hours	± 0.08			± 0.08			°C

Figura 6.13.1. Características eléctricas do LM35 (National Semiconductor, 1999).

Electrical Characteristics								
(Notes 1, 6)								
Parameter	Conditions	LM35			LM35C, LM35D			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy, LM35, LM35C (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		$^\circ\text{C}$
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	± 0.5			± 0.5		± 1.5	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MAX}}$	± 0.8	± 1.5		± 0.8		± 1.5	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MIN}}$	± 0.8		± 1.5	± 0.8		± 2.0	$^\circ\text{C}$
Accuracy, LM35D (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$				± 0.6	± 1.5		$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MAX}}$				± 0.9		± 2.0	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MIN}}$				± 0.9		± 2.0	$^\circ\text{C}$
Nonlinearity (Note 8)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.3		± 0.5	± 0.2		± 0.5	$^\circ\text{C}$
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	+10.0	+9.8, +10.2		+10.0		+9.8, +10.2	mV/ $^\circ\text{C}$
Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1 \text{ mA}$	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 2.0		± 0.4	± 2.0		mV/mA
	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.5		± 5.0	± 0.5		± 5.0	mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.01	± 0.1		± 0.01	± 0.1		mV/V
	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	± 0.02		± 0.2	± 0.02		± 0.2	mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_S = +5\text{V}, +25^\circ\text{C}$	56	80		56	80		μA
	$V_S = +5\text{V}$	105		158	91		138	μA
	$V_S = +30\text{V}, +25^\circ\text{C}$	56.2	82		56.2	82		μA
	$V_S = +30\text{V}$	105.5		161	91.5		141	μA
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}, +25^\circ\text{C}$	0.2	2.0		0.2	2.0		μA
	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	0.5		3.0	0.5		3.0	μA
Temperature Coefficient of Quiescent Current		+0.39		+0.7	+0.39		+0.7	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of Figure 1, $I_L = 0$	+1.5		+2.0	+1.5		+2.0	$^\circ\text{C}$
Long Term Stability	$T_J = T_{\text{MAX}}$, for 1000 hours	± 0.08			± 0.08			$^\circ\text{C}$

Note 1: Unless otherwise noted, these specifications apply: $-55^\circ\text{C} \leq T_J \leq +150^\circ\text{C}$ for the LM35 and LM35A; $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq +110^\circ\text{C}$ for the LM35C and LM35CA; and $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +100^\circ\text{C}$ for the LM35D. $V_S = +5\text{Vdc}$ and $I_{\text{LOAD}} = 50 \mu\text{A}$, in the circuit of Figure 2. These specifications also apply from $+2^\circ\text{C}$ to T_{MAX} in the circuit of Figure 1. Specifications in **boldface** apply over the full rated temperature range.

Note 2: Thermal resistance of the TO-46 package is 400°C/W junction to ambient, and 24°C/W junction to case. Thermal resistance of the TO-92 package is 180°C/W junction to ambient. Thermal resistance of the small outline molded package is 220°C/W junction to ambient. Thermal resistance of the TO-220 package is 90°C/W junction to ambient. For additional thermal resistance information see table in the Applications section.

Note 3: Regulation is measured at constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output due to heating effects can be computed by multiplying the internal dissipation by the thermal resistance.

Note 4: Tested Limits are guaranteed and 100% tested in production.

Note 5: Design Limits are guaranteed (but not 100% production tested) over the indicated temperature and supply voltage ranges. These limits are not used to calculate outgoing quality levels.

Note 6: Specifications in **boldface** apply over the full rated temperature range.

Note 7: Accuracy is defined as the error between the output voltage and $10\text{mv}/^\circ\text{C}$ times the device's case temperature, at specified conditions of voltage, current, and temperature (expressed in $^\circ\text{C}$).

Note 8: Nonlinearity is defined as the deviation of the output-voltage-versus-temperature curve from the best-fit straight line, over the device's rated temperature range.

Note 9: Quiescent current is defined in the circuit of Figure 1.

Note 10: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its rated operating conditions. See Note 1.

Note 11: Human body model, 100 pF discharged through a $1.5 \text{ k}\Omega$ resistor.

Note 12: See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" or the section titled "Surface Mount" found in a current National Semiconductor Linear Data Book for other methods of soldering surface mount devices.

Figura 6.13.2. Características elétricas do LM35 (National Semiconductor, 1999).