



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

CLEMILSON COSTA DOS SANTOS

PLATAFORMA DE CONTROLE SEM FIO PARA IRRIGAÇÃO DE PRECISÃO

FORTALEZA

2013

CLEMILSON COSTA DOS SANTOS

PLATAFORMA DE CONTROLE SEM FIO PARA IRRIGAÇÃO DE PRECISÃO

Tese submetida ao Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

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

FORTALEZA

2013

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

S234p

Santos, Clemilson Costa dos.

Plataforma de controle sem fio para irrigação de precisão/ Clemilson Costa dos Santos. – 2013.
178 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2013.

Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientação: Prof. Phd Adunias dos Santos Teixeira.

1. Automação. 2. Irrigação de precisão. I. Título.

CDD 630

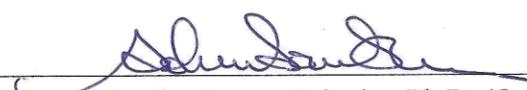
CLEMILSON COSTA DOS SANTOS

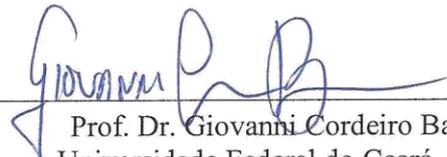
PLATAFORMA DE CONTROLE SEM FIO PARA IRRIGAÇÃO DE PRECISÃO

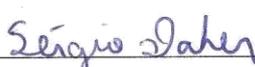
Tese submetida ao Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

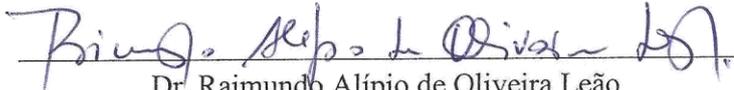
Aprovada em: 15 /02 /2013

BANCA EXAMINADORA


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


Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso
Universidade Federal do Ceará – UFC


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


Dr. Raimundo Alípio de Oliveira Leão
Universidade Federal do Ceará – UFC


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

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. Adunias, meu orientador, pelo direcionamento e incentivo, pelo profissionalismo e orientação segura, pelos conhecimentos e empenho que tanto contribuíram para realização deste trabalho;

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, pelas revisões de meus textos, pelas conversas e compartilhamento de sua experiência de vida;

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

Ao amigo Sérgio Daher, pelo incentivo, pela troca de idéias e pelos conhecimentos sempre tão essenciais na realização dos trabalhos do grupo;

Ao meu orientado de iniciação científica João Lucas por sua importante cooperação na implementação e testes dos circuitos e ainda na edição de algumas imagens deste trabalho.

Aos amigos Firmino Canafístula, Tadeu Macryne, Lúcio Nascimento, Dimas Oliveira e Henrique Sousa, pela troca de experiências e constante cooperação durante a realização das pesquisas;

A todos os membros do GAMA-DT, nosso Grupo de Automação e Manejo Agrícola Desenvolvimento de Tecnologias e do LEMA Laboratório de Eletrônica e Mecanização Agrícola.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, por terem contribuído de forma bastante significativa em meu crescimento intelectual e acadêmico;

Ao Jacô secretário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela atenção e presteza nos encaminhamentos de nossas demandas acadêmicas;

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

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.

“Tente mover o mundo, o primeiro passo será mover a si mesmo.”

Platão.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma plataforma de controle sem fio utilizando uma rede de sensores e atuadores remotos capazes de automatizar, com facilidade e precisão, um sistema convencional de irrigação pressurizada de alta eficiência do tipo gotejamento. O trabalho propõe o desenvolvimento de um ambiente integrado de gerenciamento da irrigação, administrado por um computador central, dispositivos móveis tais como *smartphones e tablets* e ainda com disponibilidade de dados e recursos de controle através da WWW (*World Wide Web*). O desenvolvimento e os testes dos sensores capacitivos tipo FDR (Reflectometria no Domínio de Frequência), módulos remotos, assim como os dispositivos de acionamento das bombas e válvulas, são descritos em suas características de desempenho e funcionalidade. O trabalho apresenta o uso de ferramentas computacionais e dispositivos de hardware, aplicados à concepção de projetos dedicados ao monitoramento e controle de sistemas de irrigação. A Rede de Controle sem Fio é formada por módulos sensores independentes, capazes de se comunicarem por rádio frequência, possuindo um ou mais pontos de comunicação final (estações base). O sistema conta com um conjunto de módulos remotos de funções distintas, tais como: módulo de sensores de umidade e temperatura, acionamento de válvulas, acionamento de bombas, controle de vazão e um ou mais módulos centralizadores conectados ao computador central. A Rede foi submetida a testes de uso em manejos de irrigação de culturas de melancia e milho, onde os módulos sensores e atuadores desenvolvidos foram administrados através do gerenciamento de uma interface supervisora. O conjunto de dispositivos desenvolvidos para composição desta plataforma de controle teve sua qualidade comprovada em função de sua robustez, eficiência, capacidade de processamento e resposta de seus módulos sensores e atuadores, distribuídos dentro de um lote agrícola, localizado no perímetro de irrigação do Baixo Acaraú, no município de Marco a 220 km de Fortaleza.

Palavras-chave: Automação. Controle sem fio. Irrigação de Precisão.

ABSTRACT

Improving the efficiency of mechanisms and processes involved in irrigation can increase the performance of both production and the reduction of wasted water and energy. In this context, the aim of this study was to develop a platform of wireless control using a wireless sensor network and remote actuators able to automatize a conventional drip pressurized irrigation system. This work proposes the development of an integrated environment for the management of irrigation. It is composed by a central computer, mobile devices such as smartphones and tablets, and is able to offer availability of data and control capabilities via the Internet. The development and testing of capacitive sensors like FDR (Frequency Domain Reflectometry), remote modules, and the devices that drive the pumps and valves, are described in their performance and functionality characteristics. The study used hardware devices and software tools used in the design of projects dedicated to the monitoring and control of irrigation systems. The Wireless Control Network consists of independent modules sensors, able to communicate by radio frequency, having one or more communication end points (base stations). The system relies on a set of remote modules for different functions, such as: sensor module for humidity and temperature, valve actuation, drive pumps, flow control and one or more centralizers modules connected to the central computer. The Network was subjected to tests of use in irrigation management of crops of watermelon and corn, where the modules developed were administered by a supervisor through the management interface. The set of devices designed to control the composition of this platform has proven its quality in terms of their robustness, efficiency, processing capacity and response of their sensor modules and actuators, distributed within an agricultural plot, located on the perimeter of the Lower irrigation Acaraú in the city of Marco 220 km from Fortaleza.

Keywords: Automation. Wireless Control. Precision Irrigation.

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
SUMÁRIO.....	10
LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE TABELAS.....	17
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	18
LISTA DE UNIDADES E SÍMBOLOS.....	20
1. INTRODUÇÃO	21
2. HIPÓTESE.....	23
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	24
3.1. Agricultura Irrigada	24
3.2. Sistemas de Irrigação	24
3.3. Irrigação Automatizada	29
3.4. Irrigação de Precisão.....	31
3.5. Transdutores versus Sensores	33
3.5.1. Classificação de sensores	35
3.5.1.1. Sensores Analógicos	35
3.5.1.2. Sensores Digitais	35
3.5.2. Caracterização dos Sensores.....	35
3.5.2.1. Sensibilidade.....	35
3.5.2.2. Exatidão (Acurácia).....	36
3.5.2.3. Precisão.....	36
3.5.2.4. Linearidade	36
3.5.2.5. Range	37
3.5.2.6. Histerese	37
3.5.2.7. Tempo de resposta	37
3.5.3. Erros nos Sensores.....	37
3.5.3.1. Aplicação	38
3.5.3.2. Inserção.....	38
3.5.3.3. Dinâmicos.....	38
3.5.3.4. Característicos	38
3.5.3.5. Ambiente	38

3.5.3.6. Erros de instrumentação eletrônica	38
3.5.4. Sensores para monitoramento agrícola de áreas irrigadas	39
3.5.4.1. Sensor de Vazão Ultra-Sônico.....	40
3.5.4.2. Sensor de vazão por rotação.	41
3.5.4.3. Sensores de nível	42
3.5.4.4. Sensor de pressão	45
3.5.4.5. Sensores de Temperatura.....	46
3.5.4.6. Sensores de Umidade Relativa (UR) do Ar.....	50
3.5.4.7. Sensores de Umidade do Solo	51
3.6. Conversores AD e DA.....	63
3.6.1. Conversor Digital Analógico (D/A)	63
3.6.2. Conversor Analógico Digital (A/D)	66
3.7. Componentes Atuadores.....	68
3.7.1. Motobombas	68
3.7.2. Inversores de Frequência	69
3.7.3. Válvulas Hidráulicas de Controle Elétrico	71
3.7.4. Controladores Eletrônicos	72
3.8. Rede de Controle sem Fio na Agricultura de Precisão	72
3.8.1. Rede de Sensores sem Fio (RSSF)	73
3.8.2. Rede de Atuadores sem Fio (RASf)	75
3.9. Protocolos de Comunicação Serial	76
3.9.1. EIAS232	76
3.9.2. I2C	77
3.9.3. USB.....	79
3.9.4. ModBus.....	81
3.9.5. TCP-IP	81
3.9.6. Bluetooth.....	82
4.0. DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE.....	85
4.1. Módulo Principal	85
4.1.1. Fonte de Alimentação	85
4.1.2. Etapa de Regulagem de Tensões	86
4.1.3. Microcontrolador	87
4.1.4. Modo <i>Sleep</i> de baixo consumo	88
4.1.5. Transceptor	91

4.1.6. Layout da Placa de Circuito.....	93
4.2. Módulo de Multiplexação dos Sensores	93
4.2.1. Chaveamento dos Sensores.....	94
4.2.2. Layout da Placa.....	95
4.3. Módulo Master	95
4.3.1. Fonte de Alimentação	96
4.3.2. Fonte Carregadora de Bateria por Painel Solar	97
4.3.3. Microcontrolador	99
4.3.4. Conexão RS232	99
4.3.5. Conexão USB	100
4.3.6. Conexão Bluetooth	104
4.4. Módulo de controle de Válvulas.....	107
4.5. Módulo de partida direta de Bombas.....	111
4.6. Módulos de controle do Inversor	113
4.6.1. Módulo de controle <i>Multi Step</i> do Inversor.....	114
4.6.2. Módulo de controle do Inversor por barramento Modbus.....	116
4.7. Sensor Capacitivo I2C.....	119
4.8. Sensor Capacitivo de Umidade do solo Bluetooth	123
4.9. Módulo de Interface Ethernet	127
5.1. Rotinas de Comunicação.....	129
5.2. Drives Controle ModBus.....	131
5.1.3. <i>Drives</i> I2C.....	137
5.2. Interfaces Gráficas	141
5.2.1. Interface Supervisora Desenvolvida no Builder C.	142
5.2.2. Interface de Comunicação Ethernet.....	144
5.2.3. Interface Supervisora Desenvolvida em Delphi.	145
5.2.5. Interface Supervisora Desenvolvida para Android.....	154
6.0. RESULTADOS	159
7.0. CONCLUSÕES.....	160
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	161
ANEXOS	167
ANEXO A – Características Básicas do Microcontrolador PIC18F4550	167
ANEXO B – Características Básicas do Transceptor Laipac TRW 2.4GHz.	170
ANEXO C – Rotina para teste do Módulo Transceptor.....	172

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aspersor.	25
Figura 2 – Microaspersores de micro tubo.	26
Figura 3 – (a) Pivô Central, (b) Vista Parcial de Área irrigada por Pivô Central.....	27
Figura 4 – (a) Distribuição da água por sifonagem, (b) Irrigação por superfície.	28
Figura 5 – (a) Tubo de gotejadores, (b) Gotejador.	29
Figura 6 - Comparação do bulbo úmido real ao gerado pelo Surfer.	32
Figura 7 – Desvio da reta ideal.....	36
Figura 8 - Curva típica de histerese.	37
Figura 9 - Cadeia de medição genérica	39
Figura 10 – Sensores ultra-sônicos instalados para medição de vazão em fluidos.	40
Figura 11 – (a) Sensor de Vazão (<i>Water Flow sensor</i>) por hélices, (b) Vista interna.....	41
Figura 12 - Nível de líquido por posição da superfície.	43
Figura 13– Medição direta da pressão sob o líquido (a), medição relativa da pressão (b).....	44
Figura 14 - Sonda capacitiva.	45
Figura 15 – Sensor de Pressão on-chip (MPX5010).	46
Figura 16 - Efeito Seebeck.	48
Figura 17 - Sensores de umidade relativa do ar.....	50
Figura 18 - Sensor Capacitivo de umidade relativa.....	51
Figura 19 – Características comuns das sondas de Nêutrons.	52
Figura 20 - Layout do tensiômetro eletrônico (a), disposição do circuito eletrônico (b), sensor (c).....	54
Figura 21 - Características comuns em sondas TDR.....	55
Figura 22 - Sensor Capacitivo FDR (a), Sensores capacitivos FDR encapsulados com resina epoxy (b).....	59
Figura 23 – Características geométricas do seno capacitivo.	60
Figura 24 - Segmento de PVC contendo amostra de solo indeformada (a) e detalhe, interno e externo, de sua parte inferior (b), (CRUZ, 2009).	61
Figura 25 - Dispersão dos dados do teor de água do solo versus respostas do sensor capacitivo.....	62
Figura 26 - Sinal Analógico e Sinal Digital	63
Figura 27 - Diagrama de um conversor D/A.	63
Figura 28 – Diagrama em blocos de um conversor D/A.	65

Figura 29 – Diagrama esquemático de conversor D/A básico.	65
Figura 30- Conversor A/D em Bloco.	66
Figura 31 – Conversor A/D por múltiplas aproximações.....	68
Figura 32 – Diagrama da estrutura simplificada de um inversor de frequência.....	70
Figura 33 – Modulação por Pulsos (PWM).....	70
Figura 34 – Quadro de solenóides para comando de válvulas por tubos condutores de pressão.	71
Figura 35 - válvulas solenóides gerenciadas por um controlador.	72
Figura 36 - Sistema de interconexão de dispositivos em um barramento serial I2C.....	78
Figura 37 - Vias de comunicação <i>open drain</i>	79
Figura 38 - Circuito de acoplamento da Bateria.....	86
Figura 39- Bloco de regulagem das tensões.	87
Figura 40 – Características do microcontroladores da Família 18F da Microchip.	87
Figura 41 - Gráfico da frequência de clock em função da tensão de alimentação no PIC18F4550.....	88
Figura 42 - Esquema de alimentação do Microcontrolador no módulo sensor.....	88
Figura 43 - Componentes externos para o dimensionamento do oscilador do Timer1.	89
Figura 44 –Transceptor TRW-24G da Laipac.....	91
Figura 45 – Esquemático do nRF2401A para projetos com uma única antena de 50 Ω	92
Figura 46 – Placa principal dos módulos remotos (a) Layout do PCB (b).....	93
Figura 47 - Esquema do circuito de controle dos sensores.....	94
Figura 48 - <i>Drive</i> de Leitura dos Sensores. Vista superior da placa (a). Layout das trilhas (b).	95
Figura 49 - Módulo <i>Master</i>	96
Figura 50 - O circuito da fonte do módulo <i>master</i>	97
Figura 51 – Esquemático da fonte com controle de carga para bateria.	98
Figura 52 – Esquemático da fonte de corrente com limitação em Tensão.	99
Figura 53. Esquema de ligação do MAX232.	100
Figura 54 - Visão geral e características do periférico USB (Microchip).	101
Figura 55 – Simulação no Proteus.....	104
Figura 56 – Módulo Bluetooth visão geral (a), circuito em blocos (b).	105
Figura 57 - Placa de teste da conexão Bluetooth.....	106
Figura 58 – Circuito do <i>drive</i> de controle das válvulas tipo Latch.....	108
Figura 59 - Esquemático da ponte H para controle dos solenóides.....	108

Figura 60– Cavalete de derivação da adutora principal para as quatro áreas irrigadas, controladas por válvulas do tipo Latch.....	109
Figura 61 – Pinos de conexão da dual Ponte L298 (a), placa de teste (b).....	109
Figura 62 – Esquemático da Unidade de controle das Válvulas.	110
Figura 63 - Acionamento de carga CA utilizando MOC3021 e Tiristor.....	112
Figura 64 - Primeiro protótipo de acionamento do conjunto motor bomba.....	112
Figura 65 - Painel IHM para a configuração manual do inversor.	114
Figura 66 – Borne de conexão para controle através de painel analógico e comandos digitais.	114
Figura 67 – (a) Inversor Delta de 5 CV, (b) esquemático de conexão dos opto-acopladores 4N25.	115
Figura 68 – Conector RJ-11 disponível no <i>drive</i> de controle do inversor.....	117
Figura 69 – Frame de comunicação de dados.....	117
Figura 70 – Diagrama elétrico de conexão do barramento ModBus.....	118
Figura 71 - Teste de controle do inversor com o protocolo Modbus.	119
Figura 72 – Diagrama do sensor I2C em blocos.	120
Figura 73 – Diagrama esquemático do Sensor Capacitivo I2C.....	122
Figura 74 – Diagrama em bloco do sensor de umidade Bluetooth.....	124
Figura 75 –Topologias de Redes de Bluetooth.....	125
Figura 76 – Implantação de uma rede de sensores de umidade do solo via Bluetooth.	126
Figura 77 – Protótipo do sensor Bluetooth.....	127
Figura 78 - Módulo de conversão Ethenert para serial RS232 da Tibo modelo EM100.	128
Figura 79 - <i>Drive</i> de interface Ethernet, utilizando o CI – ENC28J60	129
Figura 80 – Desenho esquemático da comunicação dos módulos sensores.....	130
Figura 81 - Fluxograma do programa de comunicação dos módulos sensores.....	131
Figura 82 - Configuração da porta Modbus.	136
Figura 83 - Configuração da frequência do inversor.....	136
Figura 84 - Comando de partida.	137
Figura 85 - Comando de parada.	137
Figura 86 – Código simplificado do <i>drive</i> I2C.....	138
Figura 87 – Rotina de testes do Módulo mestre.	139
Figura 88 - Bancada de desenvolvimento e testes do sensor I2C.....	141
Figura 89 – Janela de configuração dos módulos sensores.	144
Figura 90 – Interface Java de comunicação Ethernet.....	145

Figura 91 - Ambiente de desenvolvimento do Delphi.....	147
Figura 92 - Componentes utilizados no desenvolvimento da interface supervisória.	148
Figura 93 - Versão mais recente da interface supervisiória desenvolvida em Delphi.	149
Figura 94 - Painel de Controle e Visualização.	151
Figura 95 - Painel de Configurações de Controle	153
Figura 96 - Arquitetura Plataforma Android	155
Figura 97 – IDE Eclipse versão JUNO.	156
Figura 98 – Smartphones utilizados para o desenvolvimento e testes das interfaces.....	157
Figura 99 – Interface Android para testes de controle e leitura de sensores.	158
Figura 100 - Página inicial do Data-Sheet.....	167
Figura 101 - Diagrama de pinos.	168
Figura 102 - Características do dispositivo.	168
Figura 103 - Diagrama em blocos do PIC18F4455/4550.....	169

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de erros relacionados aos blocos de um sistema transdutor	39
Tabela 2 - Especificações Técnicas.	42
Tabela 3 - Constante dielétrica relativa dos componentes do solo.....	57
Tabela 4 – <i>True-table</i> do conversor D/A.....	64
Tabela 5 – <i>True-table</i> do conversor A/D.....	67
Tabela 6 – Categorias de dispositivos Bluetooth.....	83
Tabela 7 - Descrição da função dos pinos do módulo TRW-24G.....	92
Tabela 8 – Modos de comunicação USB.	102
Tabela 9 – Funções básicas.	103
Tabela 10 - Recursos de Hardware.....	106
Tabela 11 - Recursos de conexão <i>in circuit</i>	107
Tabela 12 - Lógica de Controle Mult-Step do inversor Delta-VFD.....	115
Tabela 13 – Frequência de rotação do inversor em função da pressão de serviço.....	116
Tabela 14 – Modelo do pacote Modbus no modo RTU.	132
Tabela 15 - Funções e registradores para o controle do inversor	133
Tabela 16 – Configuração do registrador de controle.	134
Tabela 17 – Controles de Configuração para envio de Email	152

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	- Conversor Analógico Digital
AJAX	- <i>Asynchronous JavaScript and XML</i>
Anatel	- Agência Nacional de Telecomunicações
API	- <i>Application Programming Interface</i>
ARM	- <i>Advanced RISC Machine</i>
ARP	- <i>Address Resolution Protocol</i>
CAN	- <i>Controller Area Network</i>
CDC	- <i>Communication Device Class</i>
CGI	- <i>Common Gateway Interface</i>
CNPq	- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CRC	- <i>Cyclical Redundancy Check</i>
CSP	- <i>C Language Service Page</i>
CSS	- <i>Cascaded Style Sheets</i>
CDA	- Conversor Digital Analógico
Db	- Decibel
DDNS	- <i>Dynamic Domain Name System</i>
DENA	- Departamento de Engenharia Agrícola
DHCP	- <i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>
DNS	- <i>Domain Name System</i>
EWS	- <i>Embedded Web Server</i>
FAO	- <i>Food and Agriculture Organization</i>
FDR	- <i>Frequency Domain Reflectometry</i>
HID	- <i>Human Interface Device</i>
HTML	- <i>Hypertext Markup Language</i>
HTTP	- <i>Hypertext Transfer Protocol</i>
I2C	- <i>Inter Integrated Circuit</i>
IBM	- <i>International Business Machine</i>
ICMP	- <i>Internet Control Message Protocol</i>
ICSP	- <i>In-Circuit Serial Programming</i>
IEEE 802.11	- Normatiza a criação de um padrão para o uso de redes sem fio.
IP	- <i>Internet Protocol</i>
ISM	- <i>Industrial, Scientific, and Medical</i>

LEMA	- Laboratório de Eletrônica e Mecanização Agrícola
LVDT	- <i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MCU	- <i>Microcontroller Unit</i>
MSB	- <i>Most Significant Bit</i>
NTC	- <i>Negative Temperature Coefficient</i>
PC	- <i>Personal Computer</i>
PCB	- <i>Printed Circuit Board</i>
PIC	- <i>Peripheral Interface Controllers</i>
PTC	- <i>Positive Temperature Control</i>
PVC	- Policloreto de vinila
RAM	- <i>Random Access Memory</i>
RARP	- <i>Reverse Address Resolution Protocol</i>
RISC	- <i>Reduced Instruction Set Computer</i>
ROM	- <i>Read Only Memory</i>
RSSF	- Rede de Sensores Sem Fio
SIG	- <i>Bluetooth Special Interest Group</i>
SCADA	- <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SMD	- Componentes de Montagem Superficial
SMTP	- <i>Simple Mail Transfer Protocol</i>
SSI	- <i>Server Side Include</i>
TCP	- <i>Transmission Control Protocol</i>
UDP	- <i>User Datagram Protocol</i>
UFC	- Universidade Federal do Ceará
USB	- <i>Universal Serial Bus</i>
WSN	- <i>Wireless Sensor Network</i>
XML	- <i>Extensible Markup Language</i>
LRC	- <i>Longitudinal Redundancy Check</i>

LISTA DE UNIDADES E SÍMBOLOS

- m.c.a - metros de coluna d'água 1 (1 m.c.a = 9,7 kPa);
- ha - hectare (1 ha = 10.000 m²);
- V_{th} - tensão do equivalente Thevenin (V)
- f - frequência de coleta de dados
- v - frequência da onda eletromagnética
- N_b - número de baterias
- P_{med} - potência média (W)
- Q - vazão (m³/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

1. INTRODUÇÃO

A expansão da agricultura irrigada tornou o setor agrícola o maior consumidor de água. Em escala mundial a agricultura consome cerca de 69% de toda a água derivada das fontes (rios, lagos e aquíferos subterrâneos), e os outros 31% são consumidos pelas indústrias e uso doméstico (FAO, 2012). Portanto, trata-se do elemento essencial ao desenvolvimento agrícola, onde sem o controle e a administração adequada, não será possível a manutenção de uma agricultura sustentável.

A irrigação envolve o conjunto de técnicas artificiais para aplicação de água em áreas cultivadas, com o objetivo de atender às necessidades hídricas da cultura explorada. O esforço busca viabilizar a produtividade agrícola em áreas sem as estruturas naturais necessárias para sua prática.

A criação de diferentes métodos de irrigação, agregada ao exponencial desenvolvimento tecnológico assistido nas últimas décadas, traduziu-se no aumento da produtividade e na qualidade dos produtos. Os exemplos exportados por Israel apresentam a importância das tecnologias relacionadas à irrigação, transformando regiões áridas, de solo impróprio, com grande escassez de chuvas, em exportadoras de cereais e frutas.

A agricultura irrigada segue os mesmos padrões que qualquer outra atividade econômica desenvolvida pelo homem, recebendo investimentos quando uma combinação de fatores, de ordem social, tecnológica, comercial, política ou econômica, convergem para condições favoráveis de investimentos em escala nacional e mundial (Rossi, Hernandez, 2001).

O manejo racional da irrigação significa a adequada aplicação de água nas plantas, considerando sempre a quantidade e o momento certo. O produtor rural, por não ter acesso a métodos de controle e temendo perdas na produção ocasionadas por carência hídrica, passa a irrigar em excesso. O excesso de umidade, provocado por práticas inadequadas de irrigação, gera problemas colaterais como o desperdício de energia, água, bem como insumos arrastados por percolação profunda aos mananciais freáticos. Entretanto, em cenários onde temos elevado custo com energia elétrica, a falta de informações mais precisas sobre as reais condições de solo e planta expõem a produção agrícola ao risco do déficit hídrico, ou leva o produtor a uma situação de inviabilidade comercial, comprometendo o potencial competitivo de toda uma região (LIMA, FERREIRA, CHRISTOFIDIS, 1998).

A eficiência na irrigação pode ser atingida procurando os melhores índices na relação entre a quantidade de água disponível para a cultura e a eficiência de aplicação do sistema para suprir suas necessidades. Quanto menores forem as perdas de água causadas pelo escoamento superficial, evaporação e percolação profunda, maior será a eficiência de aplicação de um sistema.

O avanço da tecnologia, nas últimas décadas, trouxe progressos para o setor agrícola, contribuindo em vários aspectos do processo produtivo, levando técnicas modernas de automação e controle para o manejo adequado dos recursos hídricos. A forte ênfase na adoção de tecnologias para o aperfeiçoamento do manejo da irrigação tem promovido o investimento em novas ferramentas capazes de controlar com maior precisão o uso dos recursos disponíveis, sejam eles água ou eletricidade, tratando de forma racional e equilibrada importantes questões ambientais, como o reaproveitamento da água e a degradação do solo.

Inovações tecnológicas estão sendo testadas e aos poucos implantadas na realidade das práticas agrícolas. O monitoramento das reais condições físico-climáticas, no campo, encontra atualmente em uma vasta gama de sensores e atuadores, as condições viáveis para a manutenção, em Tempo Real, das condições ideais de produtividade. Dentre estas tecnologias, encontram-se estudos sobre o uso de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) no campo. As RSSF constituem-se de módulos autônomos dotados de processamento embarcado e comunicação, oferecendo recursos de monitoramento e controle de dispositivos com grande praticidade e economia, permitindo sua rápida implantação em diversos contextos ambientais. Esta tecnologia vem sendo aplicada nas áreas de engenharia civil, militares, saúde, no monitoramento ambiental e na agricultura (ILYAS; MAHGOUB, 2005). Neste sentido, serão discutidos a seguir alguns tópicos que repercutiram no itinerário do seu desenvolvimento.

As RSSF firmam-se como ferramentas em uma plataforma instrumental com vários recursos de monitoramento e controle, onde se podem avaliar e administrar o manejo dos recursos hídricos e demais insumos ligados à irrigação. O real aproveitamento das potencialidades desta ferramenta exige o desenvolvimento de novos dispositivos periféricos, que agreguem maior robustez e flexibilidade ao sistema, provendo as melhores condições de interatividade do usuário com o sistema a ser controlado. A agregação destas potencialidades carrega os recursos computacionais necessários para auto-adaptação e o gerenciamento remoto das variáveis operacionais, capacitando o sistema às mais variadas situações encontradas na agricultura irrigada, tais como, disponibilidade de água, condições ambientais, tipos de solo e culturas diferentes.

Os algoritmos de controle distribuídos nas RSSF, somados aos muitos atuadores (bombas e válvulas) instalados na malha hidráulica de um sistema de irrigação, permite, em seu funcionamento contínuo, o auto-ajuste dos intervalos de irrigação sempre em busca dos melhores índices de eficiência. Portanto, de acordo com o contexto e com o objetivo de oferecer recursos técnicos e científicos para o desenvolvimento de uma irrigação de alto nível tecnológico, este trabalho tem por objetivo:

- Adaptação dos sensores capacitivos de umidade do solo aos novos padrões de comunicação e controle.
- Desenvolvimento de uma plataforma modular para monitoramento e controle de um sistema de irrigação pressurizado
- Desenvolvimento de *software* de gerenciamento da malha de controle para os ambientes Windows, Linux e Android;
- Realizar simulações de controle para testes de funcionalidade e desempenho dos módulos desenvolvidos.

2. HIPÓTESE

1. É possível o desenvolvimento de uma plataforma de controle sem fio, funcional e robusta, agregando aos sistemas de irrigação os modernos padrões de tecnologia com baixo custo.

2. O uso de uma plataforma de controle sem fio para sistemas de irrigação pressurizada permite uma automação mais rápida e a adoção de técnicas de controle mais eficientes que os atuais sistemas convencionais.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Agricultura Irrigada

O crescimento populacional tem obrigado a humanidade a usar a maior quantidade possível de solo agricultável. Nesta jornada o uso da irrigação tem exercido papel fundamental na exploração das mais diferentes áreas, controlando os excessos em regiões úmidas e tornando produtivas regiões áridas e semi-áridas. Atualmente, mais de 50% da população mundial depende de produtos irrigados. As políticas no Brasil, país privilegiado com 8% da água disponível no mundo, permaneceram durante muito tempo sem dar a devida atenção ao uso e à preservação de seus recursos hídricos, conseqüentemente muitas medidas deixaram de ser tomadas. Diante do quadro mundial que se desenha em torno da escassez desse recurso, as atenções se voltam para o aproveitamento racional e sustentável dos recursos hídricos, procurando reparar perdas e aproveitar de forma eficiente as enormes potencialidades produtivas que o país dispõe.

O manejo racional da irrigação é resultado de métodos de controle e gerenciamento dos recursos hídricos disponíveis, visando à manutenção das condições ideais para o desenvolvimento agrícola, evitando tanto a falta como o excesso de água aplicada, fatores diretamente relacionados ao crescimento, sanidade e produtividade das plantas. Em qualquer projeto de irrigação deve ser considerada a sustentabilidade da região em seus aspectos sociais e ambientais, procurando maximizar a produtividade com a eficiência necessária para preservação de seus recursos. Nesse aspecto a eficiência do controle deve manter as condições favoráveis de umidade e fitossanidade, melhorando ou preservando as características físicas, químicas e biológicas do solo (BERNARDO, 2008). O planejamento e a operação de sistemas de irrigação devem basear sua execução, relacionando à obtenção de máxima produtividade por unidade de água aplicada (BERNARDO, SOARES & MANTOVANI, 2006).

3.2. Sistemas de Irrigação

Existe uma lista de Sistemas de Irrigação com características funcionais desenvolvidas para contextos diferentes de culturas, terrenos e disponibilidade de água. Os próximos itens tratam das características básicas dos sistemas de irrigação mais utilizados atualmente.

a) Aspersão convencional

O aspersor (Figura 1) é o elemento mecânico de maior importância no sistema de aspersão, sendo responsável pela pulverização do jato d'água. Os aspersores molham uma área circular da superfície do terreno, devendo haver uma sobreposição dessas áreas para se conseguir melhores condições de uniformidade e distribuição de água. Diversos fatores influenciam diretamente o seu funcionamento. Saber identificar e lidar com esses fatores garante o sucesso do sistema de irrigação.

Nos métodos de aspersão, são lançados jatos de água ao ar que caem sobre a cultura na forma de chuva. Existem sistemas inteiramente móveis, com a mudança de todos os seus componentes até os totalmente automatizados (fixos). No método convencional, a linha principal é fixa e as laterais são móveis. Este método requer menor investimento de capital, mas exige mão-de-obra intensa, devido às mudanças da tubulação. Uma alternativa extremamente interessante e que tem sido utilizada pelos agricultores irrigantes é uma modificação na aspersão convencional, a chamada aspersão em malha, onde as linhas principais, de derivação e laterais ficam fixas, sendo móveis somente os aspersores. Esse tipo de sistema tem sido bastante utilizado no Brasil principalmente para a irrigação de pastagem, cana-de-açúcar, café e arroz (BISCARO, 2009).

Figura 1 – Aspersor.



Fonte: Livro Sistemas de irrigação por aspersão (BISCARO, 2009).

b) Microaspersão

Dentre os sistemas de irrigação localizada se encontra a microaspersão. O sistema de irrigação por microaspersão é uma variação do gotejamento oriunda da dificuldade de se

obter uma distribuição melhor da umidade do solo, sobretudo em solos arenosos e em culturas realizadas em grandes espaçamentos (VIEIRA, 1989).

A microaspersão possui uma eficiência maior que a aspersão convencional (90%), sendo muito utilizada para a irrigação de culturas perenes. Também é considerada irrigação localizada, porém, a vazão dos emissores (chamados microaspersores) é maior que a dos gotejadores. O sistema de microaspersão é caracterizado por apresentar pressão operacional menor que 20 mca, vazão de 20 a 100 L h⁻¹ e diâmetro de alcance dos emissores variando de 1,5 a 10 m (BOMAN, 1989).

O desempenho hidráulico de um emissor é determinado, dentre outros fatores, pela relação vazão e pressão. Segundo Botrel (1984), a relação entre vazão e pressão na entrada do emissor, a perda de carga localizada na inserção da linha lateral, o alcance do jato, o diâmetro, a forma dos bocais e a intensidade de precipitação constituem as principais características hidráulicas do microaspersor (Figura 2).

Figura 2 – Microaspersores de micro tubo.



Fonte: <http://portalbiosistemas.wordpress.com>, 2012.

c) Pivô Central

Por volta de 1950, aparece no Estado de Nebraska (EUA), o primeiro sistema de pivô central, inventado por Frank Zybach. Este sistema foi patenteado em 1952 e sua produção em série começou um ano depois (Figura 4) (CARVALHO & SILVA, 2007)

O sistema de pivô-central permitiu a automação de todo o processo. Os primeiros sistemas foram projetados para ajustar-se ao terreno devido à capacidade da tubulação de fletir entre as torres. O desenvolvimento de juntas flexíveis, colocadas em cada torre, permitiu ao sistema adequar-se melhor a várias condições de terreno. Sistemas que controlavam automaticamente a aplicação de água, através de válvulas programadas eletronicamente, foram instalados no leste do Colorado no fim dos anos sessenta.

O sistema consiste basicamente em uma tubulação metálica onde são instalados os aspersores. A tubulação que recebe a água de um dispositivo central sob pressão, chamado de ponto do pivô, se apóia em torres metálicas triangulares, montadas sobre rodas, geralmente com pneus. As torres movem-se continuamente acionadas por dispositivos elétricos ou hidráulicos, descrevendo movimentos concêntricos ao redor do ponto do pivô (Figura 3). O movimento da última torre inicia uma reação de avanço em cadeia de forma progressiva para o centro. Em geral, os pivôs são instalados para irrigar áreas de 50 a 130 ha, sendo o custo por área mais baixo à medida que o equipamento aumenta de tamanho. Para otimizar o uso do equipamento, é conveniente além da aplicação de água, aproveitar a estrutura hidráulica para a aplicação de fertilizantes, inseticidas e fungicidas.

Figura 3 – (a) Pivô Central, (b) Vista Parcial de Área irrigada por Pivô Central.



(a)



(b)

Fonte: http://www.bndes.cnpm.embrapa.br/textos/a_irrig.htm, (2012).

d) Sulco

No método de irrigação por superfície, a água é derivada de canais, através de sifonagem manual (Figura 4) percorrendo canais abertos no solo, denominados sulcos (Figura 4), o deslocamento da água é proporcionado pela ação da gravidade imposta a um terreno tratado com pequena inclinação. Tem menor custo fixo e operacional, e consome

menos energia que os métodos por aspersão. É o método ideal para cultivos em fileiras. Deve ser feito em áreas planas. Exige investimento a mão-de-obra. Possui baixa eficiência, em torno de 30 a 40% no máximo. Atualmente, devido à escassez de água no mundo e problemas ambientais, inclusive para a irrigação, esse método tem recebido várias críticas devido a baixa eficiência conseguida. (BERNARDO, SOARES & MANTOVANI, 2006)

Figura 4 – (a) Distribuição da água por sifonagem, (b) Irrigação por superfície.



(a)

(b)

Fonte: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br>, (2012).

e) Gotejamento

Nesse sistema, a água é levada sob pressão por tubos, até ser aplicada ao solo através de emissores diretamente sobre a zona da raiz da planta, em alta frequência e baixa intensidade atingindo uma eficiência na ordem de 90%.

O sistema de irrigação utilizado neste trabalho será o de gotejamento que está entre os métodos pressurizados que dependem de bombeamento. Nesse sistema, a água é levada sob pressão por tubos (Figura 5-b), até ser aplicada no solo através de emissores diretamente sobre a zona radicular da planta (Figura 5-a), com alta frequência e baixa intensidade. O sistema pode atingir uma eficiência na ordem de 90% e vem sendo muito utilizado em culturas perenes, fruticulturas, e na produção de hortaliças e flores. A maior procura por este tipo de irrigação está especialmente ligada à sua baixa necessidade de água, quando comparado aos demais sistemas. A instalação pode ser à superfície ou enterrada, mediante análise criteriosa da cultura a ser irrigada (MANTOVANI & RAMOS, 1994).

Figura 5 – (a) Tubo de gotejadores, (b) Gotejador.



Fonte: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br>, (2012).

3.3. Irrigação Automatizada

O produtor nacional tem procurado, nas novas tecnologias, recursos capazes de aumentar a eficiência no uso da água e da energia com a possibilidade de controlar a aplicação de produtos químicos, redução da mão-de-obra, e principalmente incrementar a produção agrícola. Os sistemas automáticos de controle da irrigação tornaram-se uma ferramenta essencial para a aplicação de água na quantidade e momento certos, contribuindo para a manutenção da produção agrícola e para o uso eficiente dos recursos hídricos. A automação permite também o controle de outras operações correlacionadas, tais como a fertirrigação, retrolavagem e operação à distância das Motobombas e válvulas distribuídas em uma malha hidráulica. A contribuição de sistemas automáticos de controle na área de manejo de irrigação poderá ser significativa no sentido de reduzir os custos de produção e diminuir os impactos da irrigação sobre a disponibilidade destes recursos.

O controle da irrigação depende de vários parâmetros, tais como:

- disponibilidade de água (e suas características);
- características dos sistemas de irrigação;
- capacidade de monitoramento;
- características da planta;
- grau de automação.

Definidos os parâmetros, os objetivos do controle aplicam-se no alcance da eficiência de irrigação, atuando nos pontos de determinação das variáveis, de tempo e espaço, referentes ao momento de início da irrigação, sua duração e em quais locais deve ser aplicada.

Diante da falta do suporte técnico necessário para o correto manejo da irrigação, muitos agricultores não utilizam qualquer tipo de estratégia, e o seu controle automatizado ainda é incipiente (QUEIROZ et al., 2005). No entanto, a automação na maioria dos sistemas de irrigação tem ocorrido com grande intensidade nesta última década, fenômeno promovido pela abertura do mercado brasileiro às importações de soluções técnicas, principalmente com relação à irrigação localizada, aonde muitos produtos vem sendo desenvolvidos por empresas israelenses, européias e americanas. O uso das novas tecnologias pode prover redução nos custos com mão-de-obra e ainda possibilitar um maior aproveitamento operacional do tempo, como por exemplo, a administração de irrigações noturnas em grandes áreas sem a necessidade de acompanhamento humano, redução dos custos com energia de bombeamento, principalmente em regiões onde existem políticas de redução nas tarifas de energia para o período noturno. A automatização pode ainda atuar na redução da potência de acionamento e na melhor definição dos instantes e intervalos de irrigação, medidas que resultaram em eficiência na aplicação da água (SUZUKI, HERNADEZ, 2008).

No arsenal instrumental da automação levado ao campo encontram-se vários componentes complementares, tais como uma grande variedade de válvulas e controladores eletrônicos que possibilitam a construção de malhas hidráulicas capazes de atender com eficiência as mais variadas condições encontradas no campo.

Os controladores eletrônicos também contam com certa variedade de marcas, sendo a maioria destas importadas. Esses dispositivos controladores são conectados diretamente em válvulas, através de cabos elétricos ou ainda via rádio frequência, podendo ser programados manualmente ou por controle remoto. Em um sistema de irrigação o controlador é considerado o "gerente" da irrigação. Ele é dotado de um sistema embutido capaz de processar as informações nele inseridas, fazendo o equipamento trabalhar de forma ordenada. A sua operação consiste na configuração dos horários e intervalos de funcionamento. Em geral os controladores apresentam uma fonte de alimentação de 110 ou 220 V, com saída de 24 VAC para o acionamento das válvulas, possuem em seu hardware, memória para a criação de programas de controle independentes com programação de vários turnos durante os dias da semana, permitem ainda programação individual semi-automática ou manual. Estes controladores utilizam baterias para manutenção da programação nos casos de queda de energia e possuem entradas para o acoplamento de alguns sensores de controle da irrigação.

Nos controladores tipo "*wireless*" (sem fio) a programação do início da irrigação, a duração da irrigação e o horário, costumam contar com o uso de computadores com interfaces mais sofisticadas, permitindo uma faixa mais ampla de programação, além de possuir outros recursos, tais como desligamento automático e monitoramento remoto de alguns sensores (ZAZUETA, 1993).

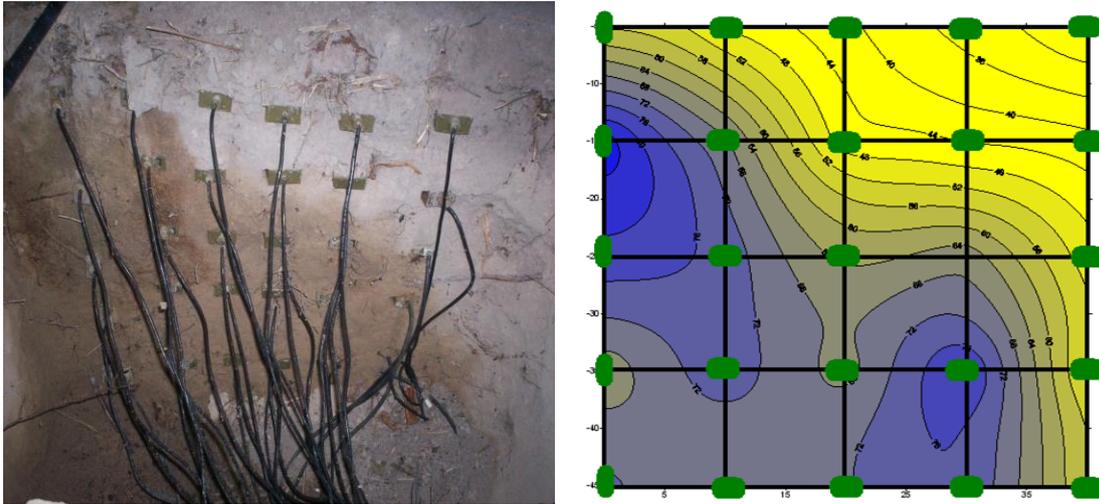
3.4. Irrigação de Precisão

A irrigação de precisão utiliza tecnologias que permitem aplicar quantidades uniformes de água em locais precisos dentro do perfil do solo, proporcionando tratamentos diferenciais de irrigação, tratando as plantas individualmente ou pequenas áreas dentro do campo. A irrigação de precisão busca sempre o uso eficiente da água, investindo em novas técnicas que ofereçam as máximas condições na aplicação de seus conceitos.

Entretanto, para torná-la um empreendimento viável, devem-se levar em conta alguns pontos fundamentais em torno da instrumentação utilizada, tais como os sistemas de aquisição de dados, que devem ser aliados a um bom gerenciamento de seus parâmetros, através de análises apuradas de suas variáveis, definindo a melhor administração dos recursos (SONKA; BAUER; CHERRY, 1997).

A procura por equipamentos capazes de atender as demandas de instrumentação, para automação e controle da irrigação, tem promovido investimentos em pesquisas e desenvolvimento de dispositivos mais eficientes e práticos. No trabalho de Teixeira e Coelho (2005) foi apresentado o desenvolvimento de um tensiômetro eletrônico para determinação da umidade do solo. Silva et al. (2005) apresenta o desenvolvimento de um sensor capacitivo para monitoramento da umidade do solo. Acompanhando a utilização de sensores no campo, foram desenvolvidos dispositivos *dataloggers* para leitura e armazenamento das variáveis monitoradas. O trabalho de Oliveira et al (2007) apresenta o desenvolvimento de um medidor digital portátil para leitura dos sensores capacitivos de umidade. A utilização de uma grade de sensores capacitivos no trabalho de Rocha Neto (2009) permitiu a análise e determinação dos bulbos úmidos formados por um sistema de irrigação por gotejamento. A grade de sensores (Figura 6) conectada a um computador, através de um sistema multiplexador desenvolvido para o experimento, foi capaz de revelar em várias tomadas o comportamento hidrostático do solo nas vizinhas do gotejador.

Figura 6 - Comparação do bulbo úmido real ao gerado pelo Surfer.



Fonte: Rocha Neto (2009).

Entretanto, a distribuição dos sensores dentro de áreas irrigadas tem encontrado alguns obstáculos para sua adequada utilização. A distribuição desconexa de sensores, dentro de uma área cultivada, sofre restrições quanto às distâncias percorridas por um operário no processo de realização das leituras. O tempo empregado para coleta e as condições climáticas encontradas durante as tomadas de dados, acabam por suprimir informações importantes sobre o comportamento hídrico do solo.

A interconexão dos sensores por fios vem atender a uma grande parte dos casos de monitoramento, agregando a praticidade da coleta de dados em tempo real e com alta taxa e amostragem. Entretanto, uma rede de sensores conectados por cabos apresenta algumas desvantagens quando aplicada a culturas de curto ciclo. Neste caso os custos com a distribuição de fios e sua reposição a cada nova cultura implantada seriam dispendiosos. É neste quadro onde se encaixam as tecnologias *wireless*, permitindo uma rápida implantação dos sensores e o seu reaproveitamento em vários ciclos. Unidades remotas de sensores podem acompanhar todo o processo de desenvolvimento de uma cultura, monitorando a umidade do solo e muitas outras variáveis, servindo de fonte de dados para o manejo adequado do sistema de irrigação. Santos et al (2007) propuseram o desenvolvimento de módulos remotos para formação de uma rede sem fio de sensores capacitivos de umidade. Os módulos remotos foram compostos de um microcontrolador, um transceptor, três sensores de umidade do solo e um sensor de temperatura. As unidades, alimentadas exclusivamente por baterias, administravam as leituras dos sensores, transmitindo os respectivos valores através de um

transceptor para uma unidade central conectada a um PC. Os valores recebidos no computador principal alimentam as planilhas com o valor residual da umidade para o dimensionamento do próximo turno de irrigação.

A grande quantidade de dados obtidos, a partir do uso das redes de sensores, viabilizou o uso de ferramentas computacionais mais dinâmicas para determinação dos turnos de rega. Algoritmos inteligentes passam a cooperar com os operadores do sistema de irrigação tornando transparentes os modelos matemáticos antes empregados. Rocha Neto (2011), apresentou o desenvolvimento de uma Rede Neural Artificial (RNA) do tipo perceptron com múltiplas camadas, utilizada para estimativa do tempo de irrigação. A RNA foi treinada e validada com dados coletados, em ciclos de culturas anteriores, praticadas na mesma área. Os dados atuais, de umidade do solo, coletados pela RSSF servem como entrada da RNA que responde com o tempo de irrigação necessário para reposição da umidade.

A precisão dos sistemas de irrigação requer ainda a utilização eficiente dos dispositivos atuadores. Motobomba, filtros e válvulas precisam de um manejo adequado em função das demandas do produtor e da área cultivada. O melhor dimensionamento da potência de pressurização do sistema e a capacidade de fracionamento da malha hidráulica agregam eficiência no consumo de água e energia. A operação dos dispositivos atuadores vem sendo praticada pelos irrigantes através do uso de controladores, dispositivos configurados através de agendas eletrônicas programáveis.

3.5. Transdutores versus Sensores

Os sensores podem ser considerados entre os mais importantes elementos nos modernos sistemas de automação agrícola, sendo o responsável pela realimentação do processo de controle, traduzindo em sinais elétricos, o comportamento do sistema. Segundo Albuquerque e Thomazini (2012) o termo sensor define um componente sensível a alguma manifestação de energia do ambiente, perturbações físicas do tipo térmica, óptica, cinética e outras capazes de interpretar de forma direta ou indireta o comportamento de grandezas, tais como, temperatura, pressão, velocidade, corrente, aceleração, posição dentre outras.

Os sensores são desenvolvidos para as mais diversas aplicações de monitoramento, dedicados à leitura das variáveis físicas, encontradas em inúmeros fenômenos naturais e processos produtivos. Entretanto, nem sempre estão totalmente preparados para determinadas aplicações de controle, sendo normalmente necessário o tratamento do sinal de

saída para a correta aplicação em uma planta de controle. A manipulação deste sinal de resposta utiliza circuitos de interface para o condicionamento de suas características originais. A sensibilidade a algumas fontes de energia produz sinais de baixíssima amplitude, níveis de tensão ou corrente em escala bem inferior à dos dispositivos de armazenamento e processamento, tornando necessária a sua amplificação. A situação contrária, onde grandes fontes de energia são monitoradas, também exigirá adaptações para a interface de sinais de alta potência com os circuitos de baixa potência encontrados nos sistemas de monitoramento e controle.

Durante as últimas décadas foi desenvolvida uma grande variedade de instrumentos de medição, capazes de atender a uma vasta gama de aplicações. Sejam na indústria, na área médica, nos transportes ou na agricultura, as informações sobre o funcionamento dos processos envolvidos devem estar sempre disponíveis para que as oscilações provenientes do meio ambiente possam ser corrigidas em tempo hábil, garantindo a segurança e a qualidade de produtos e serviços. A observação dessas variáveis é responsabilidade dos sensores que devem ser adequadamente instalados junto à planta de controle (THOMAZINI & ALBUQUERQUE, 2007).

A grande diversidade de sensores vem sendo aperfeiçoada ao longo do tempo, principalmente com o desenvolvimento da microeletrônica e sua popularização a partir das últimas décadas. Novos materiais foram descobertos e suas aplicações proporcionaram aos componentes eletrônicos em geral uma tendência à miniaturização, possibilitando cada vez mais a integração dos sensores aos circuitos condicionadores de sinais. Durante os anos 80, iniciou-se o desenvolvimento da produção dos sensores integrados e associados aos microcontroladores e sistemas transceptores, passaram a ter maior inteligência e flexibilidade, trabalhando em sistemas distribuídos, conectados em redes de comunicação através de cabos seriais (pares trançados), comunicações ópticas ou mesmo através de rádio frequência como o caso das RSSF (Redes de Sensores Sem Fio) (LOUREIRO, 2003). Nos sistemas de irrigação podem ser aplicados vários sensores com os mais diversos objetivos e grau de importância.

Um transdutor pode ser definido de forma geral como um dispositivo que recebe um sinal e o retransmite, transformando um tipo de energia em outro, através de um material sensor. O transdutor pode ser tratado também como o componente completo envolvendo o componente sensor e todos os circuitos necessários para interface com o sistema a ser controlado.

3.5.1. Classificação de sensores

Os sensores podem ser classificados em função do tipo de energia detectada, quanto ao seu princípio de funcionamento, ao tipo de material do qual foi confeccionado, tipo de sinal de saída, sensibilidade, exatidão precisão e outras características tratadas nos próximos sub-tópicos deste capítulo.

3.5.1.1. Sensores Analógicos

Os sensores analógicos são os dispositivos mais comuns, pois tratam do comportamento linear com que os fenômenos naturais de se manifestam, assumindo qualquer valor ao longo tempo.

3.5.1.2. Sensores Digitais

Os sensores digitais são limitados à leitura de estados de comportamento discreto, que possam ser traduzidos por zero ou um. As grandezas físicas naturais não se manifestam com esses valores, mas podem ser apresentados desta forma através de um circuito transdutor. Entretanto, uma série de eventos pode ser interpretada a partir da simples contagem de séries binárias, tais como, a passagem de objetos em uma esteira, a posição de uma cancela, distâncias percorridas e velocidades com o uso de *encoders* (THOMAZINI & ALBUQUERQUE, 2007).

3.5.2. Caracterização dos Sensores

A terminologia é específica em função de suas características principais, descritas conforme segue:

3.5.2.1. Sensibilidade

A sensibilidade ou ganho, de um sensor, é definido como a razão entre os sinais de saída e de entrada. Um sensor sensível é interpretado pela sua capacidade de gerar uma variação na saída provocada por uma pequena oscilação na grandeza observada. Por exemplo, um termômetro de mercúrio, tem o comprimento de coluna dilatada ou comprimida em função da variação de temperatura. Uma relação de 1 cm a cada 1°C define uma sensibilidade de 1cm/°C (THEBAS, 2009).

3.5.2.2. Exatidão (Acurácia)

Consiste na capacidade de um instrumento de medição em obter valor próximo ao valor esperado.

3.5.2.3. Precisão

O conceito indica o grau de concordância qualitativo entre os diversos resultados experimentais obtidos em condições de repetitividade em comparação ao valor esperado. Desta forma, boa precisão significa erro estatístico pequeno, com os resultados apresentando grande repetitividade. Entretanto, podemos ter situações de boa precisão com baixa exatidão, caso em que persiste um erro sistemático grande.

3.5.2.4. Linearidade

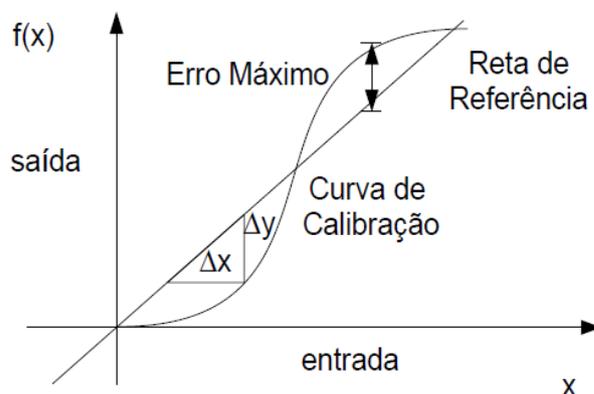
A linearidade de um sensor é o parâmetro que representa o quanto a sua curva característica desvia da curva ideal esperada (Figura 7). A linearidade costuma ser especificada em termos percentuais de não-linearidade, conforme apresentado na Equação 1

$$NãoLinearidade(\%) = \frac{D_{IN(MÁX)}}{IN_{FS}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Onde:

- $D_{IN(MÁX)}$ é o máximo desvio da curva ideal.
- IN_{FS} é a entrada máxima, admitida como escala total.

Figura 7 – Desvio da reta ideal



Fonte: UFRJ, 2013

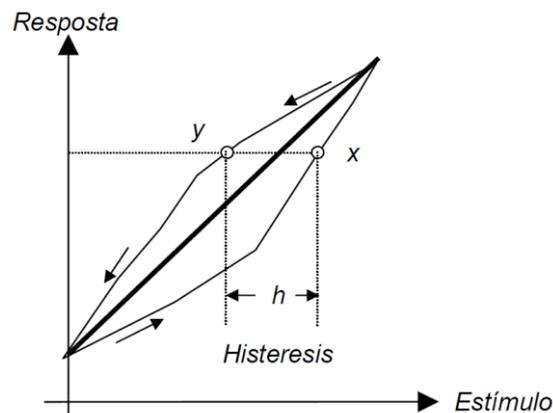
3.5.2.5. Range

Trata dos valores máximo e mínimo de entrada que podem ser medidos. Define os limites de linearidade do material sensor em relação à grandeza medida.

3.5.2.6. Histerese

A histerese representa a capacidade de acompanhar as mudanças nos parâmetros de entrada, em função da direção da mudança. A Figura 8 apresenta uma curva típica de histerese, onde é vista uma relação da saída com a direção da mudança. Por exemplo, um termômetro mostra 49° quando é aquecido e 51° quando é arrefecido. Neste caso a histerese é de 2°C ou $\pm 1^\circ\text{C}$.

Figura 8 - Curva típica de histerese.



Fonte: Produzida pelo autor.

3.5.2.7. Tempo de resposta

O período necessário para que o sensor atinja o valor real do processo, quando sujeito a mudanças no sinal de entrada é definido como tempo de resposta. O intervalo pode ser definido dentro de uma banda de tolerância entre o valor apresentado e o valor esperado. Em sistemas de tempo real crítico, a velocidade de resposta, às variações externas, deve ser elevada para garantir o cumprimento das tarefas dentro de curtos intervalos.

3.5.3. Erros nos Sensores

Sensores, assim como vários outros dispositivos, carregam erros associados, tomando como conceito de erro a diferença entre o valor real mensurando e o valor medido (FRANÇA, 2007). Estes erros podem ser organizados nas seguintes categorias:

3.5.3.1. Aplicação

Erros associados às falhas operacionais humanas (erros de *cockpit*), como instalação inadequada do sensor, leituras incorretas, uso de ferramentas inadequadas e outros.

3.5.3.2. Inserção

Associado à inserção do sensor no sistema a ser medido, um problema geral que está presente em várias medidas elétricas. Neste caso deve-se ter sempre em mente o princípio de Lorde Kelvin que estabelece que o instrumento de medida não deve alterar o evento que está sendo medido.

3.5.3.3. Dinâmicos

A caracterização e a calibração, em vários sensores, costumam ser feitas de forma estática, usando um parâmetro de entrada que é estático ou quase-estático. Entretanto, muitos sensores são altamente amortecidos, não respondendo a rápidas variações do sinal de entrada. Este comportamento pode gerar diferenças entre as variações instantâneas do sinal, que está sendo medido e a resposta do sensor. Esses erros se manifestam no tempo de resposta, em distorções de amplitude e defasagens.

3.5.3.4. Característicos

Erros intrínsecos ao dispositivo de medidas, isto é, a diferença entre a característica da função de transferência modelada para o dispositivo e a característica real. Este tipo de erro pode ser encontrado em valores de *offset*, diferenças nas inclinações em comparação às ideais, relações que não são perfeitamente lineares, e outras.

3.5.3.5. Ambiente

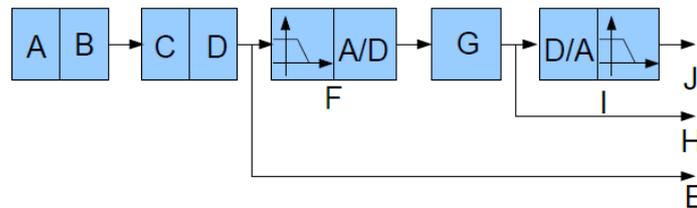
A insalubridade do ambiente onde o sensor é utilizado pode produzir erros. O fator ambiental mais relacionado a erros de leitura e funcionamento diz respeito à faixa de temperatura, outros elementos ambientais, tais como, umidade, vibração, choque, altitude, exposição química, radiação ionizante e outros, também devem ser considerados.

3.5.3.6. Erros de instrumentação eletrônica

Uma cadeia de medição genérica para um instrumento de medição moderno é apresentado na Figura 9. Os blocos são conectados em cascata, multiplicando sua entrada por

um valor pré-definido, possibilitando o cálculo da indeterminação combinada, representada pelas equações. A Tabela 1 apresenta um *check list* dos prováveis erros gerados nos circuitos de um transdutor.

Figura 9 - Cadeia de medição genérica



Fonte: Produção do próprio autor

A) Mensurando; B) Sensores e Transdutores; C) Circuito de Entrada; D) Condicionador; E) Saída; F) Filtragem e conversão A/D; G) Processamento Digital; H) Saída; I) Reconstrução e filtragem; J) Saída.

Tabela 1 – Lista de erros relacionados aos blocos de um sistema transdutor

Sistema	Fonte de Erro	Descrição
Aquisição de sinais	Transdutor	Não linearidade
	Interface	Terminação do circuito – contatos
	Amplificador	Erro nos componentes
	Filtro PB	Erro na amplitude em função do ganho e fase
	Qualidade do sinal	Exatidão do sinal
Conversão	Multiplexador	Erros de transferência e inerentes ao componente
	Amostrador	Erros na aquisição e inerentes ao componente
	<i>Aperture</i>	Incerteza na amplitude do sinal adquirido
	Resolução	Interpolação do sinal
	<i>Aliasing</i>	Faixa de passagem, ruído,
Reconstrução	Filtro – $\text{sen}(x)/x$	Atenuação devido à amostragem
	A/D	Erros de quantização
	D/A	Erros inerentes ao componente como não linearidades
	Filtro – $\text{sen}(x)/x$	Atenuação devido à reconstrução
	Filtragem PB	Erro na amplitude em função do ganho e fase
	<i>Aliasing</i>	Faixa de passagem, ruído,
	Resolução	Erro na amplitude do sinal reconstruído

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5.4. Sensores para monitoramento agrícola de áreas irrigadas

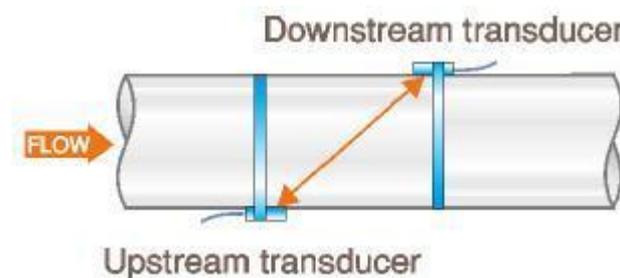
A agronomia, em busca de técnicas de manejo sustentáveis, tem absorvido, nas últimas décadas, muita tecnologia dos segmentos de automação e controle. A agrometeorologia é um bom exemplo de aplicação da microeletrônica dos sensores no monitoramento ambiental. As atuais estações meteorológicas tornaram-se sistemas autônomos de aquisição de dados, compostos por uma grande variedade de sensores para as grandezas de

interesse operacional no campo, tais como, a temperatura, a umidade do ar, a radiação solar, a velocidade e direção do vento e a precipitação de chuva. As informações ambientais fornecidas pelas estações alimentam modelos climáticos de uma dada região dentro de um raio de representatividade. Entretanto, para que sejam atendidas com maior precisão, questões voltadas ao comportamento hídrico do solo, dentro de pequenas áreas irrigadas, deve-se adicionar às grandezas citadas, variáveis como, umidade, temperatura do solo. Nos próximos tópicos será apresentada uma breve caracterização dos principais sensores utilizados no monitoramento dessas variáveis, dedicando maior atenção às características dos sensores utilizados no desenvolvimento da rede de controle proposta.

3.5.4.1. Sensor de Vazão Ultra-Sônico

Um instrumento de medição da vazão por ultra-som utiliza o efeito da diferença no tempo de propagação “tempo de trânsito” de pulsos ultra-sônicos emitidos no duto condutor de fluido. O princípio mede o efeito da velocidade do fluxo de um líquido utilizando sinais acústicos bidirecionais. Os sensores emitem e recebem os sinais, através da tubulação, emitindo feixes de ultra-som. Um transdutor emissor/detector de ultra-som é fixado de cada lado do tubo, formando um ângulo de 30° a 45° com o eixo da tubulação (Figura 10). O transdutor emissor transmite um trem de ondas ultra-sônicas de pequena duração. O intervalo de duração da transmissão é sutilmente inferior quando orientada a jusante, e levemente superior quando orientada a montante. O método é de fácil manuseio, com rápidas leituras e proporcionando excelente exatidão e resolução. (THOMAZINI & ALBUQUERQUE, 2007)

Figura 10 – Sensores ultra-sônicos instalados para medição de vazão em fluidos.



Fonte: Mecatrônica atual, 2012.

3.5.4.2. Sensor de vazão por rotação.

Sensor de fluxo por rotação é constituído por um rotor, e um sensor de efeito Hall. A água flui através do rotor e obriga-o a girar. O movimento do rotor é detectado por um sensor de efeito Hall, emitindo sinais de pulso. Os intervalos entre os pulsos revelam as variações na velocidade de fluxo e sua correspondente vazão. A Figura 11a apresenta um sensor de vazão para dutos de $\frac{1}{4}$ de polegada. O uso deste tipo de sensor é bastante simples requerendo somente três fios para sua operação, onde dois fios correspondem à alimentação do sensor Hall, uma tensão contínua de 5 a 24 volts, o terceiro fio é a saída de sinal pulsado que deve ser ligado a um circuito contador, geralmente um microcontrolador que realizará a leitura dos pulsos em função de uma constante de tempo para cálculo da vazão. A Figura 11b apresenta uma visão interna do sensor, revelando a câmara de fluxo com suas palhetas rotatórias. A Tabela 2 apresenta as principais características do sensor.

Figura 11 – (a) Sensor de Vazão (*Water Flow sensor*) por hélices, (b) Vista interna.



Fonte: [www.seeedstudio.com/wiki/G1'1/4_Water_Flow_sensor](http://www.seeedstudio.com/wiki/G1%27%2F4_Water_Flow_sensor).

Tabela 2 - Especificações Técnicas.

Modelo – POW110D3B	
Voltagem de trabalho	5V – 24V
Corrente Máxima	15 mA (DC 5V)
Peso	43g
Diâmetro externo	20 mm
Faixa da taxa de fluxo	1 ~ 30 L/min
Temperatura de operação	0 °C ~ 80 °C
Temperatura de líquidos	<120 °C
Umidade de operação	35% ~ 90%RH
Pressão de operação	Abaixo de 1.2MPa
Limites de Temperatura	-25°C ~ +80°C

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5.4.3. Sensores de nível

A medição de níveis de líquido em reservatórios ou em tanques é uma função importante nos processos em que necessitam da avaliação da quantidade disponível ou taxas de consumo. A manutenção dos níveis de uma substância líquida, dentro de um sistema, deve garantir a continuidade do processo e em muitos casos preservar a integridade dos equipamentos envolvidos. Os sensores devem atuar como chaves, emitindo sinais de alarme, ligando uma bomba, acionando válvulas e atualizando painéis de monitoramento (ALBUQUERQUE & THOMAZINI, 2012).

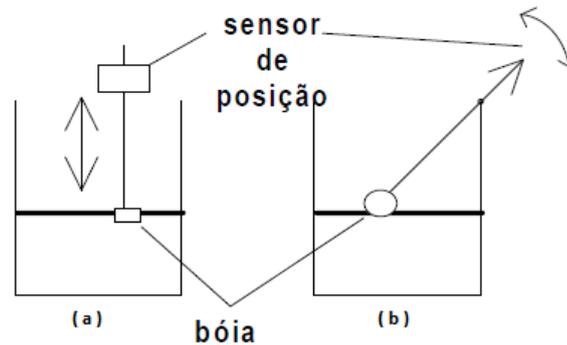
Os métodos utilizados podem ser divididos em:

- diretos, monitorando a altura do líquido;
- hidrostáticos, medindo a pressão na base de reservatórios.

A precisão atingida nas medidas será resultado da sensibilidade do sistema aos parâmetros de posição, força, pressão e outros destinados a medições estáticas em recipientes de estrutura fixa.

Uma solução simples, para o monitoramento da superfície de líquidos, consiste em relacionar a posição da superfície detectada, por exemplo, com uma bóia, a uma escala ligada ao tanque (b) ou em um sensor de posição. A configuração mecânica e o movimento da bóia podem ser lineares, Figura 12 (a), ou de rotação Figura 12 (b).

Figura 12 - Nível de líquido por posição da superfície.



Fonte: Elaborada pelo autor.

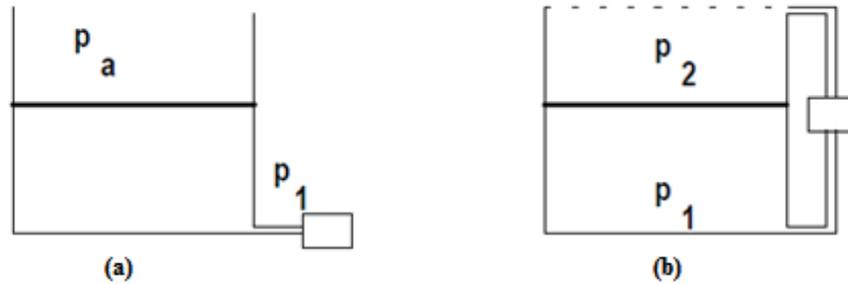
A superfície do líquido também pode servir como refletor de um sinal ultrassônico, definindo a distância pelo intervalo de tempo entre emissão e recepção, de uma frente de ondas, por exemplo. A velocidade de propagação da onda é o parâmetro constante, dependente da compressibilidade e da densidade do líquido em observação.

A medida de níveis pode ser indireta a partir da conversão da pressão em altura volumétrica. A pressão na base de uma coluna de líquido pode ser determinada através da equação (2),

$$P = \rho g h \quad (2)$$

Onde, conhecidos os valores das variáveis ρ (massa específica do líquido), g (aceleração da gravidade), a variável h a altura será obtida através da pressão fornecida por um sensor ligado ao fundo do tanque. A configuração pode variar entre absoluta, relativa à pressão atmosférica nos casos de tanques abertos, Figura Figura 13 (a), ou diferencial, entre as câmaras de um tanque fechado, Figura Figura 13 (b).

Figura 13– Medição direta da pressão sob o líquido (a), medição relativa da pressão (b).



Fonte: Elaborada pelo autor.

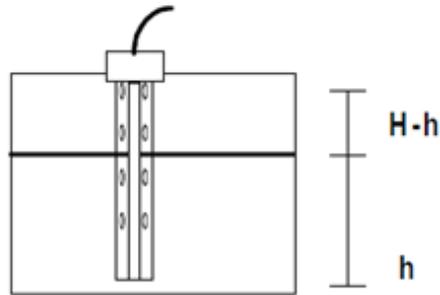
A sonda capacitiva é um dispositivo que utiliza as características dielétricas do líquido para determinação da altura dentro de recipientes. A geometria da sonda é normalmente cilíndrica (Figura 14), com dois condutores concêntricos entre os quais o líquido sobe e desce livremente, acompanhando o líquido do reservatório, e variando a capacitância do sensor de acordo com a relação linear apresentada na Equação 3.

$$C = \frac{A_o}{d} \frac{h\epsilon_{liq.} + (H - h)\epsilon_{gás}}{H} \quad (3)$$

Onde:

- h - altura de líquido;
- H - comprimento da sonda;
- A_o - área efetiva das armaduras;
- d - distância de separação dos condutores;
- $\epsilon_{gás}$ - é a permissividade do vácuo;
- $\epsilon_{liq.}$ - permitividade do líquido.

Figura 14 - Sonda capacitiva.



Fonte: Elaborada pelo autor

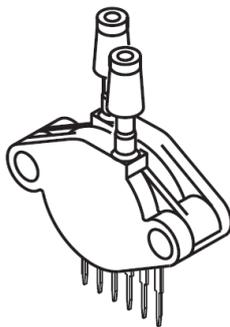
No trabalho apresentado por Canafístula (2008) foi desenvolvido um sensor de nível capacitivo combinado a uma calha Parshall. O sensor, integrado a uma estação hidrológica automática, servia para medição do fluxo caudal em bacias hidrográficas de primeira e segunda ordem.

3.5.4.4. Sensor de pressão

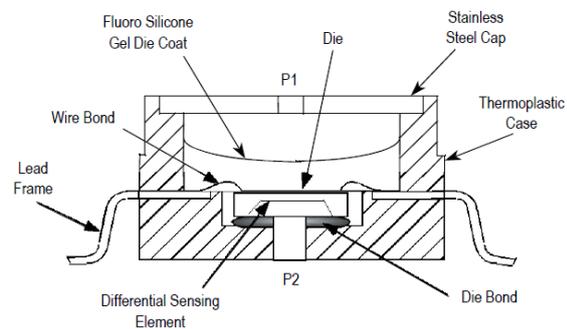
O uso de extensômetros metálicos ou semicondutores, com comportamento resistivo, associados a diafragmas, permite a confecção de sensores eletrônicos de pequenas dimensões para pressões reduzidas, capazes de atingir ótima resolução. O diafragma pode estar diretamente ligado a extensômetros ou comunicar as suas deformações através da elasticidade de componentes intermediários.

O diafragma pode ser ainda conectado a componentes indutivos, onde a posição é definida por um sensor do tipo LVDT (*linear variable differential transformer*) ou de relutância variável, neste caso o diafragma utilizado deve ser conectado a um elemento ferromagnético. Sensores deste tipo são encontrados nas configurações diferenciais ou absolutas para medições numa faixa de 1 Pa a 1 GPa, com precisões de até 0,2% e tempos de resposta de 0,1 s a 2 s (Figura 15).

Figura 15 – Sensor de Pressão on-chip (MPX5010).



(a) Encapsulamento externo.



(b) – componentes internos.

Fonte: Freescale Semiconductor.

3.5.4.5. Sensores de Temperatura

A temperatura exerce uma função vital em muitos processos físicos e químicos. A sua relação com as demais variáveis deve sempre ser considerada na modelagem do comportamento dos sistemas estudados. A desconsideração da influência da temperatura em um dado sistema a ser controlado pode conduzir a erros de interpretações, produzindo conclusões inconsistentes na análise dos resultados. A mesma observação é válida para o caso de medidas imprecisas de temperatura, onde o acúmulo de erros comprometerá a integridade funcional do sistema a ser controlado (DALLY et al, 1993).

Os sensores de temperatura utilizados neste trabalho foram essencialmente dois, o termistor NTC (*Negative Temperature Coefficient*) e o CI LM35. A seguir serão apresentados os tipos mais utilizados na instrumentação de sistemas de monitoramento:

a. Termistor

Um termistor é um tipo de resistor cujo valor da resistência varia com a temperatura. O termo vem da junção das palavras temperatura e resistor. Amplamente utilizados para medir temperaturas e correntes de partida, servem como proteção de sobre corrente, e fazem parte de circuitos de controle de temperatura. O material usado na construção do termistor é geralmente uma liga contendo cerâmica e outros polímeros. A temperatura de trabalho de um termistor é baixa, ficando entre as escalas de -90°C e 130°C . Existem basicamente dois tipos de termistores:

- NTC (*Negative Temperature Coefficient*) é um termistor cuja resistência diminui com o aumento da temperatura.

- PTC (*Positive Temperature Control*) é um termistor cuja resistência aumenta com o aumento da temperatura.

O termistor do tipo NTC é mais utilizado em aplicações que requerem controles de baixo custo, são comumente encontrados em placas microcontroladas e fontes chaveadas, para o controle de exaustão do calor. O coeficiente de temperatura negativa é um fenômeno no qual, propriedades físicas como condutividade térmica ou resistividade elétrica, de alguns materiais diminui com o aumento da temperatura, dentro de um intervalo bem definido. O comportamento de um termistor pode ser aproximado através da equação 4 (SYDENHAM, 1978)

$$\Delta R = K \cdot \Delta T . \quad (4)$$

Onde ΔR é a variação de resistência K é o coeficiente de temperatura e ΔT a variação de temperatura. O tipo de termistor é definido em função do sinal do coeficiente de temperatura do material de que é feito. Para coeficientes positivos o termistor será do tipo PTC e seu ΔR , será positivo, aumentando diretamente proporcional ao aumento da temperatura. Entretanto, para o caso de coeficientes negativos o termistor será do tipo NTC e seu ΔR será negativo e inversamente proporcional ao aumento da temperatura. Muitas cerâmicas apresentam coeficientes de temperatura negativos e o seu comportamento pode ser modelado, dentro de um intervalo de temperaturas, pela Equação 5, ou Equação de Arrhenius,

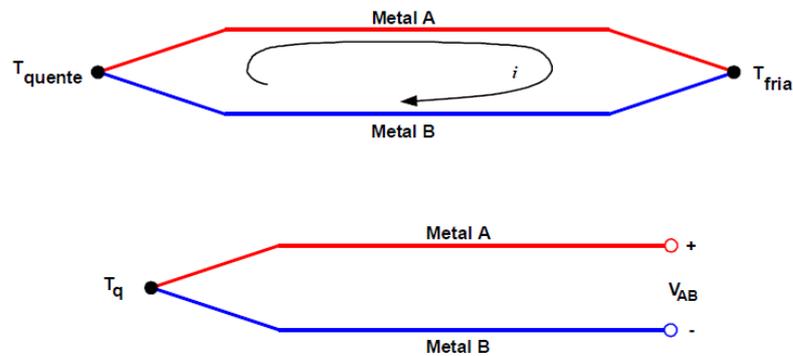
$$R = A \cdot e^{\frac{B}{T}} . \quad (5)$$

Onde A e B são constantes, e T é a temperatura absoluta em Kelvin (K). A constante B está relacionada com a energia necessária para formação e descolamento de cargas livres responsáveis pela condutância elétrica, portanto, à medida que o valor de B é reduzido, o material torna-se isolante. A confecção de termistores procura por materiais com um baixo valor de B que proporcione uma boa sensibilidade às variações de temperatura. Os resistores convencionais, ao contrário dos termistores, são fabricados a partir de materiais com valor de coeficiente de temperatura próximo a zero, para não variarem com a temperatura (VLACK, 1970).

b. Termopares

O princípio de funcionamento do termopar baseia-se no efeito Seebeck, descoberto por Thomas Seebeck em 1821. Se dois metais dissimilares forem soldados nas duas extremidades e uma delas for aquecida, uma corrente contínua fluirá pelo circuito termoelétrico. Se o circuito for aberto numa das extremidades, uma tensão elétrica de circuito aberto aparecerá e estará diretamente relacionada à diferença de temperatura entre a extremidade soldada e a extremidade aberta bem como a composição dos dois metais. A esta tensão dá-se o nome de tensão Seebeck (Figura 16).

Figura 16 - Efeito Seebeck.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Todos os pares metálicos dissimilares apresentam este efeito, porém somente alguns deles produzem uma tensão Seebeck pronunciável. Para pequena diferença de temperatura, a tensão Seebeck será diretamente proporcional à temperatura expressa na Equação 6

$$\Delta V_{AB} = \alpha_S \cdot \Delta T, \quad (6)$$

na qual α_S é o coeficiente de Seebeck ou coeficiente de proporcionalidade entre a tensão Seebeck e a diferença de temperatura.

c. Termoresistência

As termoresistências ou bulbos de resistência ou termômetros de resistência ou RTD (*Resistance Temperature Detector*), são sensores que se baseiam no princípio da

variação da resistência ôhmica em função da temperatura. Elas aumentam a resistência com o aumento da temperatura. Seu elemento sensor consiste em uma resistência em forma de fio de platina de alta pureza, de níquel ou de cobre (menos usado) encapsulado num bulbo de cerâmica ou vidro.

Entre esses materiais, o mais utilizado é a platina, pois apresenta uma ampla escala de temperatura, uma alta resistividade permitindo assim uma maior sensibilidade, um alto coeficiente de variação de resistência com a temperatura, uma boa linearidade resistência x temperatura e também rigidez e ductibilidade para ser transformada em fios finos, além de ser obtida em forma puríssima.

d. LM35

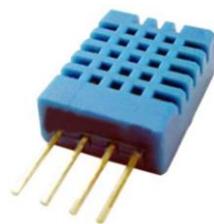
O sensor LM35 é um sensor de precisão, fabricado pela *National Semiconductor*, que apresenta uma saída de tensão linear em função da temperatura à qual está submetido. O componente pode ser alimentado por uma tensão de 4 a 20 Vdc, gerando um sinal de saída de 10mv por Grau Celsius de temperatura. Diferente de muitos outros sensores calibrados em “KELVIN”, este componente não necessita de nenhuma equação complexa para definição de sua escala de temperatura em Graus Celsius.

O LM35 não necessita de qualquer calibração externa ou “trimming” para fornecer com exatidão, valores de temperatura com variações de $\frac{1}{4}^{\circ}\text{C}$ ou até mesmo $\frac{3}{4}^{\circ}\text{C}$ dentro da faixa de temperatura de -55°C à 150°C . Este sensor tem saída com baixa impedância, tensão linear e calibração inerente precisa, fazendo com que o interfaceamento de leitura seja especificamente simples, barateando todo o sistema. Este sensor poderá ser alimentado com alimentação simples ou simétrica, dependendo do que se desejar como sinal de saída, mas independentemente disso, a saída continuará sendo de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$. Ele drena apenas $60\mu\text{A}$ para estas alimentações, sendo assim, seu auto-aquecimento é de aproximadamente 0.1°C ao ar livre. O sensor LM35 é apresentado com vários tipos de encapsulamentos, sendo o mais comum o TO-92, que mais se parece com um transistor, e oferece ótima relação custo benefício, por ser o mais barato dos modelos e propiciar a mesma precisão dos demais. A grande diversidade de encapsulamentos se dá devido à alta gama de aplicações deste integrado.

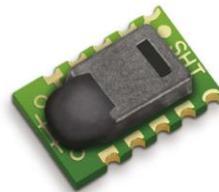
3.5.4.6. Sensores de Umidade Relativa (UR) do Ar

Alguns materiais semicondutores apresentam uma variação de resistência com a umidade relativa do ar. Estes materiais apresentam um padrão específico de carga elétrica em suas moléculas e a interação entre seus níveis de energia é controlada por influência da umidade do ar. Esses semicondutores são fabricados na forma de uma delgada película, depositada sobre eletrodos que serão justapostos lado a lado. A resistência entre os eletrodos varia com a quantidade de umidade do meio ambiente, desta forma é possível medir a umidade relativa do ar. A Figura 17 apresenta alguns modelos de sensores eletrônicos de umidade relativa do ar, já encapsulados com seus respectivos circuitos condicionadores.

Figura 17 - Sensores de umidade relativa do ar.



(a) DTH11



(b) STH11

Fonte: Sensirio (The Sensor Company).

Dentre os sensores UR vale citar também os do tipo capacitivo (Figura 18) nos quais os efeitos da umidade alteram a constante dielétrica de um polímero ou óxido de metal. Com um condicionamento adequado esses sensores podem atingir uma precisão de UR $\pm 2\%$ na faixa 5-95%. Os sensores do tipo capacitivo são resistentes aos efeitos de condensação e a pequenos intervalos a altas temperaturas. Os sensores capacitivos estão sujeitos a contaminação e efeitos do envelhecimento, mas são adequados para muitas aplicações (PARALAX INC., 2009).

Figura 18 - Sensor Capacitivo de umidade relativa.



Fonte: Parallax, 2009.

3.5.4.7. Sensores de Umidade do Solo

Monitorar a umidade do solo é um dos fatores determinantes para o controle eficiente da irrigação, definindo exatamente o momento e a quantidade de água aplicada. A determinação da umidade do solo também é essencial para estudos sobre a dinâmica da água no solo, por exemplo, com relação a capacidade de retenção de umidade, velocidade de infiltração, percolação e outros fenômenos (BERNARDO, 1989). Existem vários métodos para determinação da umidade do solo, e a escolha depende a quais características do fenômeno será dada maior atenção. A instrumentação e o grau de precisão representam também fatores seletivos para a definição do método de medida (COELHO, 2003). Atualmente, existe uma boa variedade de dispositivos sensores de umidade do solo, com princípios de medidas diferentes e variando nas características de precisão, custo, tempo de resposta e facilidade de operação (Klar, 1988). Nos próximos sub-tópicos serão apresentados alguns dos dispositivos sensores mais utilizados e suas características funcionais.

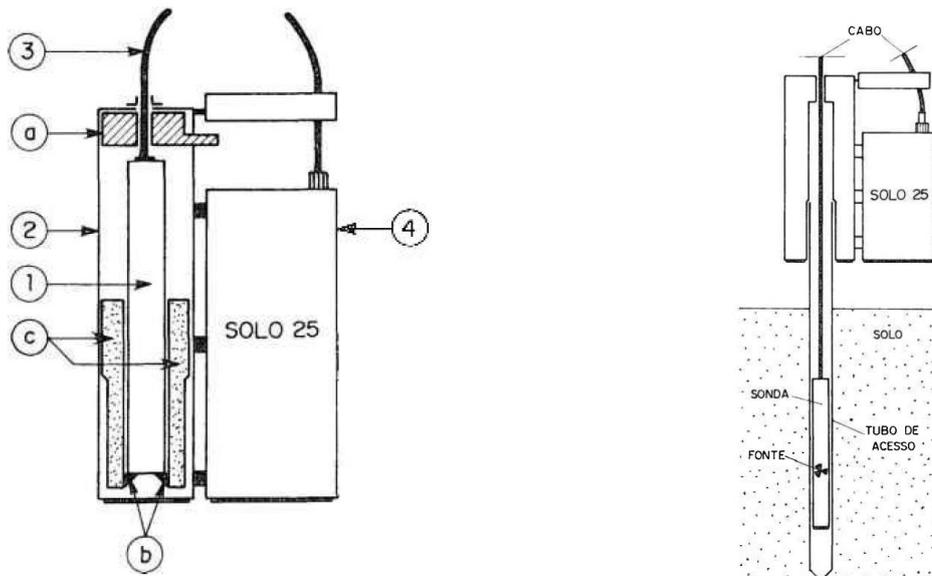
i. Sonda de Nêutrons

A sonda de nêutrons é um dispositivo cilíndrico, metálico e selado contendo como componentes uma fonte radioativa para emissão de nêutrons rápidos, detector de nêutrons térmicos e um bloco pré-amplificador. As características de design da sonda, atividade de sua fonte de nêutrons, tipo de detector e pré-amplificador variam de acordo com o fabricante (**Figura 19**). O seu princípio básico para medida de umidade do solo está no fato de detectar nêutrons termalizados produzidos pela interação dos nêutrons rápidos, produzidos por sua

fonte de radiação, com o solo, através da absorção e do espalhamento de nêutrons nas colisões (FALLEIROS, 1994)

Este equipamento tem caído em desuso dadas as suas complicações de manutenção e os riscos de armazenamento.

Figura 19 – Características comuns das sondas de Nêutrons.



(a) Esquema da sonda de nêutrons SOLO 25

(b) Esquema da sonda de nêutrons no perfil do solo

Fonte: IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

Descrição:

- 1- Sonda contendo a fonte de Am-Be, o detector de nêutrons térmicos (^3He) e o pré-amplificador.
- 2 - Caixa de blindagem composta pelo contador de
- 3 - Cabo coaxial.
- 4 - Caixa de aço inox, contendo os circuitos eletrônicos e bateria.

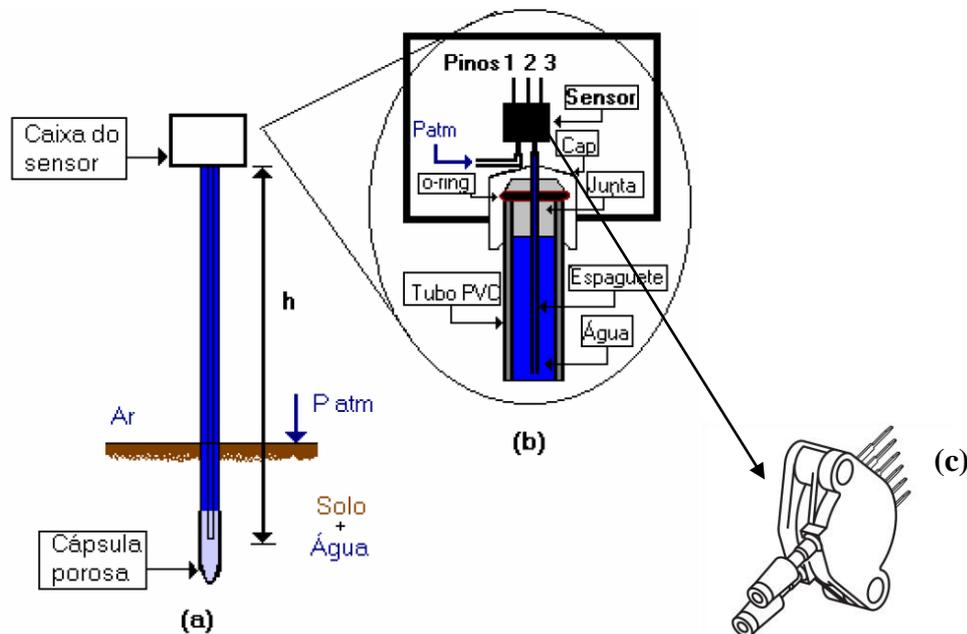
ii. Tensiômetro

Instrumento desenvolvido em 1922, por Gardner e colaboradores, o tensiômetro fornece de forma direta o potencial ou a tensão de água no solo e de forma indireta a umidade. O tensiômetro utilizado por RICHARDS & NEAL (1936) era composto, basicamente, por uma membrana porosa, a qual consiste na parte sensível do equipamento, e de um medidor de pressão capaz de medir a energia com que a água é retida no solo, conectados por uma tubulação em um sistema vedado para a atmosfera.

O princípio de funcionamento do tensiômetro baseia-se na formação do equilíbrio entre a solução do solo e a água contida no interior do aparelho. O equilíbrio ocorre quando a cápsula porosa entra em contato com o solo e a água do tensiômetro entra em contato com a água do solo. Caso a água do solo esteja sob tensão, ela exerce uma sucção sobre o instrumento, retirando água deste, fazendo com que a pressão interna diminua. Como o instrumento é vedado, ocorre a formação do vácuo; a leitura dessa pressão negativa fornece o potencial matricial da água no solo. O tensiômetro de leitura automática vem sendo utilizado já há algum tempo, tendo como destaque o tensiômetro (MARTHALER et al., 1983) e o tensiômetro com transdutor (THIEL et al. 1963; HUBBELL & SISSON, 1998). Porém, os tensiômetros de leitura e gravação automática possuem elevado custo, e o seu uso ainda não está difundido no Brasil, com algumas aplicações restritas à pesquisa.

No trabalho de Teixeira e Coelho (2005) foi apresentado o desenvolvimento, calibração e uso de um tensiômetro eletrônico de leitura automática para o monitoramento do potencial de água no solo. O equipamento substituiu o tensiômetro tradicional com o manômetro de mercúrio por um sensor de pressão (Figura 20), gerando uma saída com valor máximo de 4,5 volts. O tensiômetro eletrônico é conectado a um microcomputador através de uma placa de aquisição de dados (DAQ) contendo um microprocessador, conversor analógico/digital (ADC) e saída serial. Os testes conduzidos no LEMA (Laboratório de Eletrônica e Mecanização Agrícola) utilizaram nove exemplares de tensiômetro eletrônico e três exemplares de tensiômetro convencional de mercúrio, registrando leituras durante o período de um mês com intervalo de 0,5 segundos por tomada. Neste trabalho foi possível caracterizar alguns parâmetros do sensor, tais como: tempo de resposta de 8,89 h, sensibilidade média de $42,833 \text{ mV (kPa)}^{-1}$, precisão média de 0,02334 kPa ou 0,2380 cm c H₂O, erro em função de flutuações de temperatura da ordem de 1,5 kPa, valores máximo e mínimo de *offset* de 348,572 e 261,026 com coeficiente angular de $36,675 \text{ kPa}^{-1}$ e $34,421 \text{ kPa}^{-1}$. Os resultados da regressão linear simples indicaram a existência de regressão a menos de 0,1% de significância e valores de coeficientes de correlação nunca inferiores a 0,9994. O trabalho concluiu a viabilidade do uso de tensiômetros eletrônicos para automação das leituras do potencial matricial do solo com alta taxa de amostragem, permitindo a avaliação detalhada de todo o processo de secagem.

Figura 20 - Layout do tensiômetro eletrônico (a), disposição do circuito eletrônico (b), sensor (c).



Fonte: Teixeira & Coelho, (2005).

iii. Sonda TDR

Entre os vários métodos indiretos para a determinação do conteúdo de água do solo, a técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), tem recebido crescente atenção, método pelo qual o tempo de trânsito de uma onda eletromagnética emitida através de uma haste colocada no solo fornece sua constante dielétrica aparente, dada pela Equação (7)

$$K_a = \left(\frac{t \times c}{2L} \right)^2, \quad (7)$$

onde:

t - tempo de deslocamento da onda eletromagnética em segundos (s);

c - velocidade da luz (3.0×10^8 m/s);

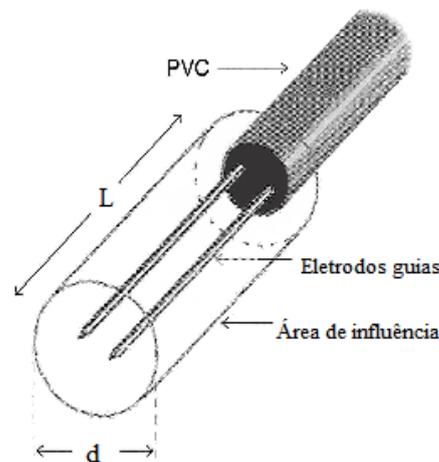
L - comprimento da haste da sonda em metros (m).

K_a - constante dielétrica do meio.

O uso da técnica da TDR carrega vantagens e desvantagens. Para Tommaselli e Bacchi (2001), a rapidez na obtenção da umidade é a vantagem. A dependência do tipo de

solo (mineral ou orgânico), materiais magnéticos e a calibração trabalhosa representam as desvantagens. Os fatos das sondas TDR poderem ser acopladas a multiplexadores (Coelho et al., 2006) ou a outros tipos de sensores, tais como penetrômetros (Manieri et al., 2007), constituem excepcional vantagem da técnica da TDR. A repetição das leituras, a não emissão de radiações ionizantes, a portabilidade e a facilidade de conexão a equipamentos *Data Logger's*, segundo Noborio (2001) proporcionam as maiores vantagens, e como desvantagem o elevado custo de fabricação. A **Figura 21** apresenta características geométricas comuns encontradas em sondas TDR.

Figura 21 - Características comuns em sondas TDR.



FONTE: Elaborada pelo autor.

iv. Sensor Capacitivo (FDR)

O funcionamento do sensor capacitivo é baseado na capacitância elétrica. O seu comportamento é eletrostático, similar ao de um capacitor de placas planas. No espaço entre placas é formado um campo elétrico sujeito a variações provocadas pela presença de materiais externos. Os materiais isolantes que preenchem o espaço entre as placas de um capacitor são denominados dielétricos e possuem valores específicos, que variam de acordo com a sua composição.

O dielétrico pode ser definido como uma propriedade fundamental do material isolante disposto entre as placas de um capacitor, independente da geometria do condutor (RESNICK et al., 1992). Desta forma, existe uma equação que identifica a permissividade de um material (ϵ) como sendo produto da constante dielétrica relativa (ϵ_r) deste material com

a permissividade do vácuo (ε_0), no estado não deformado (Equação 8). O valor da permissividade do vácuo ($\varepsilon_0 = 8,854238837 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$) foi determinado através da Equação (9).

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad (8)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot K} \quad (9)$$

sendo:

ε - permissividade do material;

ε_r - constante dielétrica relativa do material;

ε_0 - permissividade do vácuo;

K- constante eletrostática no vácuo.

A permissividade relativa do solo, em sua forma complexa, é composta, ainda, pela constante dielétrica real e um componente imaginário, que é o dielétrico equivalente de perda (KRAUS, 1984 apud LEE et al., 2004), e pode ser demonstrada na Equação (10)

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon_r'' , \quad (10)$$

sendo ε' a parte real da permissividade; ε_r'' a parte imaginária da permissividade e j uma constante representada por $\sqrt{-1}$.

A Tabela 3 mostra os valores de constante dielétrica para o comportamento dielétrico dos constituintes do solo. Note que a constante dielétrica da água possui um valor exorbitante quando comparada aos outros materiais que constituem o solo.

Tabela 3 - Constante dielétrica relativa dos componentes do solo

Componentes do solo	ϵ_r
Ar dos poros	1
Partículas sólidas	3 a 5
Conteúdo de água	81

Fonte: Tommaselli (1997 apud TRINTINALHA et al., 2001).

A grande diferença nos valores de constante dielétrica entre a água e as partículas do solo torna possível um acompanhamento contínuo do teor de água no solo através do sensor capacitivo. Isto é, ele pode monitorar a umidade do solo com base na variação do dielétrico, já que a mudança deste vai resultar na variação do campo elétrico gerado entre os eletrodos do sensor. E pelo simples fato da variação da constante dielétrica ser diretamente proporcional à variação do teor de água (ZAZUETA; XIN, 1994). Portanto, o teor de água no solo pode ser facilmente determinado, pelo fato da constante dielétrica da água possuir uma ordem de magnitude maior que a do solo, proporcionando assim, mudanças significativas nas propriedades dielétricas na mistura de solo quando sujeita a pequenas variações na quantidade de água.

A capacitância (C) é a quantidade de carga que um capacitor pode armazenar em suas placas. A relação da carga (Q), que pode ser armazenada no dispositivo, por unidade de tensão (V) aplicada está na Equação (11) (RESNICK et al., 1992).

$$C = \frac{Q}{V} \therefore \text{unidade} = \left[\frac{\text{colomb}}{\text{volt}} \right] = [\text{Farad}] \quad (11)$$

Algumas características, abordadas por alguns autores (RENDE, 1999 apud CARMO; BIAGE, 2002; BULL, 2006), podem alterar o valor da capacitância, tais como a permissividade do material dielétrico entre as placas do capacitor, a distância entre as placas e suas dimensões. A alteração de qualquer um destes fatores definirá valores maiores ou menores de capacitância. Por exemplo, quanto maior a área dessas placas e menor a distância entre elas, maior será a capacitância (HOROWITZ; HILL, 1989; REDONDO; LÍBERO, 1996). A capacitância, para tensões constantes pode ser representada pela Equação 11.

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (12)$$

em que:

C = capacitância (F);

ε = permissividade do material ($F m^{-1}$);

A = área das placas (m^2);

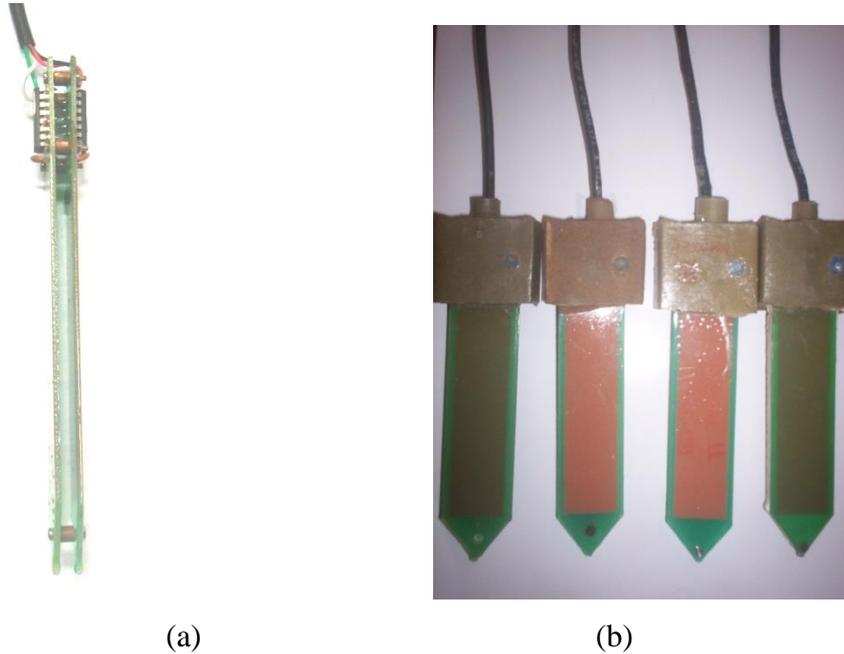
d = distância entre as placas (m).

Segundo Werkhoven (1991), o sensor capacitivo independe de processos hidrostáticos, proporcionando maior autonomia ao sistema, permitindo a automatização da coleta de dados. Sua utilização 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.

Atualmente os sensores capacitivos vêm sendo usados com bastante ênfase em pesquisas, mas o seu desenvolvimento inicial foi inspirado nos trabalhos de Topp et al. (1980), em que propuseram um modelo matemático baseado em um polinômio do terceiro grau para relacionar umidade do solo à constante dielétrica do mesmo. Em trabalhos recentes Silva et al. (2005) também encontrou uma tendência polinomial de terceiro grau ao relacionar a resposta do sensor capacitivo com conteúdo de água no solo. Entretanto, outros autores, dentre eles Silva et al. (2007), Oliveira (2008) e Cruz et al. (2009), encontraram modelos matemáticos baseados em curvas potenciais explicando a relação dos teores de água no solo com a resposta de seus sensores capacitivos. O método da capacitância é uma ótima opção, pois é calibrado com facilidade em laboratório e, além disso, é uma técnica menos dispendiosa comparada ao método TDR, que requer mais instrumentação e conhecimento técnico para sua utilização (MIRANDA et al., 2009).

Neste trabalho o controle empregado utiliza sensores capacitivos para medição da umidade do solo (Figura 22.a). Na Figura 22.b são mostrados sensores confeccionados e já revestidos com uma proteção de resina para o uso no campo. Estes sensores capacitivos são do tipo FDR (Reflectometria no Domínio da Frequência) e foram desenvolvidos no Departamento de Engenharia Agrícola (DNA) da UFC (SILVA et al., 2005). Oliveira (2008) utilizou esse tipo de sensor para monitorar e controlar a irrigação em um cultivo de melancia, o que lhe permitiu acompanhar em tempo real o teor de água no solo, obtendo maior eficiência de irrigação.

Figura 22 - Sensor Capacitivo FDR (a), Sensores capacitivos FDR encapsulados com resina epoxy (b).

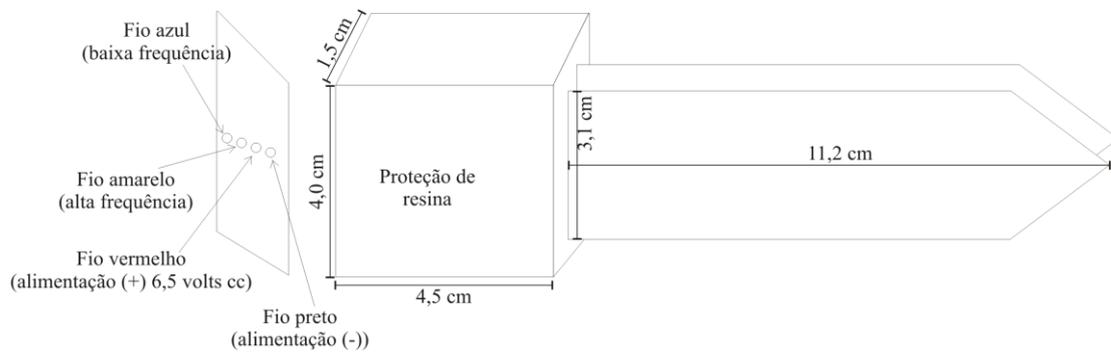


Fonte: Produzido pelo autor.

Esta técnica de monitoramento vem sendo utilizada em campo e comprovando ser uma eficiente ferramenta para o controle da irrigação, acompanhando em tempo real, com precisão e acurácia, a umidade do solo e possibilitando um maior fracionamento da distribuição de água (OLIVEIRA, 2008).

O sensor capacitivo FDR é confeccionado na forma retangular em placas de circuito impresso (fibra de vidro, com uma fina camada de cobre em um dos lados), com espessura, largura e tamanho aproximados de 0,2 cm, 3 cm e 15 cm, respectivamente. (Figura 23) Suas placas são posicionadas paralelamente, definindo os eletrodos do capacitor, separadas em 0,5 cm e cobertas por uma camada de verniz, tanto para evitar oxidação das placas de cobre, devido o contato com o solo, como para eliminar o efeito da condutância elétrica da carga através do dielétrico. A área da placa que define o campo elétrico é de 25,48 cm². Este sensor é composto de um oscilador, cuja frequência é definida pela constante de tempo RC formada por um resistor fixo de 10 kΩ e uma capacitância variável formada pelo dielétrico da mistura de ar, água e solo. Toda a área correspondente ao circuito é encapsulada por material composto de resina industrial.

Figura 23 – Características geométricas do seno capacitivo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os sensores, depois de confeccionados, passam pelo primeiro processo de calibração em laboratório, onde os sinais de resposta dos sensores são avaliados em função de valores padrões esperados para as situações de submersão em água e ar.

A segunda etapa de calibração dos sensores, antes da efetiva instalação no campo, relaciona a resposta em frequência do sensor com a umidade tomada em função do peso de uma amostra de solo. O procedimento em questão conta com a retirada de uma amostra indeformada de solo da área experimental. A coleta da amostra utiliza um tubo de PVC (**Erro! Fonte de referência não encontrada..a**), com medidas aproximadas de 0,295 m de altura e 0,255 m de diâmetro, proporcionando um volume de 0,015 m³. Na extremidade inferior deste tubo é montada uma tela de linha nylon, para sustentação do solo, e sobre a mesma é fixado, internamente, um pedaço de tecido de malha fina, para permitir o escoamento da água sem perda de solo (**Erro! Fonte de referência não encontrada..b**). O solo utilizado para a calibração possui classificação textural como areia franca contendo 57,8 % de areia grossa, 29,4 % de areia fina, 2,8 % de silte e 10 % de argila (CRUZ, 2009).

Figura 24 - Segmento de PVC contendo amostra de solo indeformada (a) e detalhe, interno e externo, de sua parte inferior (b), (CRUZ, 2009).



Fonte: (CRUZ, 2009).

O processo de calibração citado já vem sendo utilizado em alguns trabalhos realizados pelo LEMA e está completamente detalhado em CRUZ (2009) e consiste em submeter a amostra de solo ao ponto de saturação preenchendo todos seus poros, macros e micros. Atingido o ponto de saturação a amostra é suspensa em uma célula de carga que irá monitorar sua perda de água por gravidade e por evaporação, a tomada de dados é realizada com frequência aproximada de três pontos por minuto. A umidade do solo é o quantificador mais básico da quantidade de água em uma dada amostra e costuma ser expressa em função da massa (u) e do volume (Θ) (LIBARDI, 1999). A umidade do solo pode ser expressa em função dos parâmetros de massa de sólidos, massa do solo, volume de sólidos, volume do solo e volume dos poros. A Equação 12 trata da relação entre volume de água do solo e o volume total do solo (KLAR, 1988),

$$\theta = \frac{V_{\text{água}}}{V} \quad (13)$$

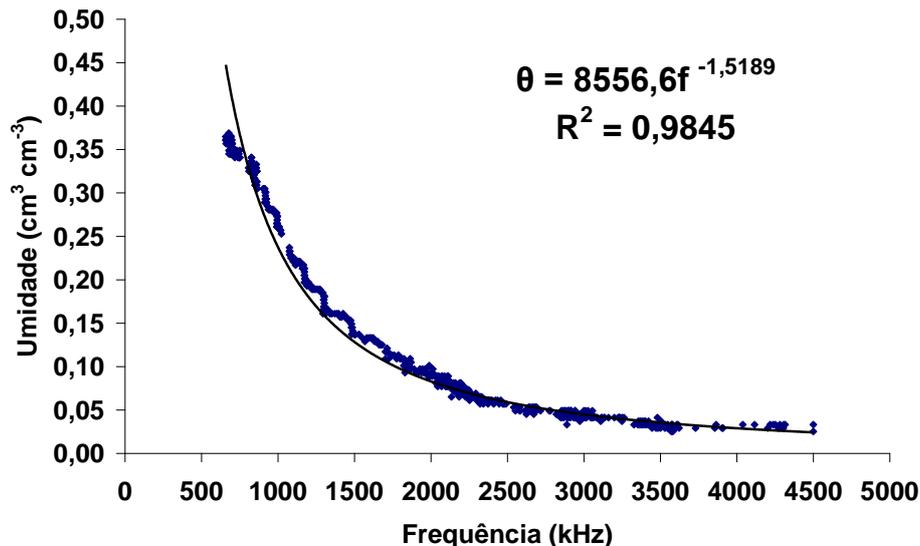
onde θ é a umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), $V_{\text{água}}$ o volume de água contido em uma amostra de solo (m^3) e V o volume total da amostra de solo (m^3).

Na mesma amostra temos inserido um sensor FDR que acompanhará a perda de umidade em seu dielétrico com a mesma frequência de tomadas e no mesmo intervalo de tempo da célula de carga. Os resultados das duas variáveis são relacionados através de

regressão definindo a melhor curva potencial (Figura 25), que relacione a perda de massa da amostra e a respostas de frequência do sensor capacitivo FDR.

Esta equação passa, a ser utilizada para acompanhar, em tempo real, o teor de água no solo no decorrer do experimento, viabilizando o manejo de irrigação.

Figura 25 - Dispersão dos dados do teor de água do solo versus respostas do sensor capacitivo.



Fonte: CRUZ, (2009).

Oliveira (2012), realizando análises de regressão relacionando trinta e três dados de frequência, tensão e umidade, obteve como relação da umidade em função da frequência um R^2 ajustado de 0,9973 e um erro de 0,0242, com elevado grau de significância para a equação 14.

$$\theta = 0.528873949 \cdot e^{(-0.00057923f)} \quad (14)$$

Onde:

θ - é a umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$)

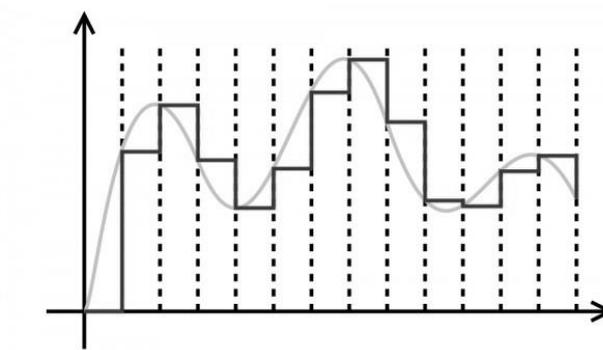
f - é a frequência emitida pelo sensor em kHz.

O uso de equação exponencial discorda de autores como Topp et al.(1980) e Silva et al. (2005), que ao trabalharem com este tipo de instrumento concluíram que a equação de melhor ajuste é a do tipo polinomial do 3º grau, consistente com o processo físico.

3.6. Conversores AD e DA

A transdução de sinais analógicos para digitais, ou o inverso (Figura 26), pode ser feita utilizando circuitos conversores. Entretanto, nesse processo, parte da informação pode ser perdida, e a qualidade da conversão comprometer a integridade operacional do sistema. A qualidade da conversão dependerá da quantidade de bits que o circuito for capaz de operar. O projetista deverá avaliar as grandezas envolvidas para o dimensionamento adequado do conversor, ponderando entre o custo empregado e a funcionalidade do dispositivo dentro das especificações do projeto.

Figura 26 - Sinal Analógico e Sinal Digital

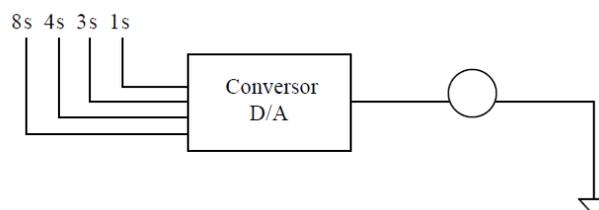


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.6.1. Conversor Digital Analógico (D/A)

A tarefa de um conversor D/A é a transformação de valores de entrada digital em um sinal de saída analógico. A Figura 27 ilustra, em bloco, conversor D/A, onde nas entradas à esquerda do bloco conversor é introduzido um número binário que definirá uma tensão de saída correspondente à direita.

Figura 27 - Diagrama de um conversor D/A.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 4 apresenta um trecho da tabela-verdade em um conjunto de possíveis 16 entradas e saídas do conversor D/A.

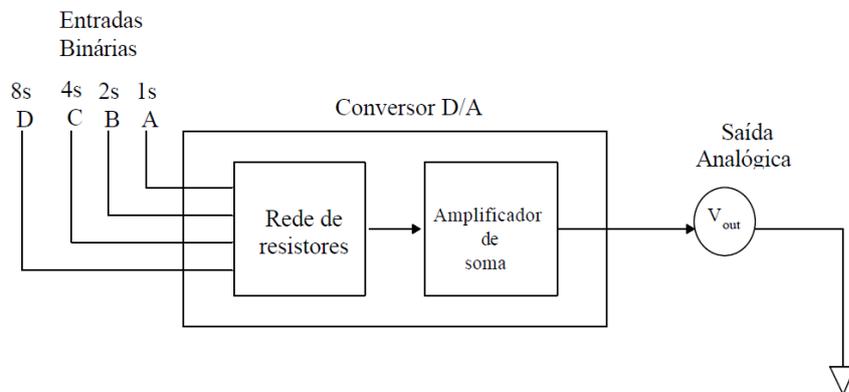
Tabela 4 – *True-table* do conversor D/A

Fila	Entrada Binária				Saída Analógica Vout
	D (8s)	C (4s)	B (2s)	A (1s)	
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1
3	0	0	1	0	2
4	0	0	1	1	3
5	0	1	0	0	4
6	0	1	0	1	5
7	0	1	1	0	6
8	0	1	1	1	7
9	1	0	0	0	8
10	1	0	0	1	9
11	1	0	1	0	10
12	1	0	1	1	11
13	1	1	0	0	12
14	1	1	0	1	13
15	1	1	1	0	14
16	1	1	1	1	15

Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando a Tabela 4 para o conversor D/A. Se cada uma das entradas for BAIXA, a tensão de saída (V_{out}) será 0 V conforme definido na fila 1 da tabela. A fila 2 mostra apenas a entrada (A) de 1s sendo ativada por uma ALTA. Com a entrada como LLLH (0001), a saída do conversor D/A é 1 V. A fila 3 mostra apenas a entrada B ativada (0010). Isto produz uma saída de 2 V. A fila 5 mostra apenas a entrada C ativada (0100). Isto produz uma saída de 4 V. A fila 9 mostra apenas a entrada D (1000) ativada, produzindo uma saída de 8 V do conversor D/A. Notar que as entradas (D, C, B, A) são *ponderadas*. A ponderação relativa de cada entrada é dada como 8 para a entrada D, 4 para a entrada C, 2 para a entrada B e 1 para a entrada A na Figura 28. O conversor D/A consiste em duas partes funcionais. A Figura 28 mostra um diagrama em blocos de um conversor D/A. O conversor é dividido numa rede de resistores e num amplificador de soma. A rede de resistores pondera adequadamente as entradas 1s, 2s, 4s e 8s, enquanto o amplificador de soma escala a tensão de saída de acordo com a tabela verdade. Tipicamente usa-se um amplificador operacional como o amplificador de soma num conversor D/A.

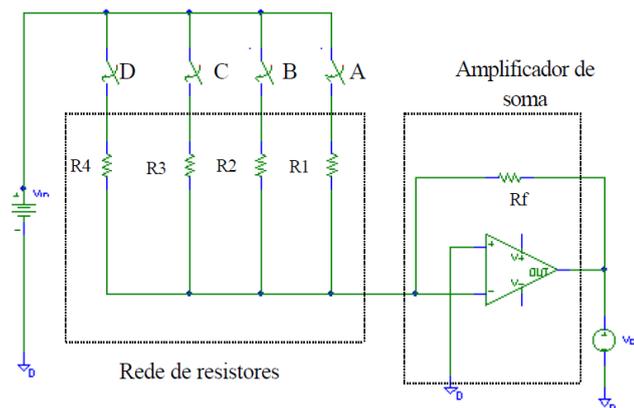
Figura 28 – Diagrama em blocos de um conversor D/A.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Um conversor básico digital-analógico é ilustrado na Figura 29. O conversor D/A está dividido em dois circuitos, a rede de resistores e o amplificador somador. A tensão (V_{in}) de entrada é aplicada através das chaves de entrada (D, C, B, A). O resistor R4 representa o bit mais significativo (MSB) sendo o resistor de valor mais baixo. O resistor R3 é o dobro da resistência de R4. Também o resistor R2 é o dobro da resistência R3, e assim por diante.

Figura 29 – Diagrama esquemático de conversor D/A básico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

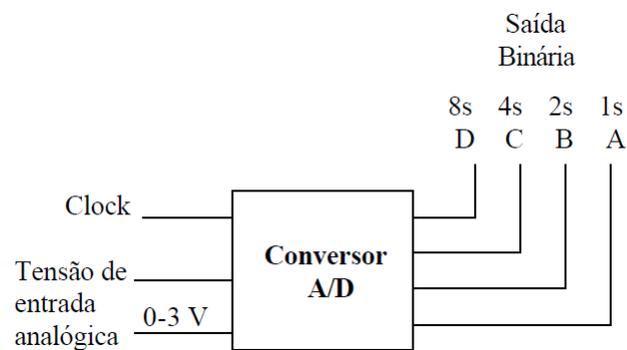
Dos conversores atualmente utilizados apenas um realiza conversões diretamente. Este conversor é conhecido por “Conversor Flash”, por ser muito rápido em suas conversões. As outras formas de conversão utilizam circuitos realimentados onde o valor digital é obtido pela comparação do valor analógico com o valor digitalmente estimado para ele. Estes

circuitos possuem menor custo, por outro lado são mais lentos, visto que o valor digital da saída deve ser aproximado e isto leva tempo. Entre os métodos de aproximação utilizados em conversores podem ser citados os de aproximação aritmética, delta e geométrica ou sucessiva (IDOETA, 2003).

3.6.2. Conversor Analógico Digital (A/D)

Frequentemente abreviado por ADC este dispositivo eletrônico é capaz de gerar uma representação digital a partir de uma grandeza analógica, normalmente um sinal de tensão ou intensidade de corrente elétrica. A conversão é na verdade uma discretização de uma grandeza contínua. O conversor analógico-digital (A/D) inverte o processo do conversor D/A. Uma tensão analógica desconhecida é introduzida no conversor A/D, produzindo uma saída binária correspondente e proporcional. Um diagrama de blocos de um conversor A/D é mostrado na Figura 30. Este conversor A/D tem uma tensão de entrada analógica na faixa de 0 a 3 V. A saída binária será então lida em forma binária de 0000 a 1111. Notar que o conversor A/D também tem uma entrada de relógio (clock).

Figura 30- Conversor A/D em Bloco.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 5 apresenta a *true-table* correspondente às operações do conversor A/D. O lado de entrada da tabela define as tensões de entrada analógicas, enquanto o lado de saída fornece a correspondente leitura binária.

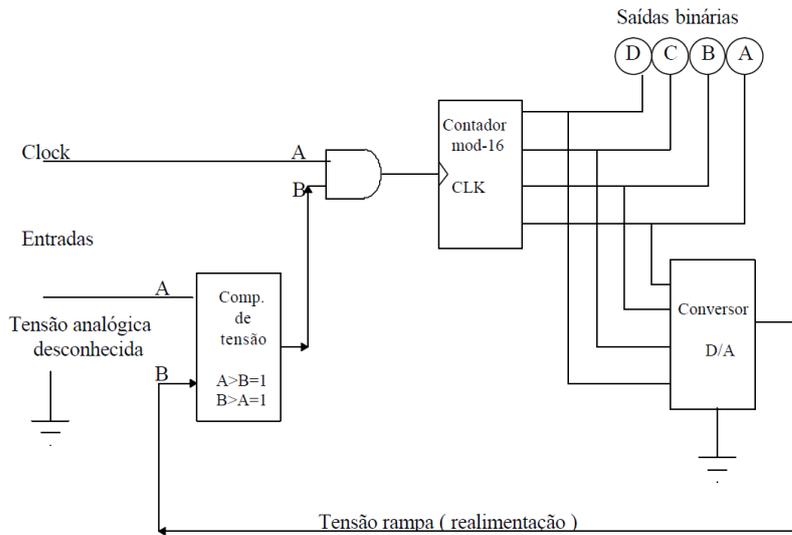
Tabela 5 – *True-table* do conversor A/D.

Fila	Entrada Analógica Vout	Saída Binária			
		D (8s)	C (4s)	B (2s)	A (1s)
1	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	1
3	2	0	0	1	0
4	3	0	0	1	1
5	4	0	1	0	0
6	5	0	1	0	1
7	6	0	1	1	0
8	7	0	1	1	1
9	8	1	0	0	0
10	9	1	0	0	1
11	10	1	0	1	0
12	11	1	0	1	1
13	12	1	1	0	0
14	13	1	1	0	1
15	14	1	1	1	0
16	15	1	1	1	1

Fonte: Elaborada pelo autor.

O conversor A/D é um contador crescente que entra em sequência crescente de acordo com a Tabela 5, tabela-verdade, até que a tensão correta seja alcançada. Se a tensão de entrada do conversor A/D descrito na tabela-verdade for 2,95 V, a unidade atravessará 15 ciclos até que a contagem do binário 1111 seja alcançada e exibida. A análise da operação do conversor A/D consome tempo; no entanto, o circuito opera muito rapidamente baseado na frequência do clock de entrada. A frequência do clock num conversor A/D pode ser mais do que 1 MHz. O conversor A/D apresentado na Figura 31 é um dos mais utilizados, por fácil implementação e baixo custo. Esta unidade é chamada conversor A/D do tipo de contador em rampa. O contador e o conversor D/A formam uma tensão que aumenta gradualmente realimentando um circuito comparador. Um tipo de unidade muito rápida é o de aproximações sucessivas. Estes são bastante comuns, mas são mais complexos do que os conversores do tipo rampa.

Figura 31 – Conversor A/D por múltiplas aproximações.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Conversores A/D são usados em qualquer lugar em que uma tensão de entrada analógica deve ser transformada em forma binária ou digital. Muitos processos industriais usam uma interface deste tipo. Um exemplo comum do uso do conversor A/D é o *voltímetro digital*. O conversor A/D transforma a tensão de entrada analógica em binário. O binário é decodificado, e uma leitura decimal digital de saída é prontamente obtida. (IDOETA, 2003).

3.7. Componentes Atuadores

Segundo ZAZUETA (1993), dois tipos genéricos de controladores são utilizados em sistemas de irrigação: sistemas de controle em malha aberta (*open control loop*) e sistemas de controle em malha fechada (*closed control loop*). A diferença entre eles é que, os sistemas em malha fechada, possuem realimentação (*feedback*), ou seja, existem elementos no sistema capazes de enviar informações sobre o processo ao controlador para que ele seja capaz de definir seu modo de atuação sobre o processo. Os elementos atuadores são basicamente o conjunto motobomba e as válvulas de derivação da malha hidráulica.

3.7.1. Motobombas

Os projetos de irrigação pressurizada contam na maioria das vezes com bombas elétricas, controladas por painéis de partida direta, ou quando envolvendo grande potência de

partida, é adicionado ao projeto o uso de *Soft Start*. O painel de partida costuma ser composto das seguintes peças: contador, relé de sobrecarga, relé de falta de fase, disjuntor, conectores de entrada, chave de três posições e alguns opcionais tais como voltímetro, amperímetro, sinalizadores de estado ligada/desligada e sobrecarga. O *Soft Start* é um dispositivo, montado com pontes de tiristores acionadas por uma placa eletrônica capaz de controlar a taxa de variação da tensão, sobre o motor, proporcionando uma rampa suave de partida. A medida de segurança é necessária para evitar danos na rede elétrica e hidráulica com os abruptos picos de corrente durante a quebra de inércia provocada na partida do motor.

3.7.2. Inversores de Frequência

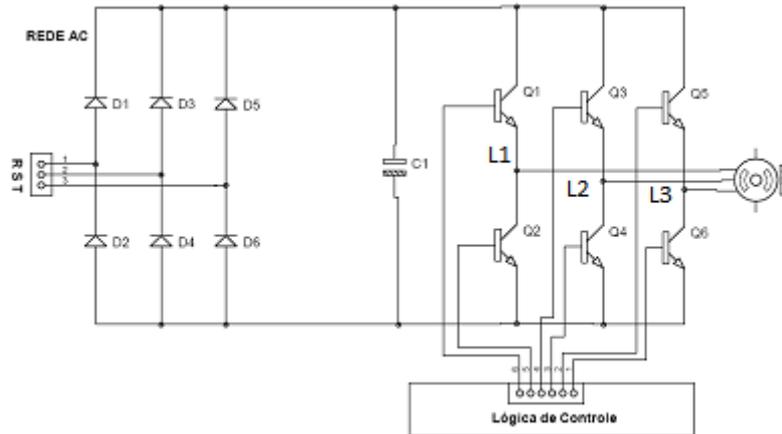
A pressurização dos sistemas de irrigação tem tomado uma parcela significativa no custo de produção, pressionando o produtor em busca de medidas que garantam a redução dos custos com energia. Nos sistemas de irrigação, normalmente os motores elétricos utilizados no acionamento de bombas são calculados para a máxima demanda de vazão associada à máxima altura manométrica. O super dimensionamento dos equipamentos acarreta num maior consumo de energia elétrica. Entretanto, a utilização de inversores de frequência permite o controle de rotação do conjunto motobomba, ajustando o consumo de energia elétrica às necessidades de carga. O uso de inversores de frequência pode promover a redução do consumo de energia elétrica. Henson et al. (1996), apud Carvalho et al. (2000), obteve resultados satisfatórios quando fez uso do inversor de frequência em alguns sistemas de irrigação nos EUA, reduzindo a potência consumida, e obteve assim, uma substancial economia de energia.

O controle de rotação da bomba, através de um inversor de frequência, tem como objetivo agregar à automação do sistema maior eficiência, controlando vazão e pressão no dimensionamento e manejo da malha hidráulica, permitindo redução de custos na implantação e operação dos sistemas de irrigação pressurizada. Outra grande vantagem no uso de inversores de frequência é a flexibilidade de operação do sistema, permitindo que uma mesma área tenha setores com características hidráulicas diferentes e pressurizadas pelo mesmo conjunto de motobomba.

O método de controle da velocidade de rotação consiste na variação da frequência da fonte alimentadora através de circuitos conversores. O inversor, também conhecido na literatura técnica, como conversor de frequência, controla velocidade e torque de motores de corrente alternada e podem ser construídos segundo topologias de controle e potências variadas. A estrutura básica dos inversores diverge pouco em função das marcas e dos

fabricantes, a Figura 32 apresenta um diagrama simplificado da etapa de potência do inversor conectada ao bloco da lógica de controle onde diferentes técnicas podem ser aplicadas ao chaveamento das cargas indutivas.

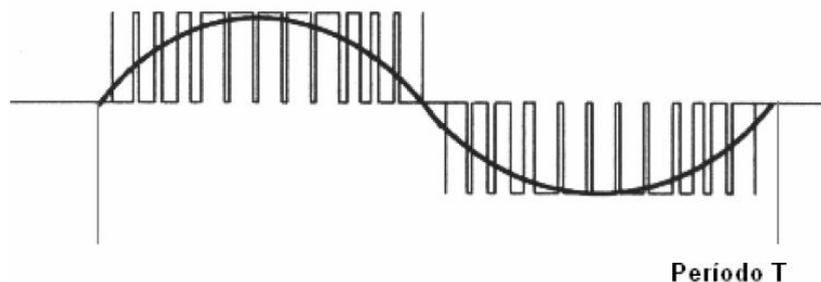
Figura 32 – Diagrama da estrutura simplificada de um inversor de frequência.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O princípio de funcionamento é simples: a tensão é retificada e filtrada formando um barramento DC, uma ponte de transistores do tipo IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) funciona como chaves conectadas aos polos positivos e negativos do barramento, a lógica de controle se torna responsável pela comutação sequencial das chaves, modulando a abertura e fechamento através de pulsos (PWM - *Pulse Width Modulation*) gerados na unidade digital de controle. A Figura 33 ilustra o sinal senoidal de saída do inversor com características obtidas através do sinal modulado produzido pelas chaves de potências controlando o barramento DC de alta tensão (RASHID, 1993).

Figura 33 – Modulação por Pulsos (PWM).



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.7.3. Válvulas Hidráulicas de Controle Elétrico

Utilizadas na setorização do sistema de irrigação. O controle de abertura ou fechamento é realizado por uma válvula solenóide, ativada por corrente elétrica ou por pulsos elétricos. Normalmente a tensão de acionamento dos solenóides é de 24 Vac (voltagem em corrente alternada), apresentando uma corrente de atracção e outra de retenção, que variam em função do fabricante. As válvulas ativadas por pulsos (tipo *Latch*) abrem ao receber um pulso com amplitude de 12 Vdc (Voltagem de corrente contínua), mantendo-se neste estado até receber um novo pulso, de mesma amplitude, porém com polaridade invertida. Dependendo do modelo, o solenóide pode ficar conectado à válvula sobre a qual atua. Neste caso, o comando é transmitido através de cabos, que partem do quadro de comando até os pontos de derivação onde estão localizadas as válvulas. A outra alternativa dispõe todos os solenóides em um quadro de comando, controlando uma pressão diferencial que será enviada até as válvulas através de microtubos (Figura 35).

O trabalho desenvolvido por Vasconcelos et al (2012) utilizou válvulas do tipo *Latch* para implantação de um sistema automático de controle da irrigação através de um Controlador Lógico Programável (CLP), associado a um sistema de transmissão via rádio frequência.

Figura 34 – Quadro de solenóides para comando de válvulas por tubos condutores de pressão.

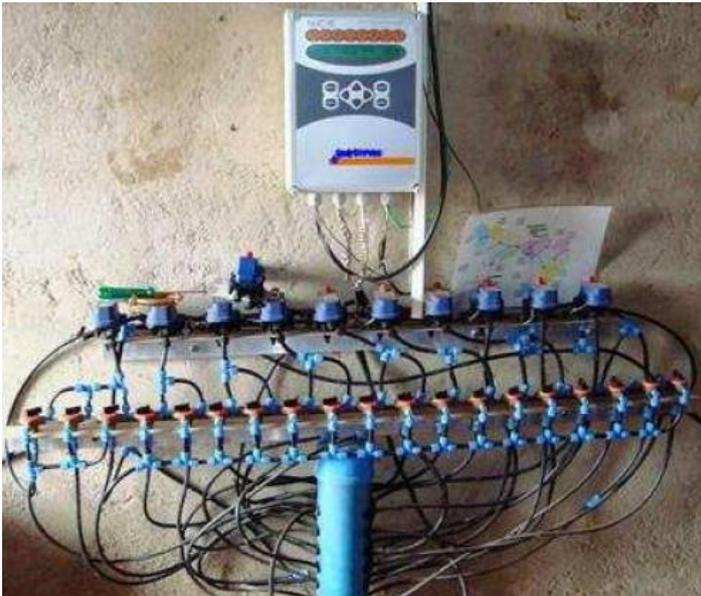


Fonte: LEMA, (2012).

3.7.4. Controladores Eletrônicos

Nos sistemas de irrigação o controlador é responsável pelo armazenamento, processamento e execução de todas as informações nele configuradas. A sua operação exige o conhecimento da área e da cultura para determinação dos ciclos de irrigação. A maioria dos controladores é alimentada por fontes de 110 ou 220 V (volts), com saída para as válvulas de 24 Vac (voltage em corrente alternada). Oferecem de dois a quatro programas independentes, onde são definidos, nos dias da semana, de três a dezesseis horários de partida ("start"). O tempo é programado em minutos e horas, com o relógio que mantém a hora, data e programação. Em caso de queda de energia, utilizando-se pilha alcalina de nove volts. O controlador permite uma programação individual, semiautomática ou manual e alguns admitem o acoplamento de sensores de chuva, ou outros sensores de controle da irrigação (Figura 35).

Figura 35 - válvulas solenóides gerenciadas por um controlador.



Fonte: LEMA, (2012).

3.8. Rede de Controle sem Fio na Agricultura de Precisão

Os sistemas *wireless* têm conquistado muito espaço nos projetos de automação por permitirem monitorar e controlar o funcionamento de ambientes e processos produtivos de forma segura e rápida. A grande variedade de condições encontradas nas áreas agrícolas exige uma flexibilidade maior dos dispositivos selecionados. Os sistemas de automação e aquisição de dados devem assumir os mais variados graus de complexidade oferecendo

rapidez e confiabilidade na aquisição dos dados, operando em conjunto com dispositivos atuadores para manutenção das condições ideais de produtividade (DALLY et al.,1993).

3.8.1. Rede 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. 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 na área militar, meio-ambiente, agricultura, saúde, automação residencial, monitoramento de estruturas e aplicações comerciais.

As RSSFs podem auxiliar no controle de incêndios florestais, pois detectada uma área de incêndio os nós fontes podem disseminar dados como temperatura, pressão barométrica, umidade, luz e velocidade do vento, informações que, utilizadas em conjunto com dados sobre vegetação e topografia do local, podem prever o avanço do fogo. Existem ainda diversas aplicações de monitoramento do meio-ambiente, tais como o rastreamento de animais, de pequeno e grande porte, 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 limitada, em geral uma bateria. O processo de recarregar manualmente todas as baterias, em muitas aplicações, é praticamente inviável, uma vez que RSSFs podem

ser compostas por centenas de nós sensores e, além disso, estes podem estar em locais inacessíveis (ou ambientes isolados em laboratório). Dessa forma, em todos os projetos de RSSFs, tanto no dimensionamento do hardware quanto na escolha e elaboração dos protocolos de comunicação, é fundamental considerar o uso eficiente da energia. Em casos onde as dimensões dos módulos não são os aspectos prioritários do projeto, pode-se adicionar a esses módulos sistemas alternativos de energia como células foto-voltaicas ou aerogeradores de pequenos porte.

Os recursos de informatização e automação estão cada vez mais presentes nos campos agrícolas, entretanto, a implementação das redes de sensores sem fios é relativamente recente. Um sistema de controle de irrigação em tempo real foi implementado por Pierce et al. (2006). Neste trabalho as unidades remotas, desenvolvidas pelos mesmos, monitoravam e controlavam a irrigação e mostraram-se altamente flexíveis e capazes de integrar séries de redes de monitoramento sem fio na irrigação. Para Monteiro et al. (2008), a implementação das redes de sensores sem fio não foi tão rápida como se imaginaria pelo fato da necessidade de superar alguns fatores limitantes (tolerância, custo, hardware, topologia, manejo e disponibilidade), mesmo assim a rede de sensores pode ser facilmente instalada em um campo aberto.

Giacomin, Vasconcelos e Silva (2008) utilizaram redes de sensores sem fio para quantificar o conteúdo de água da vegetação em um campo cultivado por milho e, apesar da forte influência da vegetação na atenuação da comunicação do sinal, a forma de comunicação *multi-hop* demonstrou-se apropriada para a medida dos dados dentro de campos desta cultura. Em outro caso, Torre Neto e Rabello (2008) desenvolveram um sistema automatizado para controle de irrigação por gotejamento utilizando rede de sensores sem fio no monitoramento do teor de água. O mapeamento da umidade do solo foi obtido com dados espaço-temporais através das técnicas de SIG (Sistemas de Informações Geográficas). Neste sistema o usuário sabe onde, quando e quanto irrigar, de acordo com as regiões observadas pelas sequências dos mapas de umidade do solo adquiridas por imagens de satélite.

O trabalho de Fontes et al. (2004), apresentou a configuração de um sistema de supervisão e controle para casas de vegetação empregando um sistema de coleta de dados e controle através de uma rede de comunicação sem fios (*wireless*). Foram desenvolvidos, com microcontroladores de baixo consumo e alto desempenho, unidades de sensores, unidade coletora de dados e sensores de umidade do tipo capacitivo. A supervisão e controle foram implementados a partir de um programa tipo SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Os dados coletados pelo sistema foram utilizados para o treinamento de uma

rede neural artificial parte integrante do sensor de umidade. Através de interfaces desenvolvidas no *software* Slipse PRO, as variáveis de controle podiam ser alteradas na operação dos elementos atuadores no processo de irrigação e climatização do ambiente. O sistema obtido apresentou uma automação viável para casas de vegetação.

Cruz (2009) e Oliveira (2010) utilizaram uma rede de sensores sem fio, desenvolvida por Santos (2008), respectivamente no manejo da irrigação das culturas de milho e melancia, relataram a praticidade nos quesitos de instalação, rapidez na realização das leituras (em tempo real) e flexibilidade para alterações tais como: expansão, redução ou reposicionamento dos pontos de monitoramento, assim como a reconfiguração remota dos parâmetros de medida. Entretanto, as redes de sensores sem fio trazem ainda para a sua aplicação na agricultura, alguns desafios também comuns a outros segmentos. Dentre os desafios encontrados na aplicação dos sistemas *wireless* no campo, tanto no monitoramento quanto no controle, estão as limitações relativas ao consumo de suas baterias e a sustentabilidade de seus protocolos de comunicação. Esses fatores técnicos são explorados no desenvolvimento deste trabalho, onde fontes alternativas energia como a solar são empregadas estrategicamente para garantir a longevidade da rede no monitoramento e o funcionamento ininterrupto dos módulos atuadores como, por exemplo, no controle das válvulas solenóides.

O sensor capacitivo foi integrado aos módulos de comunicação sem fio (SANTOS, 2008) e passou a compor uma rede distribuída de sensores, sendo sua utilização testada por Cruz (2009) no manejo de um sistema com irrigação localizada. Em suas avaliações, foram obtidos dados de movimentação da água no solo, adquiridos por módulos remotos dotados de dois sensores capacitivos FDR, instalados em profundidades diferentes. As medidas dos referidos sensores eram tomadas em intervalos de tempo predeterminados e enviadas a um módulo mestre conectado a um computador. Os dados armazenados eram tratados em planilhas com as equações de calibração e correção e geravam como saída, a umidade do solo e o tempo de irrigação.

3.8.2. Rede de Atuadores sem Fio (RASf)

A instalação de um quadro de comando remoto, para controle das bombas também traz desafios a serem resolvidos tais como o acoplamento dos circuitos microcontrolados às chaves disjuntoras. A interface de operação é crítica, pois trata da alta potência de acionamento da bomba e o controle da pressão na tubulação. Neste ponto do projeto o desenvolvimento do algoritmo de controle deve utilizar dispositivos de segurança

que garantam o sincronismo adequado na operação da malha hidráulica. Os dispositivos de segurança são implementados tanto em *hardware* quanto em *software* e devem evitar erros, tais como: o funcionamento da bomba com todas as válvulas setoriais fechadas, desligamento da bomba durante o intervalo de irrigação de alguma das áreas sob controle, acionamento da bomba sem água, ou com baixa tensão na rede e o outros mais.

O controle das válvulas é realizado através de um módulo dotado de maior potência, com sua carga mantida através de células fotovoltaicas. Esta unidade, além do controle, deve monitorar a pressão de serviço na derivação da rede hidráulica, retornando esses dados para controles de compensação, em perda de carga ou como segurança contra estouro dos dutos.

O controle de vazão mais eficiente foi dimensionado através do uso de inversores de frequência, onde seu controle também é integrado à rede, através de interface sem fio, com a unidade central de supervisão do sistema.

3.9. Protocolos de Comunicação Serial

Atualmente existem vários protocolos, neste tópico serão tratados os protocolos mais utilizados. Os protocolos podem ser definidos como as regras de organização da comunicação entre dispositivos eletrônicos. Existem diversas classificações para os protocolos, dentre as quais, a duas principais são:

- Quantidade de dados transmitidos.
- Agilidade na comunicação ou *throughput* (taxa de transferência) correspondente ao intervalo entre a detecção de um evento e a resposta em função de uma decisão lógica.

3.9.1. EIAS232

Também conhecido como protocolo RS232, onde RS é uma abreviação de “*Recommended Standard*”. Este protocolo trata da padronização de uma interface comum para comunicação de dados entre equipamentos, criada no início dos anos 60, por um comitê conhecido atualmente como “*Electronic Industries Association*” (EIA). Este padrão de comunicação envolve a troca de dados digitais entre um computador central e terminais de computadores remotos, ou entre dois terminais sem o envolvimento do computador. Os dispositivos podem ser conectados através de linha telefônica através de um modem em cada lado para fazer a decodificação dos sinais. O padrão RS232 especifica as tensões, temporizações e funções dos sinais, um protocolo para troca de informações, e as conexões

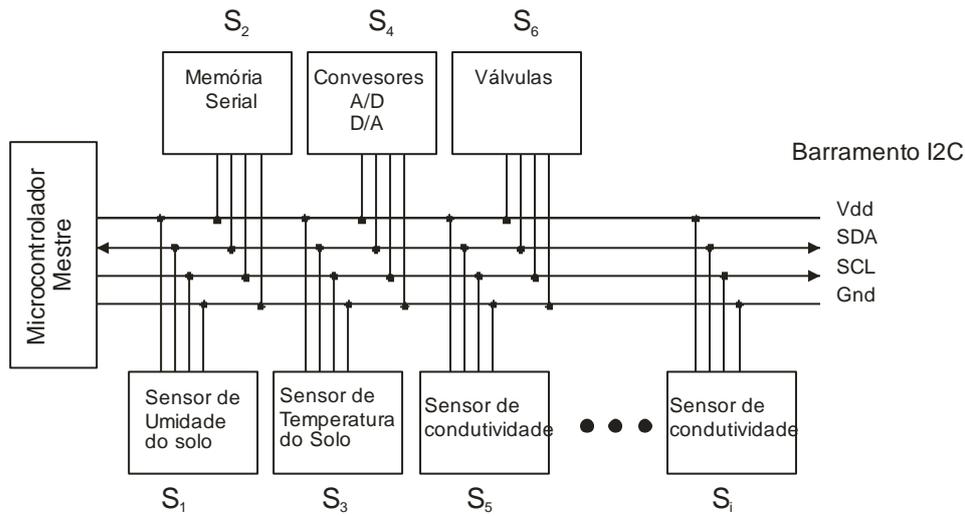
mecânicas. A EIA publicou três modificações, onde a última, introduzida em 1991, alterou o nome de RS232 para EIA232 junto de modificações em algumas linhas de sinais e definição de novas linhas. Embora tenha sofrido poucas alterações, muitos fabricantes adotaram diversas soluções mais simplificadas para a padronização proposta.

3.9.2. I2C

A conexão I2C (*Inter Integrated Circuit*) é um protocolo de comunicação serial síncrono utilizado para a interconexão de diversos circuitos a um único barramento de quatro linhas físicas. O protocolo I2C foi desenvolvido pela Philips em 1996, e tem sido bastante utilizado, por proporcionar uma boa modularização da comunicação entre circuitos, reduzir custos de desenvolvimento de dispositivos, agregar grande flexibilidade de funcionamento, com baixa potência de consumo, e grande imunidade a ruídos. Modernos equipamentos de vídeo, som e máquinas industriais empregam este padrão em aplicações que requerem altas velocidades em processos críticos de leituras e escritas, tais como, os sensores e atuadores utilizados neste trabalho. As taxas de comunicação se distribuem nos modos Standard com velocidade de 100 kbps, modo Fast com 400 kbps e modo High Speed de até 3,4 Mbps (PEREIRA, 2003).

O protocolo I2C permite que vários circuitos dedicados possam enviar e receber dados, através de um mesmo barramento serial. O barramento possui uma linha bidirecional para enviar e receber sinais seriais de dados (SDA), outra linha é utilizada para o sinal de sincronização da comunicação, definida como linha serial de clock (SCL) e controlada pelo microcontrolador *Master*. As outras duas linhas fornecem a tensão de alimentação do barramento e definem os níveis lógicos de operação dos dispositivos, são respectivamente o positivo (Vdd) e o terra (Gnd). A Figura 36 apresenta um exemplo de interconexão de dispositivos integrados ao barramento serial I2C. Os dispositivos que recebem os sinais de controle são chamados de dedicados. Cada unidade dedicada possui um endereço interno, definido via *software* ou *hardware*, que o identifica no barramento. Desta forma, o mestre precisa enviar o endereço do respectivo dispositivo com que deseja se comunicar, junto das informações necessárias para execução das operações desejadas.

Figura 36 - Sistema de interconexão de dispositivos em um barramento serial I2C.

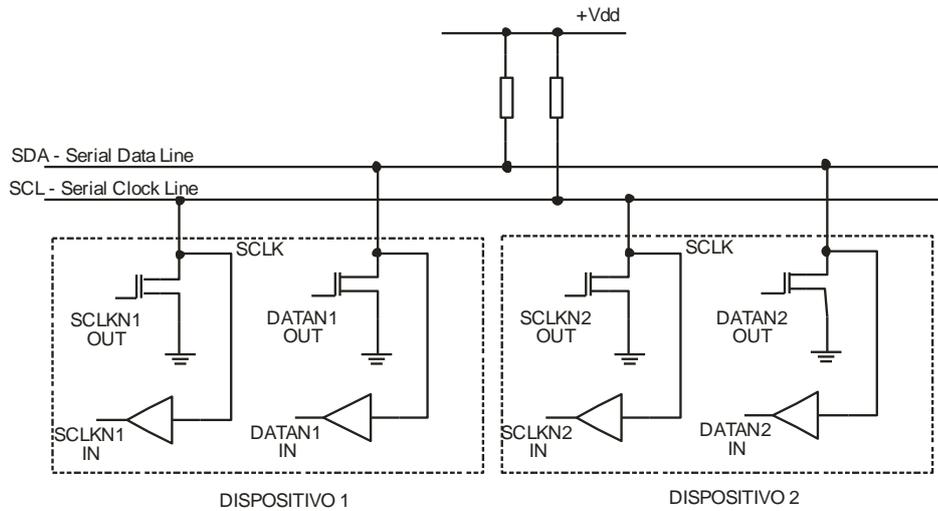


Fonte: Elaborada pelo autor.

A interface física de comunicação interna dos dispositivos I2C facilita o uso do barramento permitindo a ligação de dispositivos com tensões de alimentação diferentes, graças às vias de comunicação tipo *open drain*, ou coletor aberto (), reduzindo de quatro para duas linhas de comunicação, respectivamente, às vias de dados (SDA) e clock de sincronismo (SCL).

O modo de comunicação síncrono permite que dispositivos de velocidades diferentes sejam conectados ao mesmo barramento usando a taxa de comunicação do dispositivo de menor velocidade. A flexibilidade do protocolo provê a facilidade de inclusão ou exclusão de dispositivos escravos sem a necessidade de alterações físicas no funcionamento dos demais periféricos do barramento.

Figura 37 - Vias de comunicação *open drain*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A quantidade de dispositivos presentes no barramento é limitada pela capacitância máxima admitida de 400pF. No diagrama esquemático apresentado na Figura 42, pode ser observada a existência de duas resistências (*pull-up*) ligando as vias de dados e clock para a tensão Vdd, o objetivo é manter as linhas do barramento em nível lógico “1”.

3.9.3. USB

A comunicação USB (Universal Serial Bus) surgiu em 1994 com sua versão 0.7 que rapidamente foi aprimorada chegando a sua versão 1.0 em janeiro de 1996, atingindo taxas de transferências que variavam de 1.5Mbps em baixa velocidade até 12Mbps em velocidade máxima, o que para a época era uma velocidade surpreendente (AXELSON, 2009).

A USB aos poucos foi tomando espaço, substituindo as obsoletas portas RS-232, ainda muito usadas para a comunicação de dispositivos embarcados. Contudo, devido a grande dificuldade do encontro destas portas em desktops mais modernos e notebooks, estes dispositivos estão lentamente migrando para outras soluções de comunicação, tais como RJ-11, RJ-45, que utilizam protocolo Ethernet e USB.

Existem três maneiras de se comunicar usando USB: USB HID, USB CDC e USB Mass Storage.

a) USB HID

USB HID (*Human Interface Device*) é muito utilizado para comunicar dispositivos simples que possuem uma interface com o homem. Alguns dispositivos conhecidos utilizam o protocolo HID para se comunicarem tais como mouses, teclados, dentre outros. Este tipo de dispositivo possui algumas vantagens perante os demais:

- Qualquer sistema operacional possui *driver* para dispositivos HID, não sendo necessária a instalação *drivers*.
- O código é relativamente simples de entender.
- Ocupa menos espaço na memória de programa e RAM.

Contudo, devido à generalidade do protocolo HID, o *software* para comunicação USB HID é mais complexo de elaborar.

b) USB CDC

Os dispositivos USB CDC (Communication Device Class) tentam emular uma porta de comunicação serial comum. Essa emulação faz com que o código do sistema embarcado seja mais simples de escrever, contudo isso acarreta em algumas desvantagens:

- O código fica mais complexo.
- Aumenta o consumo de memória de programa e RAM
- É necessária a instalação de *drivers* (que muitas vezes é limitado ao SO Windows).
- A velocidade de transmissão de dados é reduzida.

Nota-se através desta breve explicação que os dispositivos que utilizam USB HID levam uma certa vantagem sobre os dispositivos USB CDC (www.usb.org, 2013).

c) USB *Mass Storage*

Dispositivos que utilizam USB *Mass Storage* (armazenamento em massa), são aqueles que fazem armazenagem de dados, ou seja, precisam de um protocolo especial para tratamento de erros, tais como *Checksum*, CRC. Muitos dispositivos conhecidos usam este protocolo, como por exemplos *Pendrives* e Cartões de memória (utilizando adaptadores

USB). Assim como os dispositivos USB HID, estes também são *plug and play*, ou seja, já possuem um *driver* pré-instalado em qualquer sistema operacional mais moderno. (AXELSON, 2009)

3.9.4. ModBus

O protocolo criado para barramento de campo foi especificado pela MODICON, fabricante de produtos para automação, para estabelecer padrões de conexão entre seus dispositivos. Este protocolo foi inicialmente de uso exclusivo, porém, com o tempo, um grande número de fabricantes, de produtos para automação tinha obtido autorização para adotá-lo. Atualmente o protocolo ModBus é utilizado por muitos fabricantes de equipamento de controle passando a ser um protocolo aberto.

O ModBus é baseado no modelo mestre-escravo, onde os escravos, as unidades dedicadas, não podem trocar informações mutuamente. Todo o tráfego de dados é controlado por uma unidade mestre. O mestre pode requerer informações de um escravo específico e aguardar por seu retorno, ou pode emitir mensagens *broadcast* a todas as unidades escravas, operando em modo difusor.

Além de ser um protocolo aberto, a camada física deste padrão pode ser implementada, de forma reduzida com somente dois fios, alcançando distâncias de até 1000 metros com grande imunidade a ruídos (PEREIRA, 2009).

3.9.5. TCP-IP

Este protocolo envolve um conjunto de outros protocolos de comunicação para a montagem de redes de computadores, comumente chamado de pilha de protocolos TCP/IP. A sigla representa os dois protocolos principais: o TCP (*Transmission Control Protocol* - Protocolo de Controle de Transmissão) e o IP (*Internet Protocol* - Protocolo de Interconexão). A pilha de protocolos é assim chamada por ser apresentada em um modelo de camadas, onde cada camada assume um grupo de funções, prestando um conjunto de serviços à camada superior. As camadas mais superficiais, chamadas camadas de aplicação, estão mais próximas do usuário e tratam de dados mais abstratos.

Desenvolvido em 1969 pelo U.S. Department of Defense Advanced Research Projects Agency, o TCP-IP tinha como objetivo atender à necessidade de comunicação entre uma grande quantidade de sistemas de computadores e várias organizações militares distribuídas. O protocolo deveria ter a capacidade de estabelecer a melhor rota entre dois pontos da rede, garantir a comunicação através de rotas alternativas, em caso de degeneração

dos links em rotas destruídas. A partir de 1972 o projeto, inicialmente batizado de ARPANET (*Advanced Research Projects Agency Network*), atingiu a comunidade internacional, transformando-se no que conhecemos como Internet.

O TCP/IP foi considerado, por muito tempo, um protocolo bastante pesado, exigindo muita memória e hardware para ser utilizado. O desenvolvimento das interfaces gráficas, a evolução dos processadores e os novos sistemas operacionais tornaram o protocolo indispensável para o estabelecimento de redes de dados. Dentre benefícios que o protocolo proporciona, vale citar os seguintes:

- **Padronização:** Um padrão, um protocolo roteável que é o mais completo e aceito protocolo disponível atualmente. Todos os sistemas operacionais modernos oferecem suporte para o TCP/IP e a maioria das grandes redes se baseia em TCP/IP para a maior parte de seu tráfego.
- **Interconectividade:** Uma tecnologia para conectar sistemas não similares. Muitos utilitários padrões de conectividade estão disponíveis para acessar e transferir dados entre esses sistemas não similares, incluindo FTP (File Transfer Protocol) e Telnet (Terminal Emulation Protocol).
- **Roteamento:** Permite e habilita as tecnologias mais antigas e as novas se conectarem à Internet. Trabalha com protocolos de linha como PPP (Point to Point Protocol) permitindo conexão remota a partir de linha discada ou dedicada. Trabalha com os mecanismos IPCs e interfaces mais utilizados pelos sistemas operacionais, como Windows Sockets e NetBIOS.
- **Protocolo robusto:** Escalável, multiplataforma, com estrutura para ser utilizado em sistemas operacionais cliente/servidor, permitindo a utilização de aplicações desse porte entre dois pontos distantes.
- **Internet:** É através da suíte de protocolos TCP/IP que obtemos acesso à Internet. As redes locais distribuem servidores de acesso à Internet (proxy servers) e os hosts locais se conectam a estes servidores para obter o acesso à Internet. Este acesso só pode ser conseguido se os computadores estiverem configurados para utilizar TCP/IP (MOKARZEL & CARNEIRO, 2004).

3.9.6. Bluetooth

O padrão Bluetooth foi desenvolvido pelo SIG (*Bluetooth Special Interest Group*), um grupo de empresas multinacionais líderes nas áreas de telecomunicações,

computação e de equipamentos industriais. Este padrão define especificações para áreas de redes pessoais sem fio, PANs (Wireless personal area networks), disponibilizando técnicas de conexão e tráfego de dados entre diferentes equipamentos, integrando com bastante praticidade os mais variados dispositivos, tais como notebooks, computadores, impressoras, câmeras digitais, telefones celulares, teclados, mouses e uma lista de periféricos que só tende a aumentar. A forte adesão ao padrão é justificada, principalmente, por se tratar de uma tecnologia independente de infra-estrutura física, utilizando rádio frequência de curto alcance, em uma faixa segura e globalmente licenciada. O padrão apresenta como características básicas, uma baixíssima potência de consumo para alcance de pequenas distâncias e baixas taxas de transmissão. As características de baixa potência contrastam com outros padrões de comunicação sem fio, como exemplo o IEEE 802.11, com maior consumo, alcance e taxas de transmissão. Entretanto, pelas especificidades de cada tecnologia, os objetivos não competem em suas aplicações. A tecnologia Bluetooth, carrega como principal vantagem o seu reduzido custo de hardware, seu baixo consumo, e uma potência de irradiação limitada para cobertura de pequenas áreas, característica que favorece a segurança da rede.

A tecnologia Bluetooth pode ser definida como um padrão de comunicação *wireless* de curto alcance e de baixo custo. A comunicação realiza-se através de ondas de rádio na frequência de 2.4 GHz, banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical band*) que não necessita de licença e está disponível em quase todo o mundo. Para atingir um maior conjunto de dispositivos o padrão assumiu três classes de alcance, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Categorias de dispositivos Bluetooth.

	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Potência	100 mW	2,5 mW	1 mW
Alcance	100 m	10 m	1 m

Fonte: (/www.bluetooth.com, 2013)

A velocidade no tráfego dos dados pode chegar a 721 Kbps. Os dispositivos Bluetooth se comunicam formando uma rede chamada de piconet ou picorede, onde oito dispositivos podem ser conectados mutuamente. Nesta célula um deles deverá ser a unidade *master*, tratando os outros dispositivos como *slave*. A aparente limitação, de oito dispositivos conectados em rede, é superada pela sobreposição de várias piconets, multiplicando os pontos de comunicação e aumentando o alcance da rede. O método *scatternet* de expansão é a função

que permite a coexistência de até dez piconets em uma mesma área de cobertura. A segurança da rede é garantida por cada piconet codificando os dados relacionados aos seus dispositivos e protegendo contra interferências de intrusos (KAMMER et al, 2002).

Para a operação Bluetooth na faixa ISM de 2,45 GHz, foram definidas 79 portadoras espaçadas de 1 MHz. Desta forma, 79 frequências estão disponíveis instantaneamente para redução de colisões entre os dispositivos que estejam transmitindo simultaneamente. A sequência de frequências é definida pelo dispositivo mestre da piconet e os dispositivos escravos recebem em seus pacotes endereçados informações sobre qual sequência deverá usar para se comunicar. A operação de distribuição de frequências é garantida através de ferramentas capazes de saltar entre os canais em até 1600 vezes por segundo. Reduzindo, desta forma, as interferências entre vários dispositivos próximos.

As conexões Bluetooth são estabelecidas através de três elementos: *scan*, *page* e *inquiry*. O elemento *scan* é utilizado para gerenciamento do consumo de energia na rede, monitorando os dispositivos ociosos e os colocando em modo *stand-by*. Neste momento, a varredura das unidades passa a ser realizada a cada 10 ms ouvindo as tentativas de conexão de algum dispositivo. O elemento *Page* é chamado pelo dispositivo que necessite de conexão, enviando a cada 1,25 ms dois pedidos transmitidos em portadoras diferentes, esperando em dois intervalos de tempo a existência de respostas. O elemento *Inquiry* define mensagens transmitidas por um dispositivo para determinação de quantos e quais as características dos dispositivos ativos em sua área. O recebimento deste comando deve gerar, nos dispositivos da célula, resposta com o pacote de dados FHS (Frequency Hopping-Synchronization), transportando sua identidade e informações para o sincronismo entre os dispositivos.

4.0. DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE

Neste capítulo são apresentadas as etapas de desenvolvimento do hardware das unidades de monitoramento e controle. Os próximos sub-tópicos descrevem detalhes do processo de modelagem, simulação, prototipagem e testes no desenvolvimento das unidades. As etapas de montagem e testes operacionais utilizaram os recursos dos laboratórios de Eletrônica e Mecanização Agrícola (LEMA), localizado no Campus do Pici, integrado ao departamento de Engenharia Agrícola da UFC e também os laboratórios de práticas experimentais do curso de Engenharia da Computação do Campus avançado da UFC em Sobral. Os testes de campo foram realizados no lote experimental do Baixo Acaraú, localizado na região norte do Estado do Ceará, no município de Marco, cujas coordenadas geográficas são 3°06'55" S e 40°05'47" W. 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.

4.1. Módulo Principal

A unidade principal constitui-se dos blocos de fonte de alimentação, regulação das tensões, comunicação, processamento, portas de expansão I/O e tratamento dos sinais dos sensores utilizados. Os próximos sub-tópicos descrevem o funcionamento dos circuitos e seus componentes utilizados.

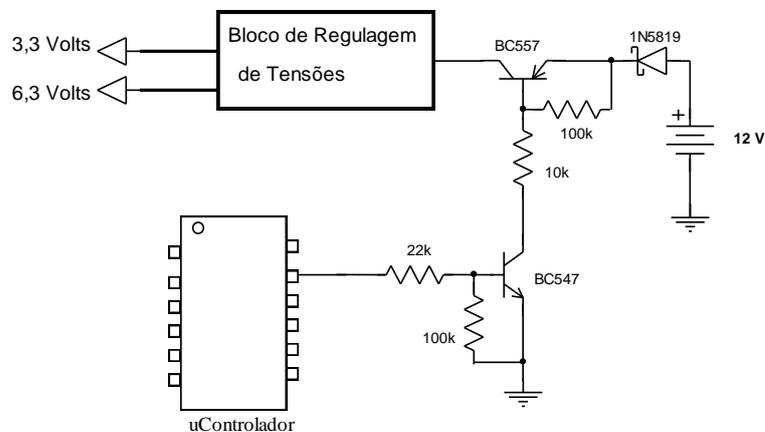
4.1.1. Fonte de Alimentação

As placas desenvolvidas para os módulos sensores têm como principal fonte de alimentação, 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, enquanto o circuito do microcontrolador e transceptor funcionam com a tensão de 3,3 volts. Foi escolhida para este projeto uma bateria de 12 volts e 1,3 Ah recarregável constituída de chumbo, ácido sulfúrico e polipropileno, muito utilizada para manutenção de cargas auxiliares em diversos equipamentos.

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 para permitir que o microcontrolador possa, no estado

de baixo consumo, desacoplar a bateria do restante do circuito. O circuito, apresentado na Figura 38, foi dimensionado, com simples transistores do tipo tbj (transistores de junção bipolar) funcionando como chaves de acoplamento da bateria controlada pelo microcontrolador. O diodo 1N5819 foi colocado em série com a entrada de tensão da bateria para atuar como proteção contra inversão de polaridade, é um diodo Schottky, utilizado em circuitos de baixa voltagem, inversores de alta frequência, escolhido principalmente por sua baixa tensão direta de 0,2 a 0,4 V.

Figura 38 - Circuito de acoplamento da Bateria.



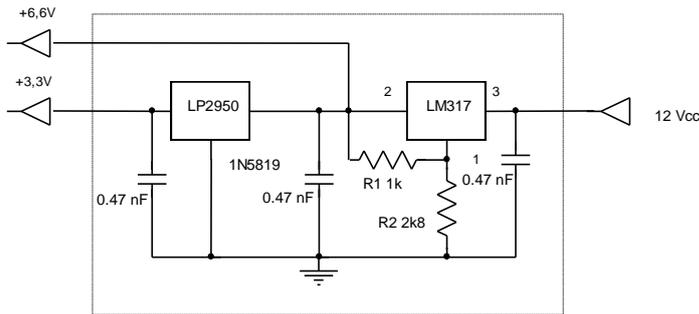
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2. Etapa de Regulagem de Tensões

O Bloco de regulagem das tensões de alimentação (Figura 39), dos sensores de umidade de 6,6 volts, foi implementado com um regulador LM317LZ. O componente tem baixa corrente de dreno, no máximo 100 μ A 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 da *National Semiconductor*, versão 3,3 volts com baixo consumo de corrente, 75 μ A, produzindo uma tensão de saída estável a uma corrente de até 100 mA, componente também encontrado no encapsulamento TO-92.

Figura 39- Bloco de regulação das tensões.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.3. Microcontrolador

O microcontrolador utilizado em todas as unidades é o modelo PIC18LF4550 da Microchip. A versão é indicada para sistemas embarcados de baixa potência (*nanoWatt*) e aplicações de conectividade com até três portas seriais: FS-USB (12Mbit / s), I²C e SPI (até 10 Mbit / s) e um assíncrono LIN (*Local Internet Network*) de porta serial (USART).

Inicialmente escolhido por possuir alta velocidade de processamento, até 48 MHz e velocidades de 16 MIPS (*Millions of Instructions Per Second*), e sua arquitetura Harvard com um conjunto RISC de 75 instruções, ou 83 quando ativado o set de instruções estendidas. Apresentando recursos de programação por Memória flash, EEPROM e OTP, este modelo agrega uma série de periféricos (Figura 40) interessantes, para a continuidade no desenvolvimento de projeto, evitando componentes extras na placa de circuito.

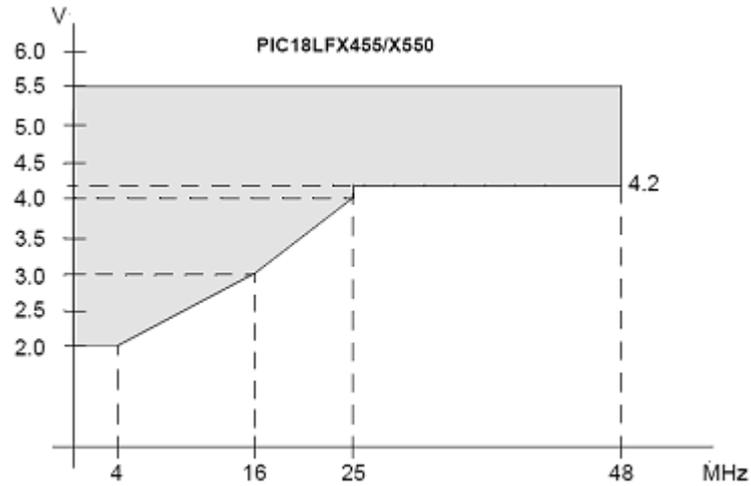
Figura 40 – Características do microcontroladores da Família 18F da Microchip.

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-Bit A/D (ch)	CCP/ECCP (PWM)	SPP	MSSP		EUSART	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

Fonte: <http://www.microchip.com>, 2013.

Este microcontrolador pode operar a um *clock* de até 48MHz. Entretanto, no projeto, os módulos remotos são alimentados com uma tensão de 3,3 volts, limitando a frequência de trabalho do microcontrolador a 16 MHz (Figura 41).

Figura 41 - Gráfico da frequência de clock em função da tensão de alimentação no PIC18F4550.

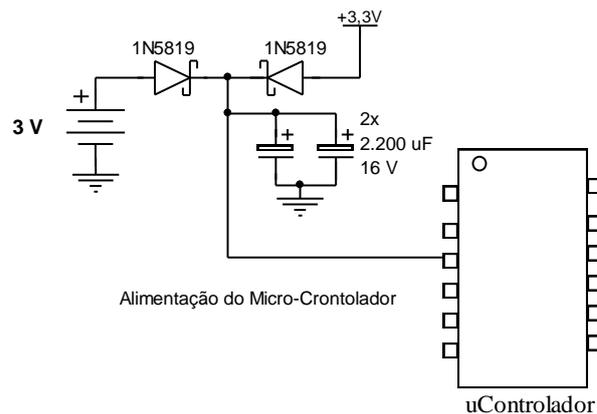


Fonte: www.microchip.com, 2013.

4.1.4. Modo *Sleep* de baixo consumo

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 42.

Figura 42 - Esquema de alimentação do Microcontrolador no módulo sensor.

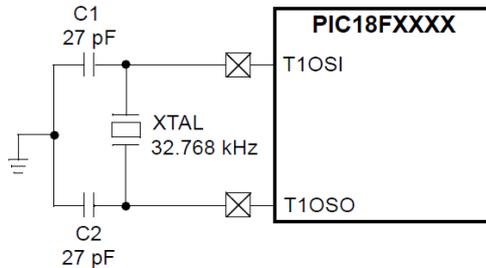


Fonte: Elaborado pelo autor.

No modo *sleep*, o microcontrolador mantém somente o *timer1* 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 . A configuração dos componentes externos para habilitação do timer 1, pode ser vista na Figura 43.

Figura 43 - Componentes externos para o dimensionamento do oscilador do Timer1.



Fonte: www.microchip.com, 2013.

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, os capacitores de 2200 μF mostrados na Figura 47 são recarregados, garantindo um intervalo de Δt_c relativo ao tempo de descarga dos capacitores.

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 apresentado na Equação (15)

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt + V_{co} \quad (15)$$

Assumindo que a corrente é constante pode-se chegar à Equação (16).

$$\Delta V_c = \frac{I}{C} * \Delta t \quad (16)$$

A partir da Equação (16) 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 como,

$$\Delta t_c = \Delta V_c \cdot \frac{C}{I}, \quad (17)$$

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 (18) que o intervalo máximo Δt_c até o desligamento do micro é de:

$$\Delta t_c = (V_o - V_L) * \frac{C}{I} \quad (18)$$

em que atribuindo os respectivos valores, tem-se:

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

obtém-se o valor de Δt_c :

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

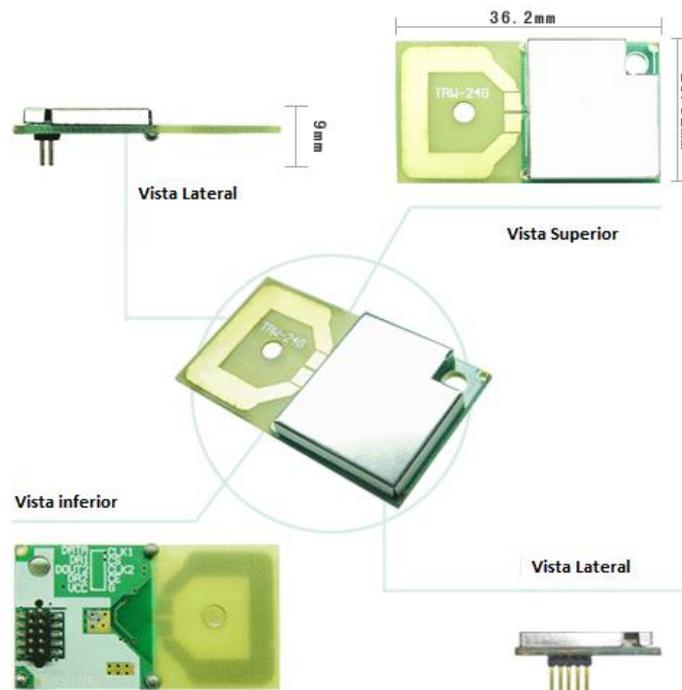
Entretanto, observando o esquema da Figura 43 constata-se que o valor mínimo V_L será definido, não pela tensão mínima de funcionamento do microcontrolador, mas pela tensão resultante da associação em série da bateria CR2025 e o diodo Schottky 1N5819, com uma tensão direta de 0,6 volts, que resultam 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 , utilizando a bateria de Lítium para garantir o funcionamento do relógio durante um período de até 12.140 horas.

4.1.5. Transceptor

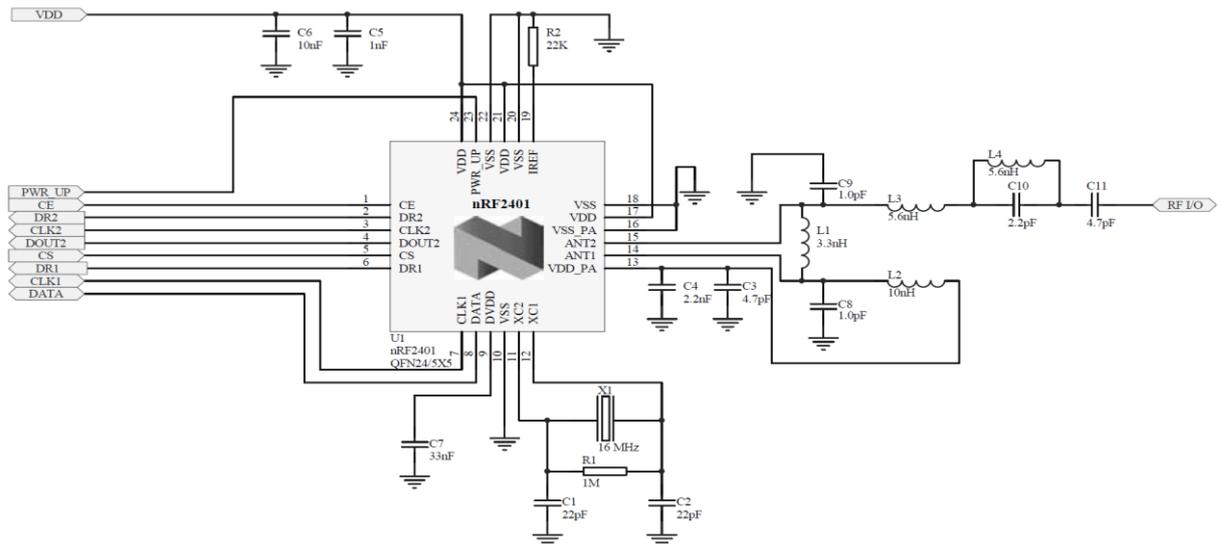
A combinação de um transmissor e um receptor, utilizando componentes comuns, para ambas as funções, em um só circuito, é chamado de transceptor. O dispositivo é responsável pelo envio e recebimento das informações transmitidas sem fio entre os módulos. O transceptor utilizado nos nodos sensores, *master* e atuadores desta rede é o modelo TRW-24G, fabricado pela Laipac (Figura 44), a partir do chip nRF2401a da *Nordic Semiconductor*. Este módulo opera na faixa de 2,4GHz, banda livre para aplicações ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). O esquemático do módulo é apresentado na Figura 45, onde pode ser visto o dimensionamento do circuito de casamento de impedância da antena de 50 Ω . O TRW-24G (também chamado de RF-24G e TXRX24G) suporta tensão de alimentação de no máximo 3,6 volts. A unidade de processamento e o módulo transceptor estão ambos alimentados com a mesma tensão regulada em 3,3 volts, o que facilita bastante a conexão dos blocos sem intermédio de componentes reguladores.

Figura 44 –Transceptor TRW-24G da Laipac.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 45 – Esquemático do nRF2401A para projetos com uma única antena de 50 Ω.



Fonte: <http://www.nordicsemi.no>, 2013.

As funções dos pinos conectados ao microcontrolador apresentados na Figura 45, estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7 - Descrição da função dos pinos do módulo TRW-24G.

Nº do Pino	Função	Descrição
1	CS	Chip Select ativação configuração mode
2	CLK1	Clock para transmissão do dado 1
3	DATA	Dado TX/RX
4	DR1	Interrupção para habilitar recebimento dado canal 1
5	DOUT2	Interrupção para habilitar canal 2
6	DR2	Interrupção para habilitar recebimento dado canal 2
7	VCC	Tensão de trabalho
8	GND	Tensão de referência Ground
9	CE	Habilitação do chip (chip enable) ativado RX e TX
10	CLK2	Clock para transmissão do dado 2

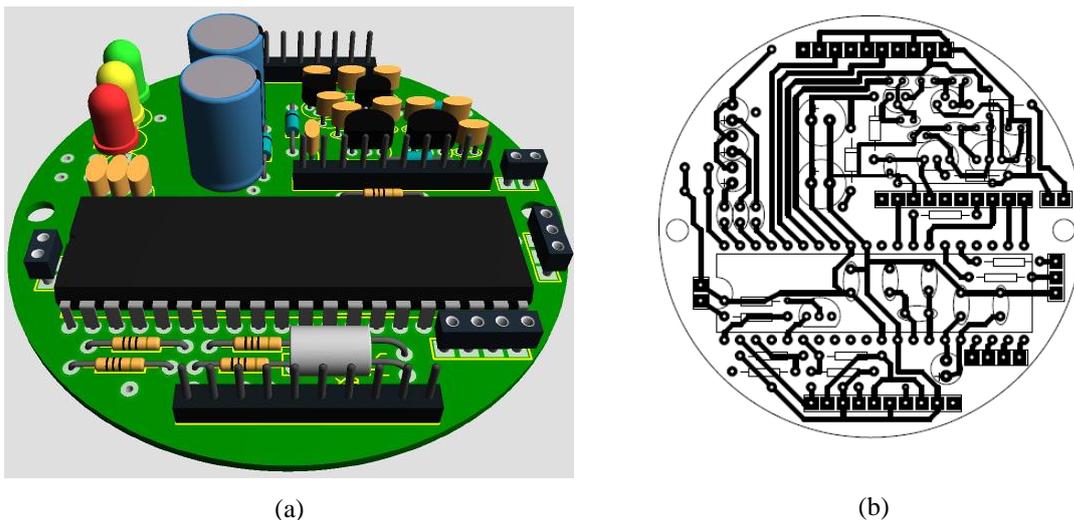
Fonte: www.laipac.com, 2013.

4.1.6. Layout da Placa de Circuito

A placa principal dos módulos sensores é mostrada na Figura 46(a) e (b). Esta unidade é utilizada por todos os demais módulos sensores e atuadores que compõem a plataforma de controle sem fio. As diferenças em sua utilização surgem na operação dos pinos de expansão, conectados às placas dedicadas à multiplexação dos sensores, controle de válvulas, acionamento e operação do conjunto motobomba com inversor de frequência.

O bloco de comunicação utiliza transceptor idêntico ao empregado no 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 informar o seu nível de carga à estação base e controlar as funcionalidades da placa de expansão conectada aos seus pinos de I/O.

Figura 46 – Placa principal dos módulos remotos (a) Layout do PCB (b).



Fonte: Elaborada pelo autor.

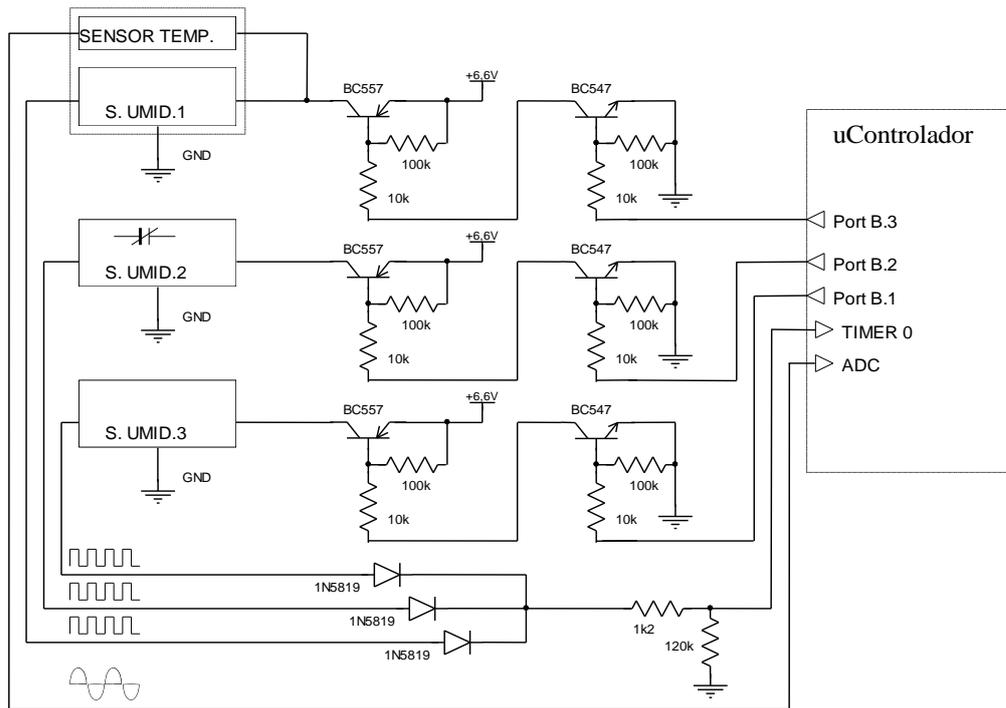
4.2. Módulo de Multiplexação dos Sensores

O bloco da unidade de sensores foi desenvolvido em uma placa separada, permitindo o uso alternativo de outros tipos de sensores. 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.

4.2.1. Chaveamento dos Sensores

O bloco de multiplexação foi inicialmente elaborado com transistores de junção bipolar, do tipo BC (Base Comum), por suas características de baixa impedância (Z) de entrada, alta impedância de saída e por não apresentar defasagem entre o sinal de entrada e saída. O esquemático é apresentado na Figura 47.

Figura 47 - Esquema do circuito de controle dos sensores.



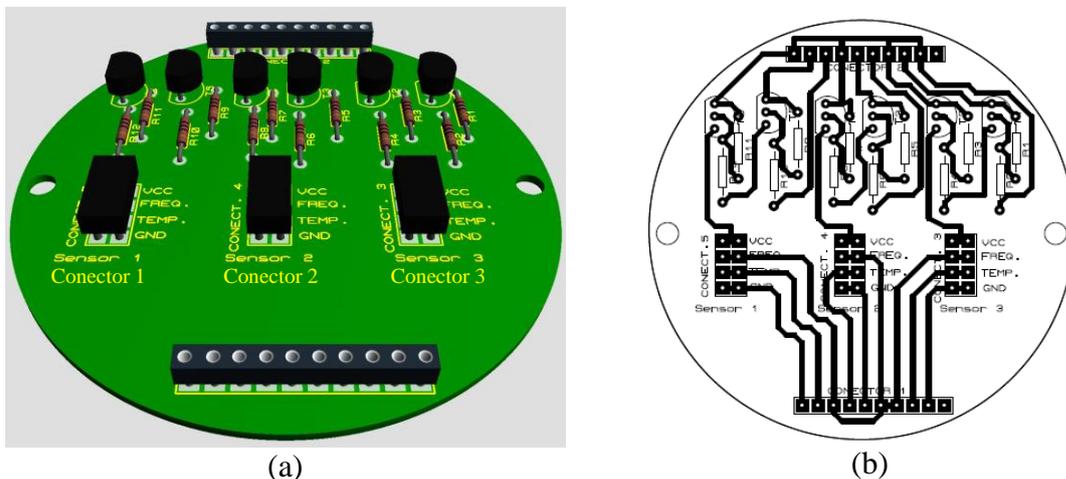
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2. Layout da Placa

Os primeiros protótipos foram inicialmente confeccionados através de métodos de foto revelação positiva, em placa de fenolite de uma camada. Aprovado o layout, uma série de placas foi produzida em métodos industriais. A confecção das placas dos módulos remotos na forma circular segue o conceito de modularização do protótipo de forma compacta a ser acondicionado em tubos de PVC.

O *layout* das placas pode ser visto na Figura 48 (a) e (b).

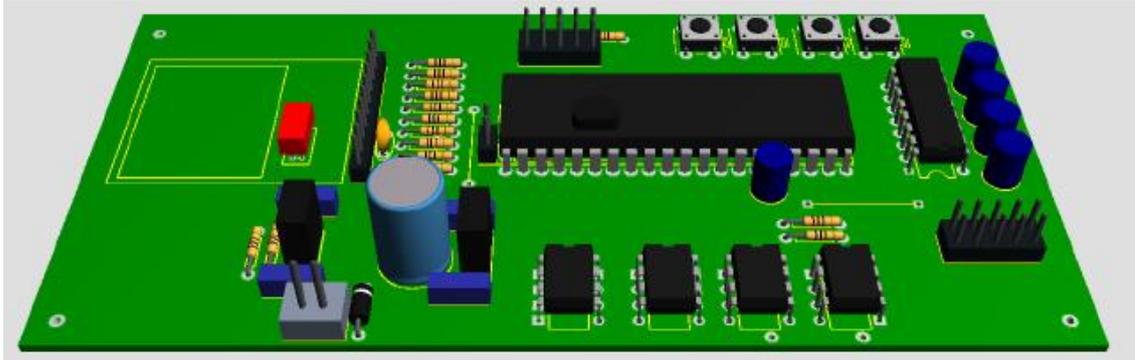
Figura 48 - *Drive* de Leitura dos Sensores. Vista superior da placa (a). Layout das trilhas (b).



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3. Módulo *Master*

O módulo *master* (mestre) é o dispositivo que conectado ao computador central torna-se responsável pela integração de todos os demais módulos da rede. O circuito do módulo utilizado em trabalhos anteriores conta com recursos de expansão de memória através do barramento serial I2C, conector para display LCD ligado à porta B do microcontrolador, fonte de alimentação externa, comunicação serial RS232, USB, Bluetooth e teclado de quatro chaves para navegação em menus. A placa, conforme apresentado na Figura 49, dispõe também de um bloco de regulação de tensão para 5V e 3V, as respectivas tensões de alimentação do microcontrolador e do rádio transceptor, componente responsável pela comunicação RF.

Figura 49 - Módulo *Master*

Fonte: Elaborado pelo autor.

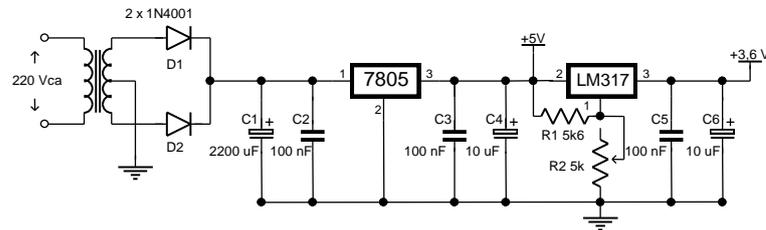
Neste trabalho, o layout do *Master* passa por novas alterações, necessárias para melhorias em sua conectividade com o computador central. Dentre as mudanças aplicadas a esse módulo pode ser citada a implementação da conexão USB (*Universal Serial Bus*) com o Módulo *Master* e o uso de conexão Bluetooth. O uso do padrão USB se popularizou nos últimos anos e passou a ser utilizado em uma grande variedade de dispositivos eletrônicos dotados de memória e processamento. O mesmo pode ser dito do padrão Bluetooth. A adoção desses padrões de comunicação aumenta a praticidade de conexão do módulo com outros dispositivos portáteis tais como Laptops, Palmtops e Celulares, todos esses utilizados no transporte de dados ou hospedando aplicativos de gerenciamento da rede. A escolha no uso de cada porta de conectividade está relacionada às limitações de processamento do dispositivo de gerenciamento ou armazenamento utilizado.

4.3.1. Fonte de Alimentação

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 *master* pode ser visto na **Figura 50**.

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.

Figura 50 - O circuito da fonte do módulo *master*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.2. Fonte Carregadora de Bateria por Painel Solar

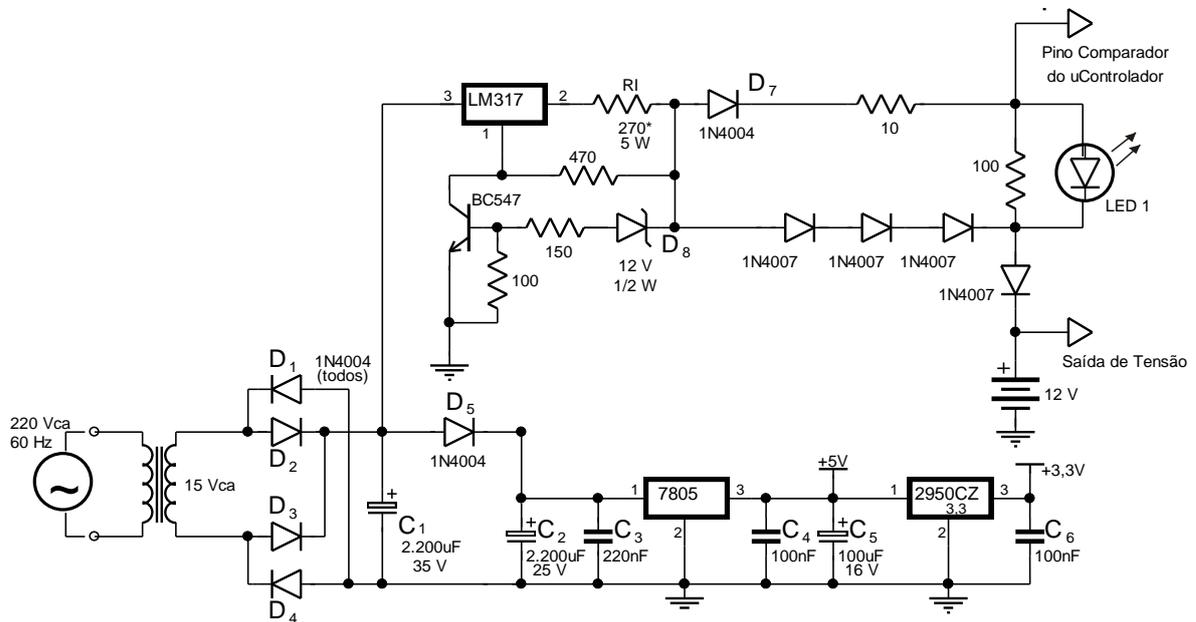
A longevidade das baterias distribuídas na rede de controle sem fio depende em grande parte da eficiência dos sistemas operacionais e dos protocolos de comunicação embarcados nos módulos remotos. Entretanto, mesmo para o curto ciclo das culturas já mencionadas, em que os períodos variam de dois a três meses, ainda assim, trata-se de um longo tempo para manutenção ininterrupta da carga das baterias distribuídas no campo. Para garantir o suprimento de energia da rede foi integrado aos módulos o uso de painéis solares com respectivamente as potências de 5 e 10W, acoplados aos módulos sensores e controladores de válvulas. A administração da carga destas baterias utilizou uma configuração de fonte de corrente com limitação da tensão de entrada gerada por painel solar para carga das baterias de chumbo-ácido de 12V e 7,2Ah, utilizadas no controle de válvulas e sensores de pressão do cavalete de derivação da malha hidráulica e também nas baterias de 12V e 1,3Ah utilizadas nos módulos sensores.

As baterias empregadas são do mesmo tipo das utilizadas em *No-Breaks* e para serem carregadas, de forma ideal, precisam ser alimentadas com uma tensão igual ou levemente superior à tensão nominal, algo entre 12 e 13,8V, com uma corrente de 5 a 25% da corrente nominal em ampères-horas (Ah). O carregador deverá manter uma corrente de saída de 0,36A a 1,8A para a bateria de 7,2Ah e 65mA a 325mA para bateria de 1,3Ah.

A configuração de circuito adotada para este propósito é apresentada na Figura 51, onde pode ser vista a utilização do CI LM317, um regulador ajustável de 3 pinos capaz de trabalhar com correntes de saída de até 3,4A e tensões reguladas de 1,2 a 37V, características favoráveis aos parâmetros dos circuitos utilizados neste trabalho.

A fonte possui uma entrada alternativa AC de 220V, para o caso de carga da bateria utilizada na casa de bombas, como *No-Break* para o funcionamento do módulo remoto de controle do conjunto Motobombas.

Figura 51 – Esquemático da fonte com controle de carga para bateria.



Fonte: Colaboradores do LEMA.

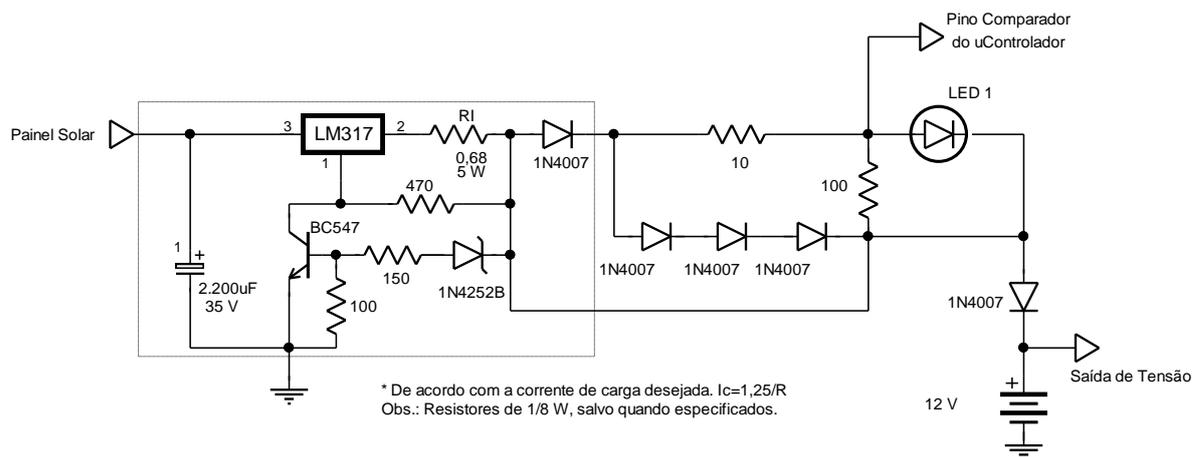
Um transformador é utilizado para conversão da tensão de entrada de 220Vca para 15Vca. A tensão em seguida é retificada por uma ponte de onda completa e filtrada por um capacitor de 2200 μF , fornecendo tensão para os blocos reguladores de 12 V e 5V, implementados com os CI's reguladores LM317 e LM7805 respectivamente.

A configuração necessária para manutenção das cargas por painéis solares utiliza um circuito mais simples, reduzindo o esquemático anterior para o bloco de regulagem de 12V implementado com o LM317 conforme apresentado na Figura 52.

O painel solar utilizado possui tensão de entrada variável, mas foi tomada como base uma tensão de entrada de 15V, tensão típica descrita pelo fabricante do painel, aplicada à entrada "Vp", entrada do bloco de regulagem da fonte.

A tensão "Vc" corresponde à saída de tensão da bateria para o circuito que será alimentado. O critério de carga da bateria, adota uma corrente de 0,36 A a 1,8 A, e tensão igual ou levemente superior a 12V dimensionada através do uso de um diodo zênere de 12V conectado, em série com uma resistência ao referencial do CI regulador, foi acrescentada ainda uma saída de sinalização de carga completa, indicada pelo LED₁ e que pode ser conectada ao pino comparador ou CAD do microcontrolador do módulo remoto e utilizado para fins de avaliação do consumo de energia da rede e desempenho das baterias.

Figura 52 – Esquemático da fonte de corrente com limitação em Tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3. Microcontrolador

O microcontrolador utilizado no módulo *master* é o mesmo modelo PIC18LF4550 utilizado nos módulos sensores e já abordado anteriormente. Entretanto, a aplicação nesta unidade é definida em outros parâmetros tais como a tensão de alimentação de 5V que permite uma velocidade de processamento maior, atendendo melhor o fluxo de comunicação entre as unidades remotas e o microcomputado, da interface supervisora.

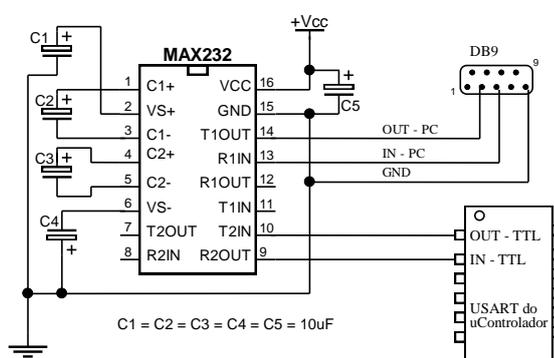
4.3.4. Conexão RS232

O bloco de comunicação do módulo mestre com o computador ainda mantém, como opção de comunicação, o padrão serial RS232, por ainda ser uma alternativa muito utilizada e de baixo custo. A conexão serial trabalhando em conjunto com o programa de interface permite 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 53.

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 53. Esquema de ligação do MAX232.

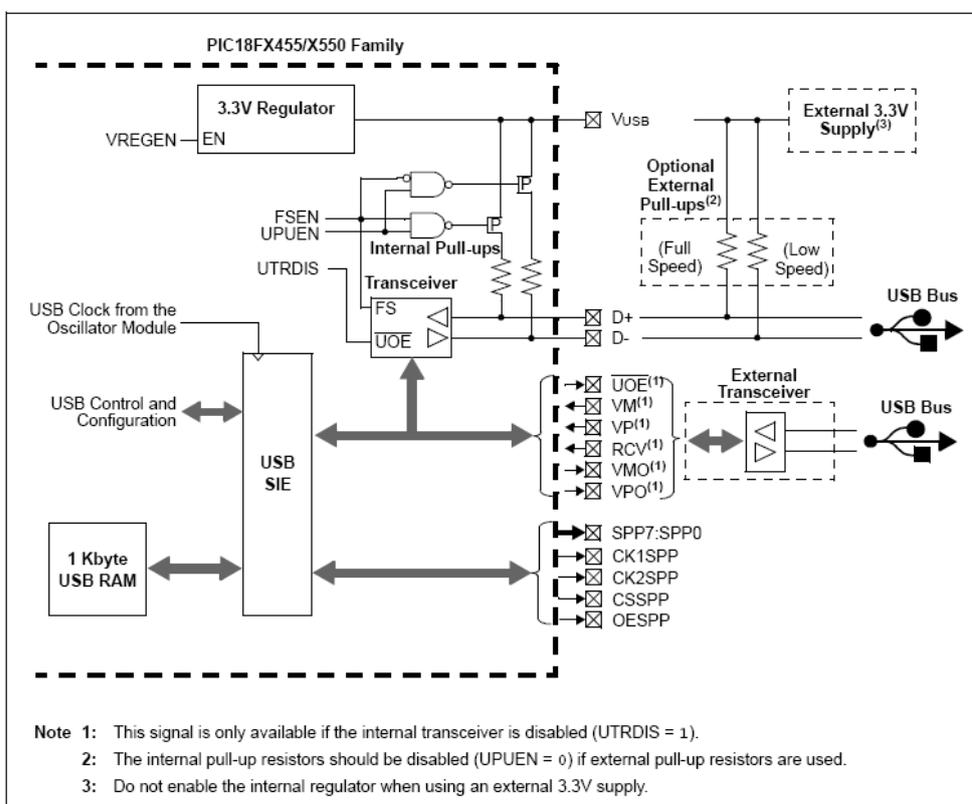


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.5. Conexão USB

O desenvolvimento da etapa de comunicação serial USB utiliza o bloco integrado ao microcontrolador já mencionado e correspondendo a versão 2.0 capaz de trabalhar com taxas de velocidade de 1,5 Mb/s a 12 Mb/s. O barramento de conexão prevê dois tipos de implementação, com e sem chip transceiver. A primeira opção foi escolhida por ser mais simples e não exigir muitos componentes externos, somente um capacitor como filtro de ruídos para o regulador interno de 3,3 volts utilizado para alimentação de dispositivos alimentados através do barramento, conforme apresentado na Figura 54.

Figura 54 - Visão geral e características do periférico USB (Microchip).



Fonte: www.microchip.com, 2013.

Neste trabalho decidiu-se utilizar o protocolo USB HID, por conta das várias vantagens apresentadas na seção 3.10.3. Os testes foram realizados utilizando um kit de desenvolvimento da Microchip que possui um microcontrolador PIC18F4550. Para compilar o código do microcontrolador, utilizou-se o compilador CCS.

A codificação do programa do host utilizou para o controle das funções do microcontrolador, o compilador C MinGW juntamente com a IDE CodeBlocks para o desenvolvimento de uma DLL (*Dynamic Link Library*), que possuísse todas as funções necessárias de acesso ao microcontrolador através da porta USB. A interface gráfica de testes foi desenvolvida em linguagem Java, com o auxílio da IDE Netbeans, por conta de seu fácil manuseio e portabilidade da plataforma operacional.

a) Descritores USB HID

Os descritores são a parte do código que apresentam o funcionamento da USB, quanto à sua comunicação com o host, tamanho dos pacotes, número de pacotes enviados e recebidos e outras configurações.

Nas configurações dos descritores podemos definir a quantidade de canais para comunicação utilizada pelo dispositivo. Esses canais são chamados de *endpoints*, e são limitados a 15. A comunicação desenvolvida para este trabalho é simples, limitando-se a configurar apenas o *endpoint* 1. Nestas configurações podemos definir o máximo de corrente requerida por cada *endpoint*, onde o padrão é 100mA.

O descritor HID foi alterado, para os propósitos deste trabalho, apenas nos parâmetros que definem o tamanho dos pacotes enviados, o número máximo de pacotes por transmissão e o nome de identificação do dispositivo.

b) Modos de Comunicação

O protocolo dispõe de quatro modos de comunicação, que podem ser utilizados no USB HID (Tabela 8).

Tabela 8 – Modos de comunicação USB.

Tipo	Descrição
<i>Bulk Transfer:</i>	Transferência de dados em massa, muito utilizada, quando é necessário transferir muitos dados, como em <i>pendrives</i> e cartões de memória <i>flash</i> ou em impressoras e scanners.
<i>Interrupt Transfer:</i>	Utilizada quando a quantidade de dados transferida é muito pequena com maior velocidade.
<i>Isochronous Transfer:</i>	Utilizada quando a transmissão de dados deve ocorrer em tempo real. Nesse caso, não há <i>handshake</i> .
<i>Control Transfer:</i>	Usada apenas para transmissão de dados de controle do dispositivo.

Fonte: Elaborada pelo autor.

c) Comunicação com o PC

A DLL criada possui três funções que dão ao sistema o acesso básico ao dispositivo embarcado (Tabela 9).

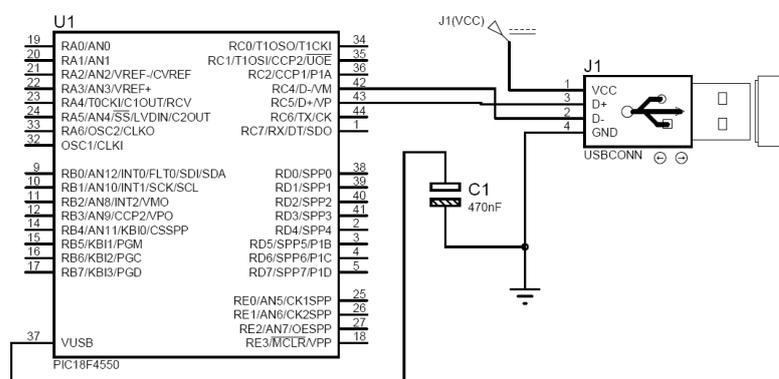
Tabela 9 – Funções básicas.

Função:	Descrição:
<i>FindHIDDevice:</i>	Responsável por procurar por um dado dispositivo USB, através de seu PID e VID, que são respectivamente identificadores de produto e fabricante.
<i>ReadDevice:</i>	Responsável por fazer a leitura do dispositivo. São lidos os números de bytes definidos nos descritores do microcontrolador.
<i>WriteDevice:</i>	Responsável por enviar dados ao dispositivo. Esse envio é feito de qualquer número de bytes, contudo só serão lidos por vez, os números definidos no descritor do dispositivo, o resto fica armazenado em um buffer, que tem seu tamanho definido também no dispositivo, limitado a no máximo 64bits.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma observação deve ser feita com relação ao envio e recebimento de dados, sempre o primeiro byte corresponde ao número do endpoint subtraído de 1, ou seja, quando utilizado o endpoint 1 para a comunicação, então o primeiro byte de leitura e recepção é igual a 0. A interface desenvolvida para os testes operou de forma amigável os vários periféricos disponíveis nos módulos remotos, realizou leituras no conversor A/D do microcontrolador e alterou parâmetros na memória do micro. Na Figura 55 é apresentado o modelo do circuito no *Software Proteus*, que conta com uma IDE (*Integrated Development Environment*) para testes e avaliação de circuitos dedicados ou microprocessados. O uso do componente USBCONN permitiu a emulação física do módulo USB conectado a uma das portas do microcomputador utilizado. Desta forma, foi possível simular a interação dos protocolos desenvolvidos com a interface supervisora da rede de controle.

Figura 55 – Simulação no Proteus.



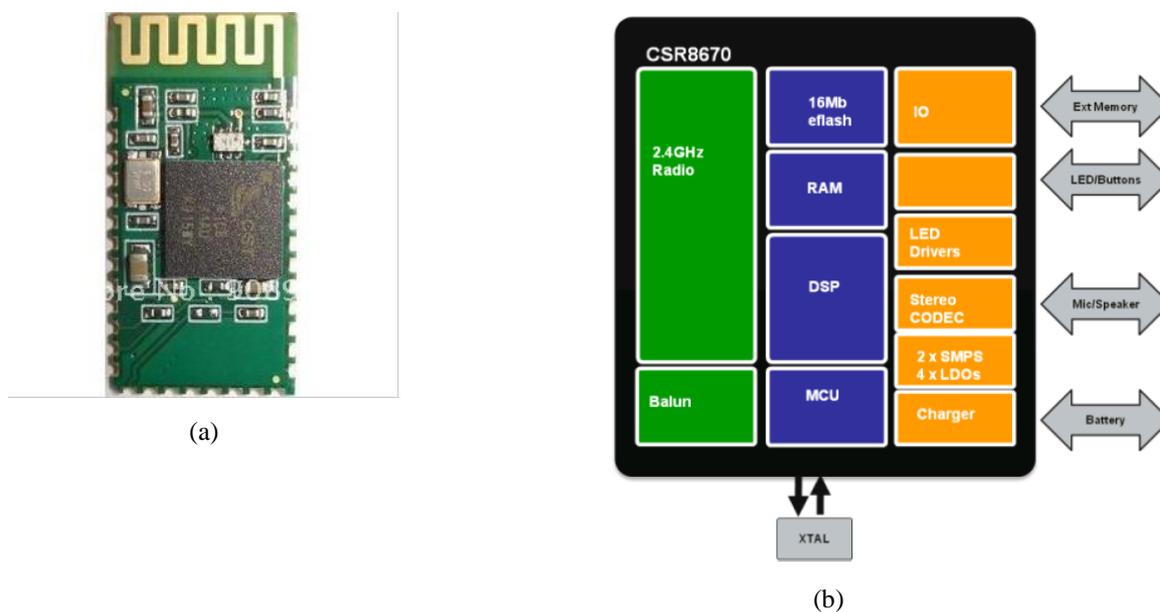
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.6. Conexão Bluetooth

A implementação da conectividade Bluetooth utilizou o módulo da CRS versão V2.0, com taxa de transmissão de 3Mbps, modulado com rádio transceptor de 2.4GHz. Este utiliza RSE BlueCore 04-Externa, um sistema Bluetooth único em um chip com tecnologia CMOS e com AFH (*Adaptive Frequency Hopping Feature*). Possui tamanho reduzido de 27mm x 12,7mm. (Figura 56).

A interface de conexão física do módulo exige alguns cuidados com relação às tensões de alimentação e amplitude no sinal de dados. O módulo aceita a tensão máxima de 3,3 Volts enquanto o microcontrolador do *master* opera com 5 Volts, conforme apresentado nos tópicos anteriores. Na Tabela 10 e na Tabela 11 são apresentados os recursos operacionais e de conectividade do módulo, respectivamente. Entretanto, a fonte do módulo *master* já foi dimensionada com um bloco de regulação para tensão de 3,3 volts, resolvendo o problema de alimentação do dispositivo, restando tratar a amplitude dos sinais no barramento de comunicação com o módulo, ou seja, canais de comunicação Tx e Rx. A situação crítica está no dimensionamento de um divisor de tensão para o Rx, tendo em vista que o pino Tx opera dentro da faixa de nível lógico alto do micro, não exigindo um tratamento de seu sinal. O divisor de tensão para o pino Rx do módulo deve ser dimensionado de forma a evitar capacitâncias parasitas que depreciam os sinais de comunicação em altas frequências.

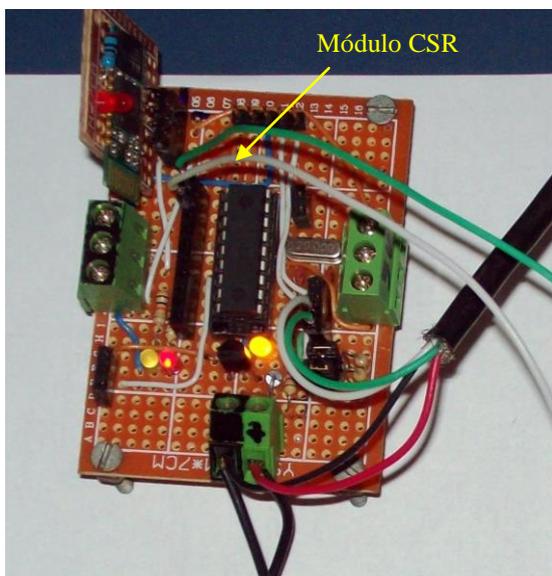
Figura 56 – Módulo Bluetooth visão geral (a), circuito em blocos (b).



Fonte: www.csr.com, 2013

A integração deste componente ao módulo *master* foi implementada através da emulação de uma conexão serial em dois pinos digitais, disponíveis no microcontrolador. Os pinos dedicados a USART do micro foram preservados para manutenção do padrão RS232 ainda muito utilizado. Os primeiros testes foram realizados em uma placa de desenvolvimento padrão com um microcontrolador de menor capacidade o PIC16F678A com um oscilador de 20 MHz de clock alimentado com 3,3 Volts conforme apresentado na Figura 57.

Figura 57 - Placa de teste da conexão Bluetooth.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 10 - Recursos de Hardware.

Recurso	Característica
Plataforma:	20 pinos
Sensibilidade:	-80dBm
Memória Flash	16M
Potência:	-4dBm a +4dBm.
Versão:	Bluetooth V2.0
Modulação:	EDR
Taxa de transmissão:	3 Mbps.
Tensão de operação:	1.8, a 3.6V.
Tensão de controle I/O:	1.8, a 3.6V.
Interface:	UART com taxa de transmissão programável.
Antena:	PCB integrada.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 11 - Recursos de conexão *in circuit*.

Recurso	Característica
Padrão de conexão serial:	38400, bits de dados: 8, Stop bits: 1; Sem paridade, controle de dados.
Taxas de transmissão:	9600, 19200, 38400, 57600, 115200, 230400, 460800.
Controle de fluxo:	CTS e RTS

Fonte: Elaborada pelo autor.

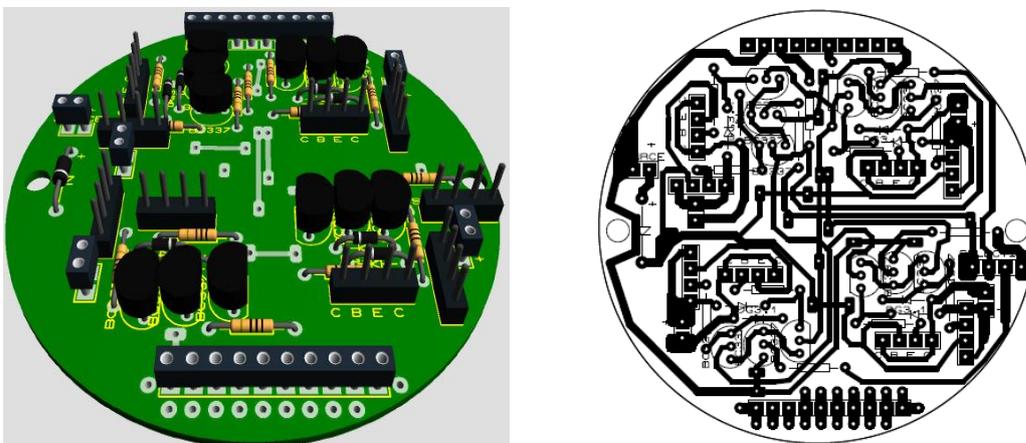
4.4. Módulo de controle de Válvulas

Para o acionamento das válvulas, tipo *Latch*, foi montando e testado um *drive* de controle integrado de forma modular à placa principal dos módulos remotos. O *drive* de controle foi elaborado com componentes dedicados simples e de baixo custo, facilmente encontrados no comércio local.

O *drive* de controle (Figura 58) prevê acionamento para até quatro válvulas, podendo ser expandido com a conexão em série de até três *drives*, permitindo o controle, por um único módulo remoto, de até doze válvulas *Latch*. A modularização apresentada garante a capacidade de expansão e adaptação dos módulos do sistema com a placa principal, responsável pela comunicação e processamento dos sinais.

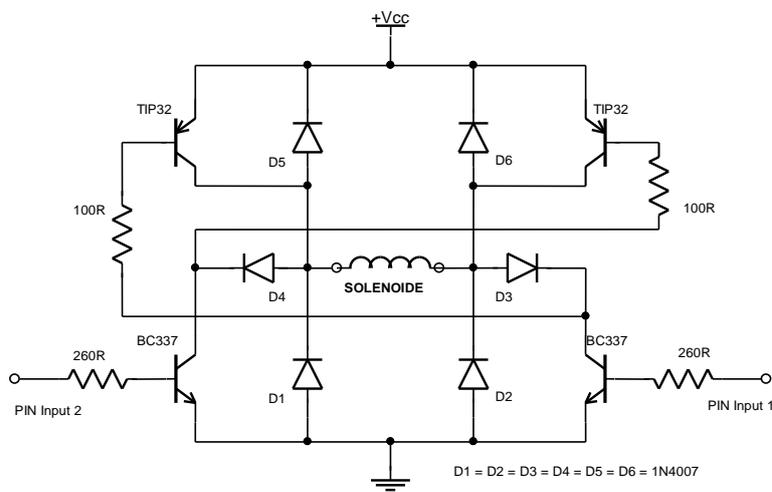
O diagrama esquemático simplificado do *drive* de controle das válvulas é apresentado na Figura 59 e consiste em aplicar um pulso, ou trem de pulsos, polarizado no solenóide conforme o estado que se deseje ativar (abertura/fechamento). O controle é realizado através dos terminais PIN Input 1 e 2 conectados aos pinos do microcontrolador da placa principal.

Figura 58 – Circuito do *drive* de controle das válvulas tipo Latch.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 59 - Esquemático da ponte H para controle dos solenóides.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O circuito foi submetido a ciclo de testes em laboratório, operando com intervalos de 15 segundos entre abertura e fechamento. Aprovado nos testes de bancada, o módulo foi submetido ao teste de campo operando durante um ciclo de cultura de melancia, controlando quatro válvulas *Latch* alimentadas por duas baterias de 12 Volts de 1,3 Ah cada. A unidade de controle das válvulas foi montada junto ao cavalete de derivação da malha hidráulica, com recarga garantida através de uma célula fotovoltaica, conforme apresentado na **Figura 60**.

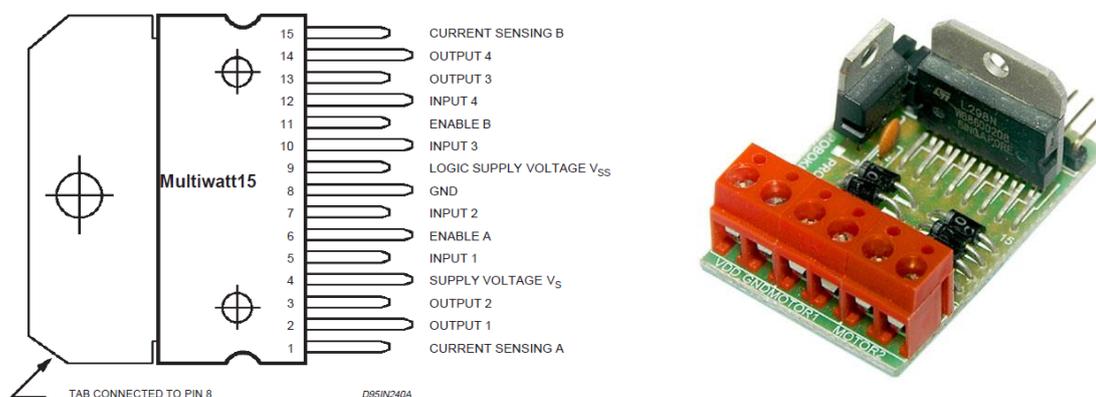
Figura 60– Cavalete de derivação da adutora principal para as quatro áreas irrigadas, controladas por válvulas do tipo Latch.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os testes de campo revelaram problemas de ordem prática e funcional, tais como fragilidade dos conectores dos cabos das válvulas, falta de proteção contra inversão de polaridade, falta de sinalização de estados de operação das válvulas, queima de transistores, subdimensionados para a potência requerida para o acionamento dos solenóides, quando sujeitos à pressão de serviço da malha hidráulica, momento em que a corrente de pico atinge o valor de 2,3 A. Os Problemas citados foram solucionados com a remodelagem desta placa e substituição da ponte H elaborada com transistores por dois CI L298 (Figura 61), cada um com duas pontes H e com capacidade para fornecer correntes de saída de até 4A.

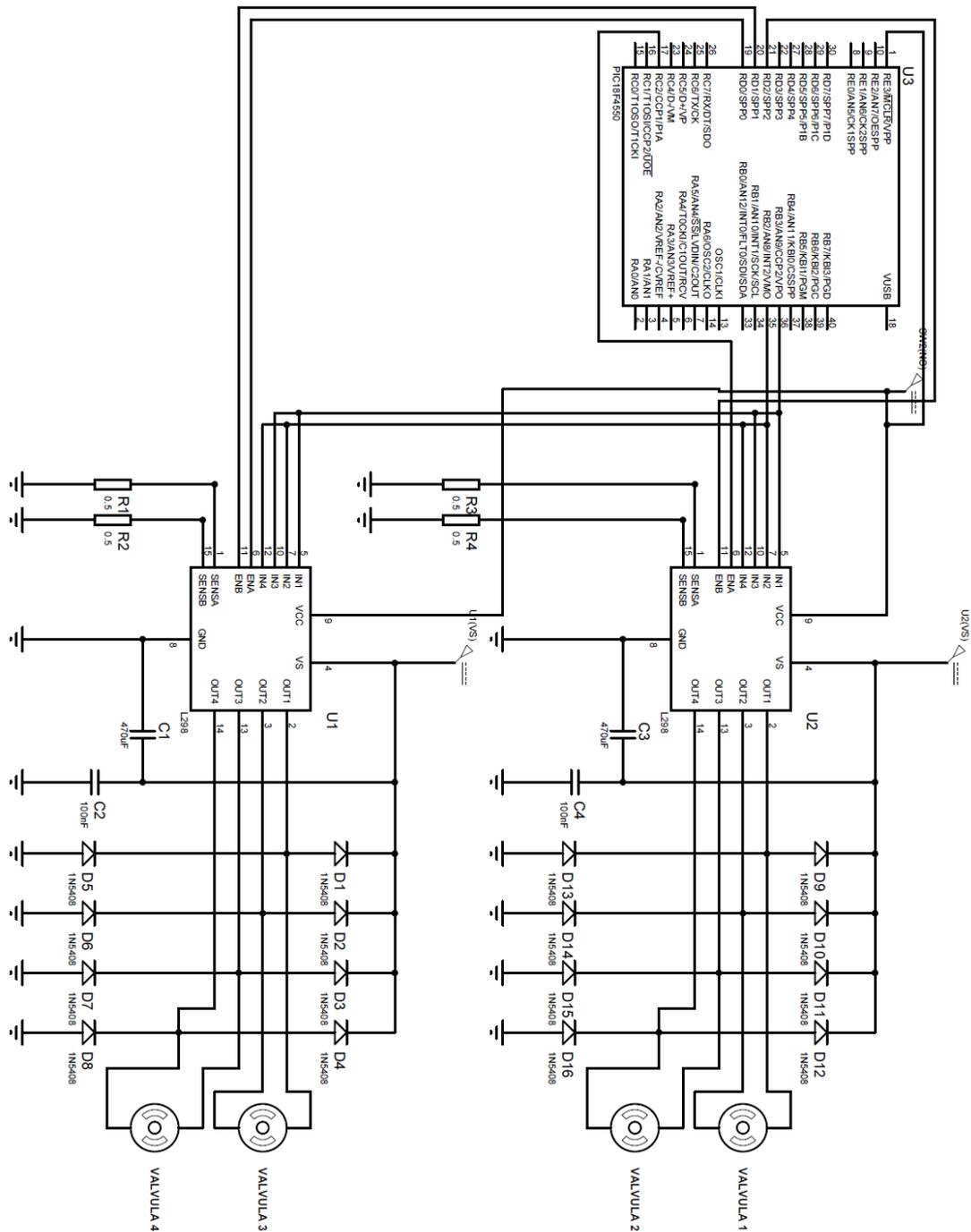
Figura 61 – Pinos de conexão da dual Ponte L298 (a), placa de teste (b).



Fonte: www.st.com, 2013.

A modelagem e simulação do novo módulo de controle das válvulas foi realizada no ambiente ISIS do Proteus. O esquemático é apresentado na Figura 62.

Figura 62 – Esquemático da Unidade de controle das Válvulas.



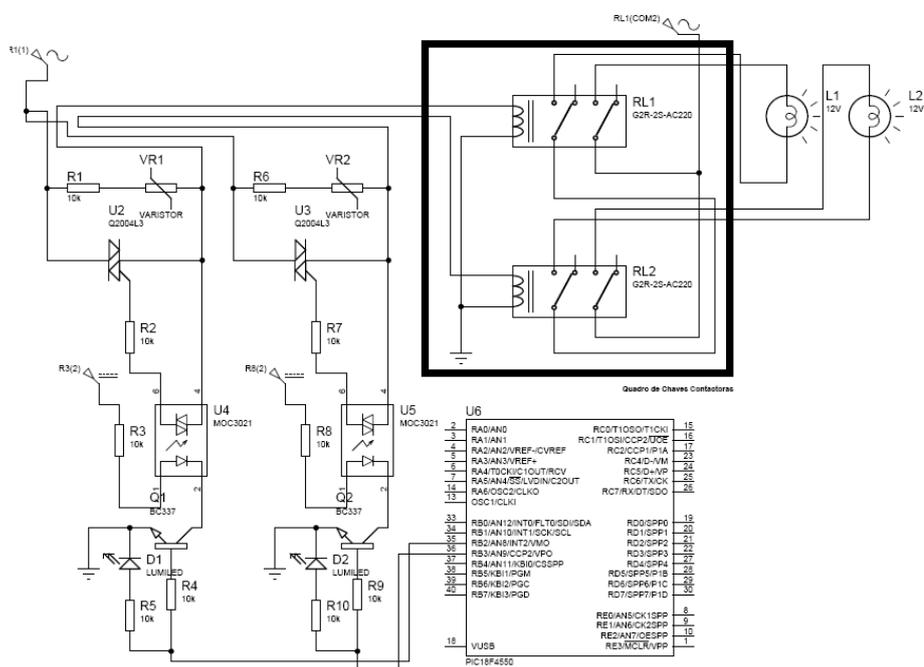
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.5. Módulo de partida direta de Bombas

O desenvolvimento deste dispositivo implica no acionamento, via rádio frequência, de bombas utilizadas em sistemas de irrigação. Os parâmetros de projeto levam em consideração as condições mais comuns encontradas nas áreas com irrigação pressurizada, onde a casa de bombas é normalmente constituída de estrutura e instalações simples. A partida do sistema motobomba, na maioria das vezes é administrada por uma chave de partida, trifásica ou monofásica, dependendo da potência das bombas e da rede elétrica disponível, ou ainda, quando a potência atinge um valor elevado usa-se um *Soft-Start* para controlar a corrente de partida do motor, evitando quedas bruscas de tensão na rede elétrica. O *drive* de acionamento deve, portanto, ser modular de acordo com os demais blocos do sistema e facilmente instalado no quadro de bombas residente e ainda permitir a rápida comutação entre os modos automático e convencional, prevendo eventuais manutenções e redimensionamento do sistema. Entre as características do dispositivo, a principal trata da isolamento do comando eletrônico da chave de partida. Uma etapa fundamental do circuito para o acionamento de cargas indutivas através de microcontroladores. O problema consiste em evitar a propagação de EMI (*Eletromagnetic Interference*), a indução gerada pela carga indutiva, nos picos de partida.

A isolamento proposta é implementada com optoacopladores disparando tiristores (Figura 63). Os testes de acionamento foram realizados com sucesso, repetidas vezes em laboratório, onde se obteve rápida resposta do módulo de rádio instalado a distâncias compatíveis com as encontradas em campo. Posteriormente o protótipo foi instalado na área de aplicação do experimento e testado durante todo o ciclo da cultura da melancia. O sistema dedicado à irrigação da melancia constituía-se do conjunto motor bomba de 5 CV com uma tubulação principal de 106,0 m de comprimento composta por tubos de PVC de 75 mm, quatro linhas de derivação de 66,0 m com tubos de PVC de 50 mm e 64 linhas laterais de 55 m formadas por tubos de polietileno de 18 mm dotados de gotejadores, a cada 20 cm, com vazão de $1,49 \text{ L h}^{-1}$ a uma pressão de serviço de 8,0 kPa. O cavalete é composto por quatro válvulas do tipo *Latch* de duas polegadas. Esse sistema de irrigação permite, pelo seu dimensionamento, uma irrigação de duas áreas de 0,25 ha.

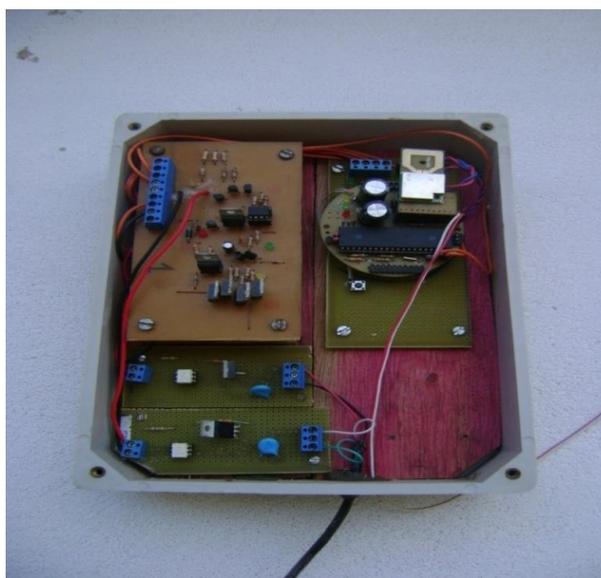
Figura 63 - Acionamento de carga CA utilizando MOC3021 e Tiristor.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O circuito foi acondicionado em uma caixa de PVC e instalado na casa de bombas, conforme apresentada na Figura 64.

Figura 64 - Primeiro protótipo de acionamento do conjunto motor bomba.



Fonte: Elaborada pelo autor.

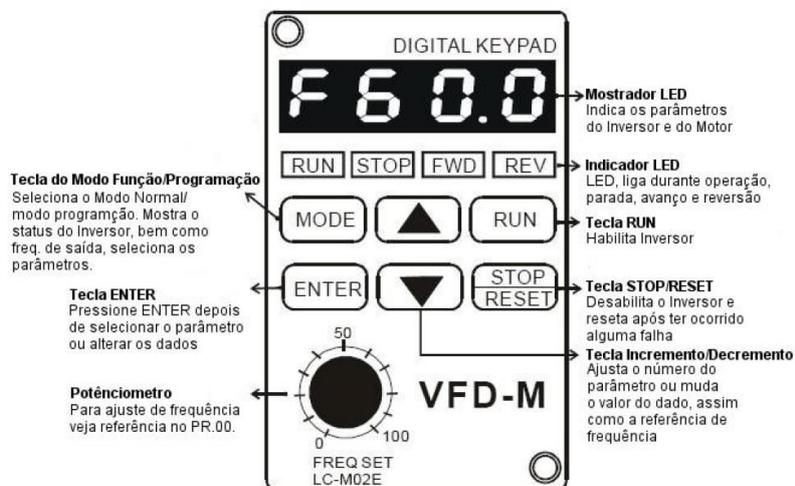
4.6. Módulos de controle do Inversor

O comportamento dos parâmetros (vazão, corrente elétrica e rotações por minuto do Motor de Indução Trifásico) foi testado no Laboratório de hidráulica do DENA com quatro repetições sendo duas crescentes e duas decrescentes para as diferentes frequências de (40 – 50 - 52,5 – 55 - 57,5 - 60) Hz. O monitoramento do comportamento do sistema com relação à pressão imposta, pela bomba, utilizou uma calha Parshall, manômetro de Bourdon, vacuômetro, tacômetro digital e registro de gaveta.

O objetivo, nesta etapa do trabalho, foi integrar um sistema inversor de frequência, à rede de sensores e atuadores sem fio, controlando a vazão de uma área irrigada por gotejamento. A aplicação de um inversor de frequência no controle do sistema Motobomba de pressurização traz como vantagens maior capacidade de fracionamento e automação da malha hidráulica, administrando com eficiência a potência fornecida pela bomba e promovendo uma redução no consumo de energia. O módulo sem fio foi desenvolvido e testado com um inversor já instalado na casa de bombas de uma área irrigada, passando a ser controlado remotamente por um sistema de supervisão geral, residente em um computador pessoal. O sistema de controle atua sobre a velocidade de rotação da bomba, de acordo com a demanda apresentada pelos sensores sem fio instalados no campo.

O inversor utilizado neste trabalho é o modelo vfd-037M43A da marca Delta, controlando um motor de indução trifásico de 5 CV, modelo C7R7 MB King. O modelo escolhido vem com várias opções de configuração e controle, dentre as quais o módulo IHM (Interface Homem Máquina) apresentado na Figura 65, painel com display, comandos e potenciômetro que permite o ajuste manual dos parâmetros de funcionamento.

Figura 65 - Painel IHM para a configuração manual do inversor.

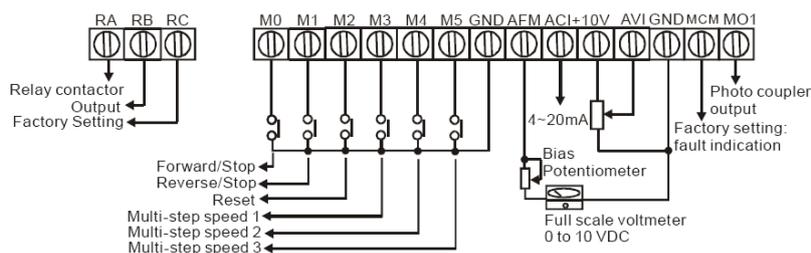


Fonte: Delta Inc, (2009).

4.6.1. Módulo de controle *Multi Step* do Inversor

A velocidade de rotação do motor pode ser controlada através de suas entradas digitais disponíveis no barramento de conexão do inversor, utilizando os bornes (M0) a (M5), como contatos secos, chaveados com lógica negativa através do pino de aterramento (GND), conforme apresentado na Figura 66.

Figura 66 – Borne de conexão para controle através de painel analógico e comandos digitais.



Fonte:Delta Inc., 2009.

Através dos parâmetros de configuração Pr. 39, Pr. 40, Pr. 41 e Pr. 42 as entradas digitais podem ser configuradas como comandos *multi-step speed* para definição de até sete frequências de rotação. Os valores pré-definidos das frequências devem limitar-se ao intervalo de 0,0 a 400,0 Hz, incrementados em uma escala de 0,1 Hz. A especificação das frequências com a lógica de operação, das entradas digitais, deve ser gravada na memória de configuração

através dos parâmetros Pr. 17 ao Pr. 23. A Tabela 12 apresenta a ordem lógica de controle dos bornes em relação aos parâmetros de armazenamentos das frequências pré-definidas.

Tabela 12 - Lógica de Controle Multi-Step do inversor Delta-VFD.

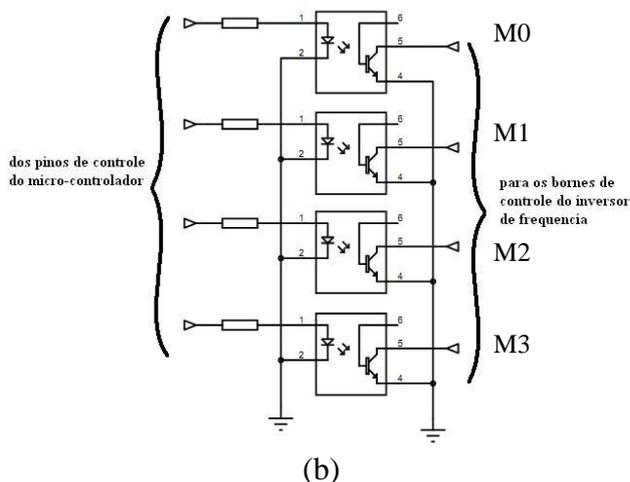
M0	M1	M2	M3	STEP No.	PR
ON	ON			1	17
ON		ON		2	18
ON	ON	ON		3	19
ON			ON	4	20
ON	ON		ON	5	21
ON		ON	ON	6	22
ON	ON	ON	ON	7	23

A primeira medida de integração do inversor à rede de sensores sem fio é feita através de um módulo proposto por SANTOS (2008), onde foi desenvolvida uma placa de extensão para os módulos remotos. O módulo executa a comutação dos bornes de controle do inversor através de opto-acopladores 4N25 (Figura 67 b).

Figura 67 – (a) Inversor Delta de 5 CV, (b) esquemático de conexão dos opto-acopladores 4N25.



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

O inversor foi programado com valores discretos de frequência de operação, como visto na Tabela 13, a fim de facilitar na manutenção da pressão imposta sobre a malha hidráulica conforme o número de válvulas abertas varia, assim, a comutação dos bornes do inversor altera a frequência corrente de operação do conversor de frequência.

Tabela 13 – Frequência de rotação do inversor em função da pressão de serviço.

CORRENTE (A)	FREQUÊNCIA (Hz)	PRESSÃO CABEÇAL DE CONTROLE (ATM)	QUANTIDADE DE VÁLVULAS
6,3	58	1	4
6,2	50	1	3
5,9	43	1	2
5,5	35,7	1	1

Fonte: Ensaios realizados no lote experimental (2010).

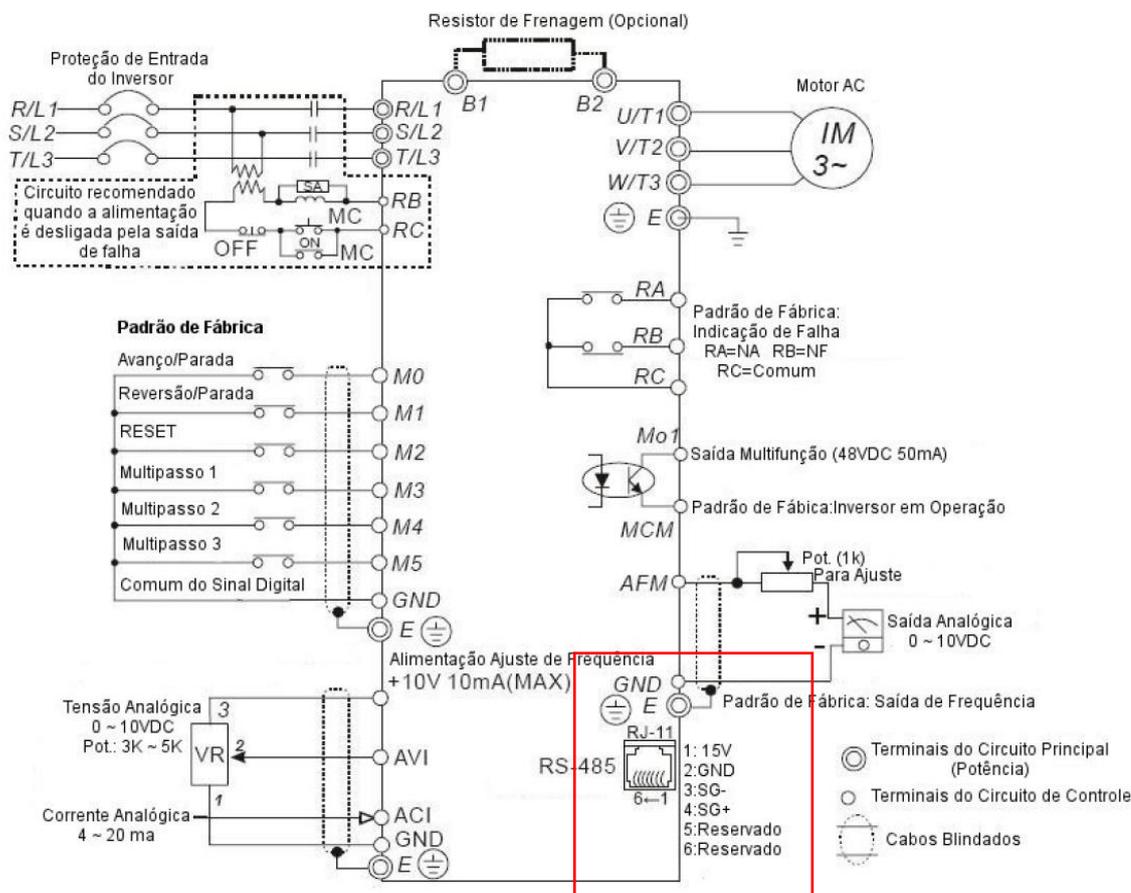
As frequências foram definidas de forma a manter constante a pressão de 1 ATM na malha hidráulica, independente da quantidade de válvulas abertas. Os degraus foram definidos a partir da combinação de chaveamento dos bornes do inversor, saltando para as frequências pré-programadas obtidas através dos ensaios de calibração do sistema de bombeamento.

4.6.2. Módulo de controle do Inversor por barramento Modbus

Esta opção de controle do inversor foi testada utilizando a interface serial de comunicação de dados Modbus, disponível na placa do inversor, através de um conector RJ-11, com uma interface física RS-485 (Figura 68).

O padrão de comunicação RS-485 é composto por um conjunto de especificações físicas e elétricas para comunicação serial de uso industrial. Seu caráter de transmissão e recepção diferencial torna esse padrão altamente imune a ruídos, sendo ideal para uso com máquinas que manipulam ou geram fortes campos eletromagnéticos. Um dos mais famosos protocolos que funcionam baseados no RS-485 é o Modbus.

Figura 68 – Conector RJ-11 disponível no *drive* de controle do inversor.



Fonte : Delta Inc., 2009.

O protocolo Modbus disponível no inversor pode ser configurado para trabalhar no modo ASCII ou RTU. No código ASCII cada 8-bit é correspondente a um caractere ASCII, por exemplo, (36H) corresponde ao caractere ‘6’ e (34H) corresponde ao caractere ‘4’. No código RTU os parâmetros seriam transmitidos em valores hexadecimais. O frame de comunicação de dados pode ser visto na Figura 69.

Figura 69 – Frame de comunicação de dados.

STX	ADR1	ADR0	CMD1	CMD0	0	1	N-1	N	ETX	CHK1	CHK0
02H	Address		CMD		Data characters				03H	Check Sum		

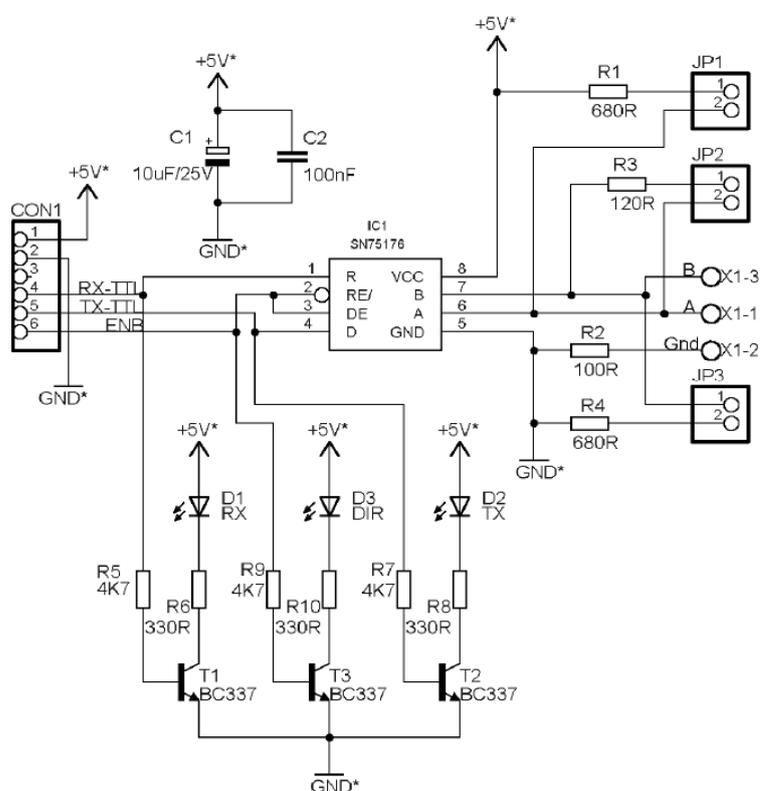
Fonte: Delta, Ind.

Através do protocolo serial o sistema será controlado remotamente através da unidade sem fio conectada à casa de bombas. Esta mesma unidade será responsável pelo

monitoramento dos sensores de vazão, nível da caixa de decantação, pressão, temperatura, tensão e corrente da motobomba.

A implementação da camada física da conexão RS-485 foi realizada utilizando o CI SN75176 transceiver bidirecional projetado para barramentos diferenciais multipontos. Na Figura 69 é apresentado o esquemático do circuito de conexão do barramento ModBus *Full-Duplex*.

Figura 70 – Diagrama elétrico de conexão do barramento ModBus.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os testes de bancada foram realizados com as rotinas embarcadas em um microcontrolador de 8 bits, especificamente o PIC16F677a com um clock de 20 MHz, conectado ao CI SN75176 através dos pinos de I/O, B7 e B6. A placa transceiver foi conectada ao inversor através de um cabo trançado e crimpado com o conector RJ-11 conforme apresentado na Figura 71. A placa de controle de hospedagem das rotinas Modbus contava com um módulo de conexão Bluetooth ligado a sua porta USART. Através deste módulo foi implementada a conexão com um microcomputador.

Para realização dos testes de operação do inversor através da conexão Bluetooth foi desenvolvida uma interface simplificada em Delphi com os campos e comandos básicos de operação do inversor.

Figura 71 - Teste de controle do inversor com o protocolo Modbus.



Fonte: Elaborada pelo autor

4.7. Sensor Capacitivo I2C

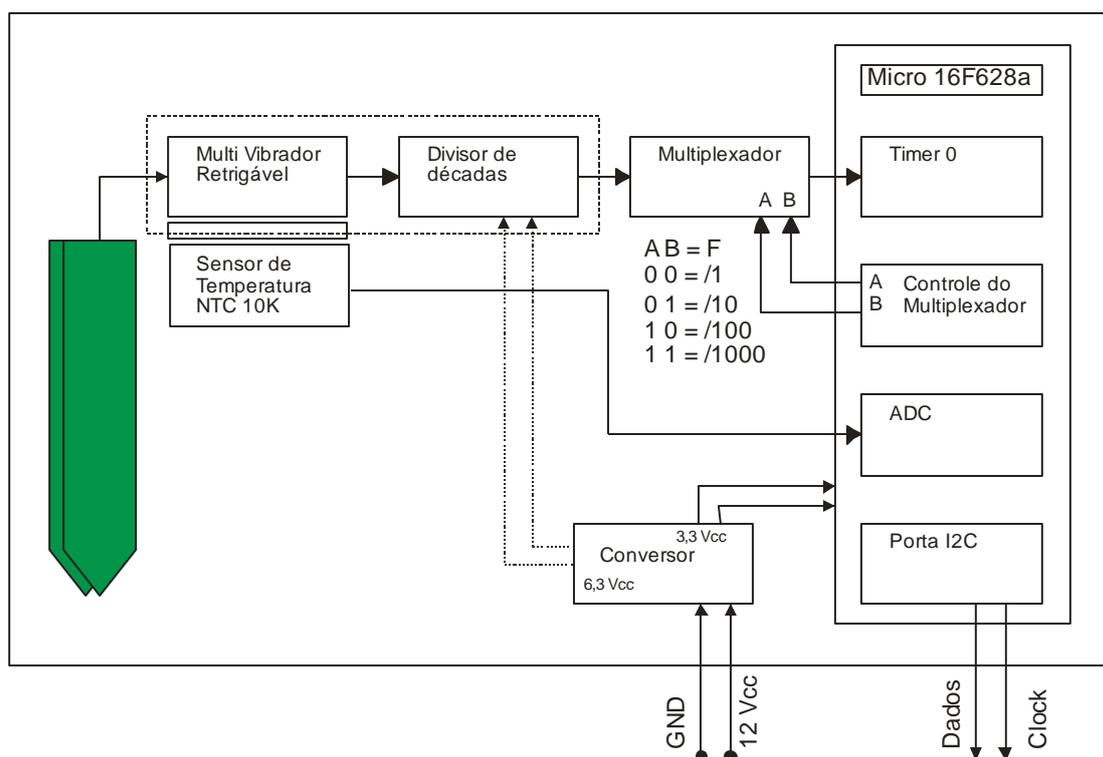
Um microcontrolador pode fazer várias amostragens por segundo em um sensor conectado aos seus pinos de entrada, executando o seu processamento normal dentro de um programa de aquisição de dados. O número de sensores pode variar de algumas unidades a centenas, expandindo demasiadamente as dimensões do hardware, tornando também complexa, a tarefa de administração dos vários sinais de entrada dos sensores utilizados.

A exemplo de outros sensores disponíveis comercialmente foi desenvolvida durante este trabalho, a camada de comunicação serial para o sensor capacitivo de umidade do solo. Conforme foi apresentado nos tópicos anteriores, o sensor capacitivo gera como sinal de resposta uma onda digital modulada em frequência. O sinal é transmitido por uma linha guia, ficando sujeito à depreciação eletromagnética do meio utilizado. Atenuação da amplitude do sinal, defasagens capacitivas e ruídos externos são alguns dos problemas que devem ser contornados com limitações impostas ao comprimento do cabo e suas características de isolamento. Segundo Cruz (2007), testes de comprimento dos cabos em função das leituras realizadas com um freqüencímetro digital, revelaram que a equação característica potencial

que melhor identifica os dados reais de respostas dos sensores capacitivos FDR sofriam depreciação na medida que o comprimento do cabo ultrapassava 1,5 metros.

O objetivo desta etapa foi embarcar, no circuito do sensor capacitivo, um protocolo de comunicação robusto e de uso geral, que garanta maior estabilidade para o envio das leituras realizadas. O desenvolvimento deste bloco inclui também recursos de tratamento do sinal e calibração dinâmica dos parâmetros de medição. A Figura 72 apresenta o diagrama em blocos do sensor capacitivo I2C. O bloco Multi Vibrador é o componente gerador do sinal oscilador, sua frequência é definida pela constante RC da capacitância formada entre suas placas e uma resistência de valor constante. O divisor de década é utilizado para o tratamento do sinal, dividindo a frequência gerada para atender os limites dos instrumentos de medida, o multiplexador define a escala de divisão do contador de décadas. O microcontrolador é o componente principal desta proposta, por ser o responsável por hospedar o protocolo e leitura dos sinais, as funções de compensação e calibração do sensor.

Figura 72 – Diagrama do sensor I2C em blocos.

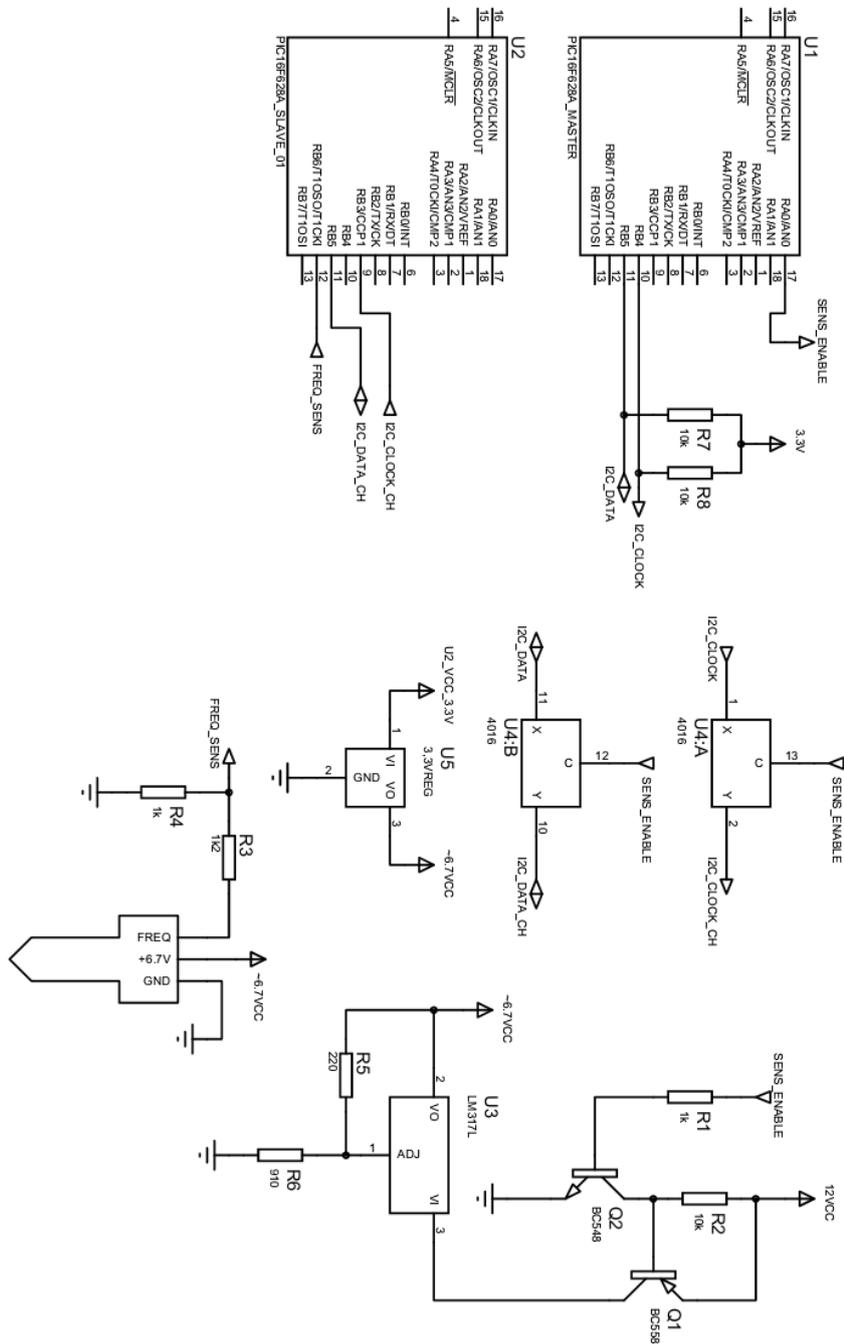


Fonte: Elaborada pelo autor.

O desenvolvimento do sensor contou com as etapas de modelagem, simulação e prototipagem. O hardware foi modelado e simulado no ambiente ISIS do Proteus, emulando

o protocolo em microcontroladores de oito bits da microchip, o PIC18F4550 de 40 pinos e o PIC16F628a de 18 pinos. Na Figura 73 observa-se o esquemático simplificado para simulação. A conversão CC-CC é feita em duas etapas, a primeira, utilizando o CI LM317L, regula a tensão de alimentação do sensor em aproximadamente 6,7 Volts, usada para a alimentação do circuito analógico do sensor de umidade. Na segunda etapa, os 6,7 Volts passam por mais um bloco de regulação de tensão, o regulador LP2950 para uma saída de 3,3 volts, tensão na qual o microcontrolador irá trabalhar por conta da compatibilidade com a tensão do barramento PC.

Figura 73 – Diagrama esquemático do Sensor Capacitivo I2C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

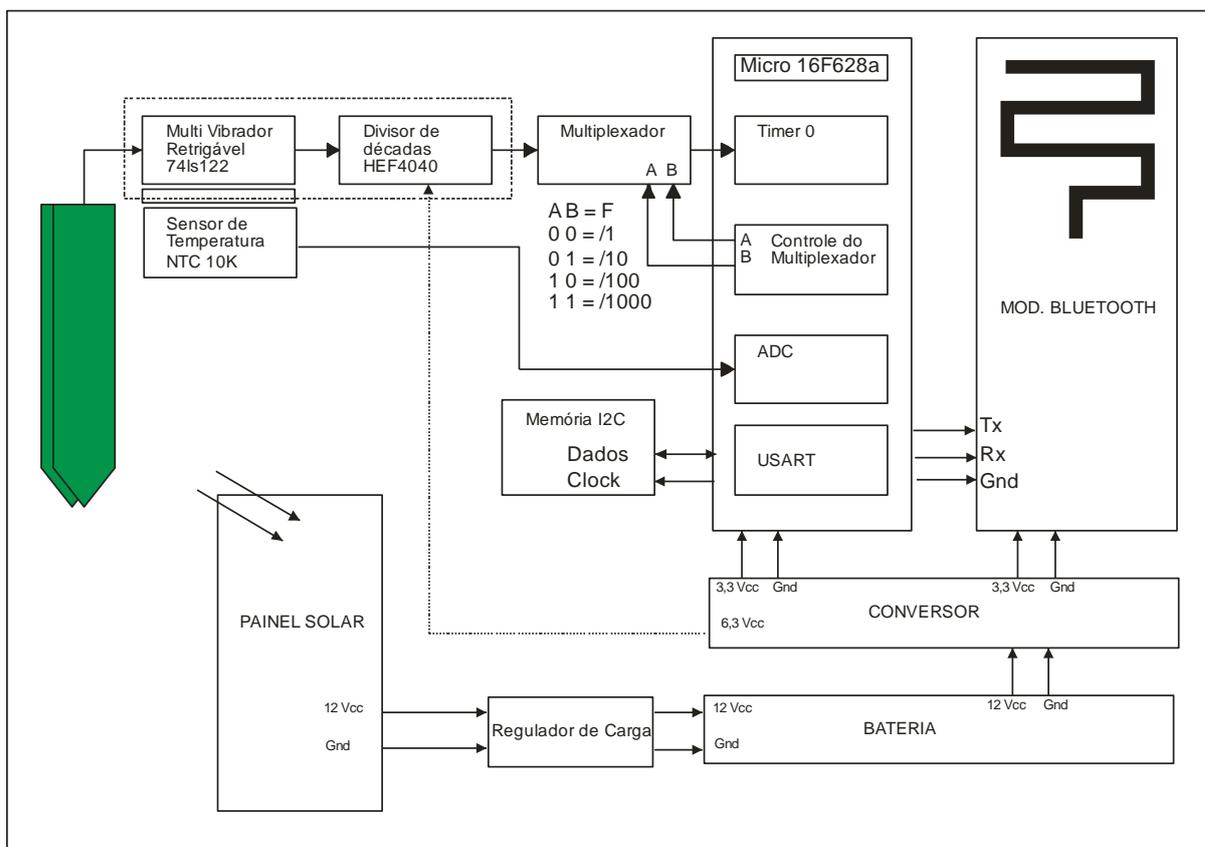
4.8. Sensor Capacitivo de Umidade do solo Bluetooth

O padrão de comunicação Bluetooth aponta como uma solução de baixo custo para o monitoramento e controle de pequenas áreas irrigadas, tais como hortas, jardins ou pequenas áreas experimentais. A continuidade do trabalho em torno das utilizações do sensor de umidade capacitivo propõe este subproduto, agregando a interatividade do protocolo Bluetooth, recurso atualmente encontrado em uma série de dispositivos sem fios utilizados em ambientes domésticos e profissionais.

O diagrama apresentado na Figura 74 mostra os blocos que constituem o sensor capacitivo Bluetooth. A princípio, segue a mesma plataforma do sensor I2C, com a adição dos blocos de alimentação formados pela célula solar e o conversor de carga da bateria. Além desses, é incluído também um módulo transceptor Bluetooth conectado ao microcontrolador através da porta serial USART.

O conceito do protótipo visa a autonomia de energia garantida por painéis solares de potência inferior a 5W. Os sensores podem ser operados nas formas automática e semi-automática. Na forma automática o sensor é configurado para funcionar como um *data-logger*, sendo definida, através de uma interface hospedada em um microcomputador ou dispositivo móvel android, o intervalo de realização das leituras de umidade. O operador deve considerar na definição da frequência a capacidade de manutenção da carga na bateria e a capacidade de armazenamento na memória do sensor. A memória pode ser expandida com o uso de uma memória serial I2C ligada ao microcontrolador do sensor. O consumo no modo automático intercala intervalos de leitura da umidade, intervalos de baixo consumo no *sleep-mode* com intervalos de escuta do módulo transceptor. Neste modo de operação pode-se obter maiores detalhes sobre o comportamento hídrico do solo a um maior custo com memórias e baterias. No modo semi-automático, o módulo executará as leituras de umidade somente nos instantes requisitados pelo operador. Neste caso, o interesse de monitoramento está centrado na umidade instantânea do solo para fins, por exemplo, de calibração do controlador automático de irrigação que venha a ser utilizado. Operando no modo semi-automático, as leituras realizadas não são armazenadas na memória e os estados de operação do sensor limitam-se a intercalar os modos *sleep* e escuta do transceptor, realizando as leituras somente quando requisitadas pelo usuário através de sua interface.

Figura 74 – Diagrama em bloco do sensor de umidade Bluetooth.

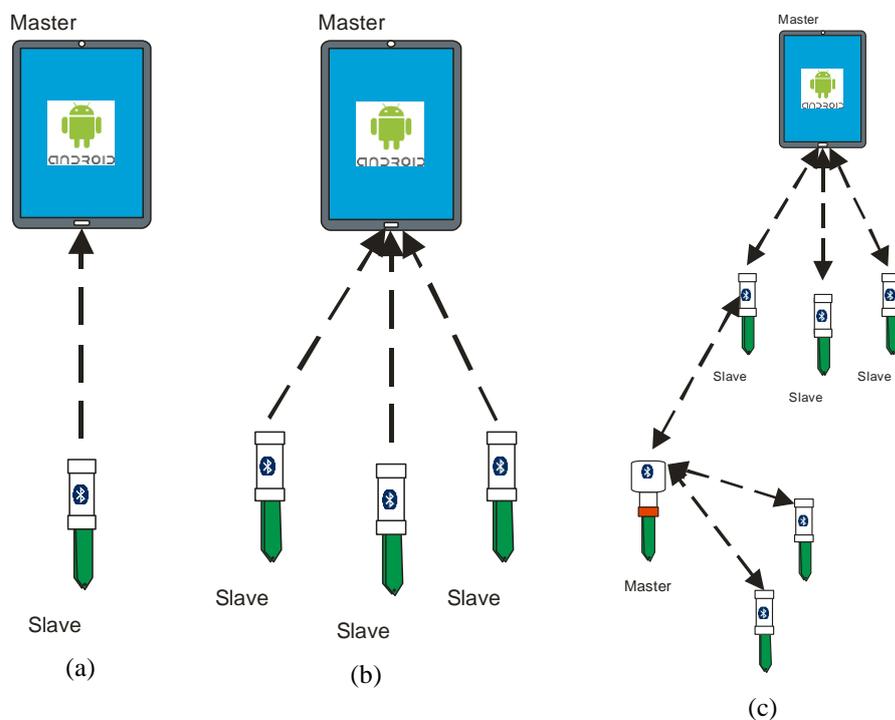


Fonte: Elaborada pelo autor.

O protocolo Bluetooth permite a montagem rápida de algumas topologias de rede. Na Figura 75 são apresentadas algumas possibilidades de distribuição dos sensores e sua operação. O exemplo trata no caso (a) situação em que o usuário necessita de somente um módulo sensor para medidas bem pontuais. O caso (b) apresenta a possibilidade de vários sensores distribuídos dentro de uma área de monitoramento administrados de forma individual, tendo como módulo mestre o dispositivo portador de uma interface de monitoramento. Neste caso as distâncias dos módulos são definidas pela categoria dos transceptores Bluetooth, utilizados nos módulos sensores e computador supervisor. O caso (c) apresenta uma topologia mais abrangente, na qual, módulos sensores assumem a propriedade de mestre em sub-células que podem ter até oito módulos sensores dedicados. Neste caso, os módulos *master* podem ser configurados como nodos concentradores, armazenando as leituras realizadas pelos nodos secundários, reportando ao nodo central (dispositivo com a interface supervisora) o relatório das medidas tomadas em sua célula (*pico-net*). Este último exemplo

demonstra a capacidade de cobertura de uma rede de sensores Bluetooth, tendo como parâmetro de densidade e alcance a classe dos transceptores instalados nos dispositivos.

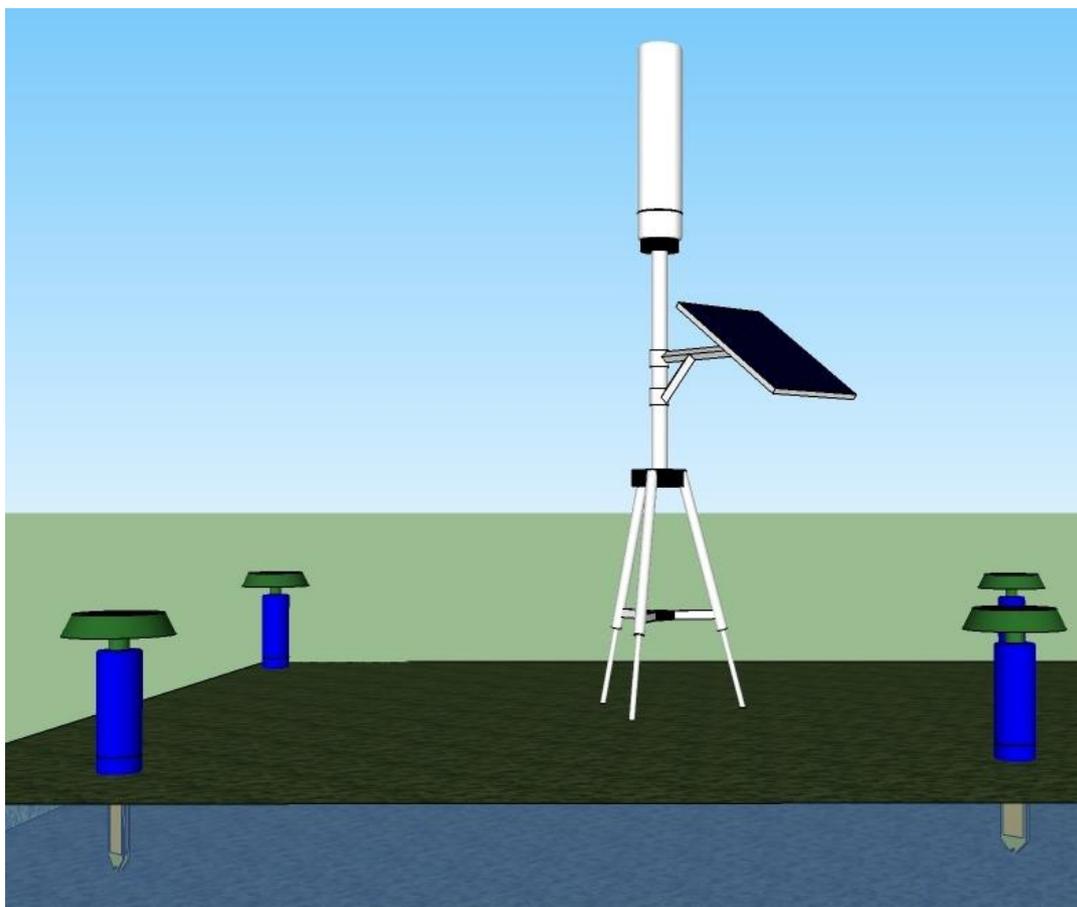
Figura 75 –Topologias de Redes de Bluetooth.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A inclusão do protocolo Bluetooth na rede de sensores permite alcançar uma maior densidade de informações em pequenas áreas, com menor potência de consumo e custo. Na Figura 76 é apresentada a versão ilustrativa da proposta de integração dos sensores capacitivos aos nodos sensores da rede, reduzindo ainda mais a necessidade de cabos e podendo atingir uma densidade de até oito sensores em uma área de 314 a 3140 m² dependendo da classe dos transceptores envolvidos.

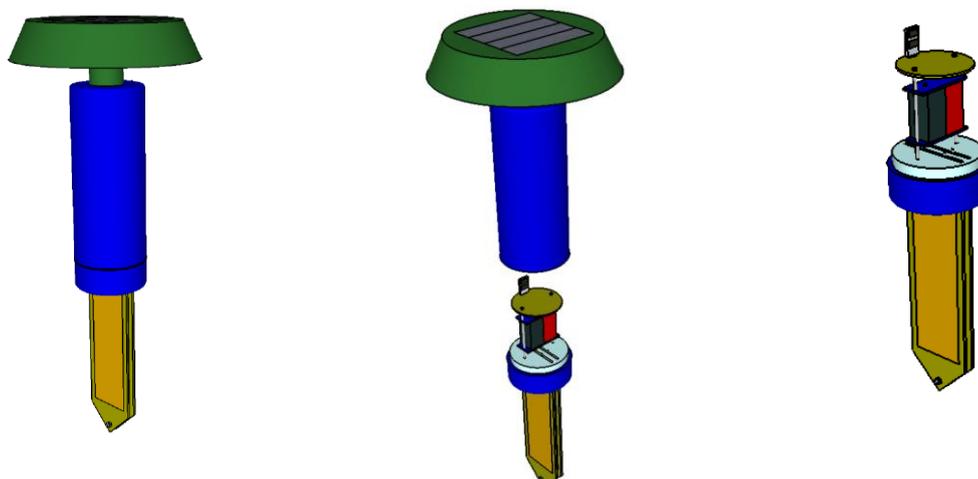
Figura 76 – Implantação de uma rede de sensores de umidade do solo via Bluetooth.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A confecção e prototipagem do sensor Bluetooth é apresentada na Figura 77. A ilustração apresenta a ideia de concepção dos módulos em tubos hidráulicos de PVC, um material já utilizado para o acondicionamento de outros módulos da rede. As dimensões podem fugir a escala apresentada, para atender aos casos em que a potência dos transceptores exija células solares e baterias maiores. Outra variação nas dimensões do módulo refere-se ao comprimento do corpo da unidade para permitir que as placas de medida do sensor atinjam maiores profundidades no solo monitorado.

Figura 77 – Protótipo do sensor Bluetooth.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.9. Módulo de Interface Ethernet

A Ethernet tem se tornado uma ferramenta de grande alcance nos últimos anos, atingindo o mundo dos sistemas embarcados, tendo nos celulares e *smartphones* os maiores ícones desse avanço. Outra aplicação interessante da internet nos sistemas embarcados seria a capacidade de controlar ou observar os dados de algum instrumento remotamente. A grande vantagem do protocolo internet é a facilidade de conexão do sistema com o mundo exterior. O acesso é difundido mundialmente, o que possibilita o controle de dispositivos sem a necessidade de cabos de conexão.

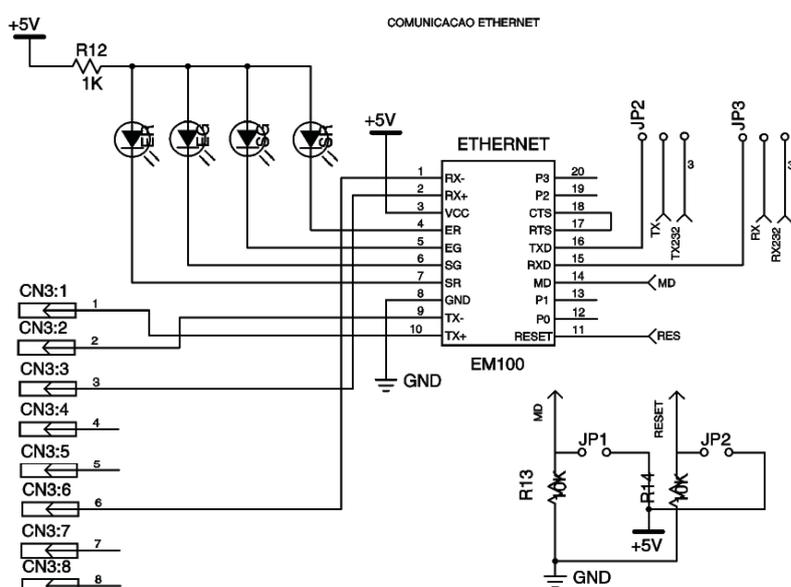
A comunicação IP tem a vantagem de poder ser utilizada tanto na internet quanto na intranet. Assim, podem-se criar VPNs (*Virtual Private Network*) dentro de um segmento produtivo, de modo que certos controles ou medidas de dados estejam disponíveis apenas para alguns usuários da rede e não para todos, como seria em um sistema aberto na internet (MOKARZEL & MOKARZEL, 2004).

No desenvolvimento da comunicação Ethernet foi testada inicialmente a proposta do dispositivo da Tibo, fabricante de soluções de conexão em rede. O componente testado foi o EM100, um módulo de instalação *on-board*, dotado de uma porta de conexão para Ethernet 10BaseT, tendo embutidos em seu encapsulamento transformadores para o casamento das indutâncias de conexão do par trançado tipo RJ45 e uma porta de comunicação serial (CMOS). O módulo pode ser ligado diretamente ao conector RJ45 e sua porta serial

diretamente aos pinos da USART de um microcontrolador, conforme apresentado no esquemático da Figura 78.

No teste inicial foi desenvolvido um sistema capaz de monitorar um dado valor analógico remotamente, através da comunicação IP. O sistema também foi capaz de executar operações de atuação em comandos sinalizados por LED's presentes na placa de desenvolvimento. O módulo utilizado permite que uma comunicação serial seja transformada em comunicação IP facilmente, pois nele já estão implementadas as três primeiras camadas do protocolo da internet (física, enlace e rede). O módulo também pode ser configurado através de uma entrada serial e já conta com um *socket* servidor para os protocolos TCP e UDP. As mensagens transportadas pelo módulo são gerenciadas pelo microcontrolador PIC18F4550.

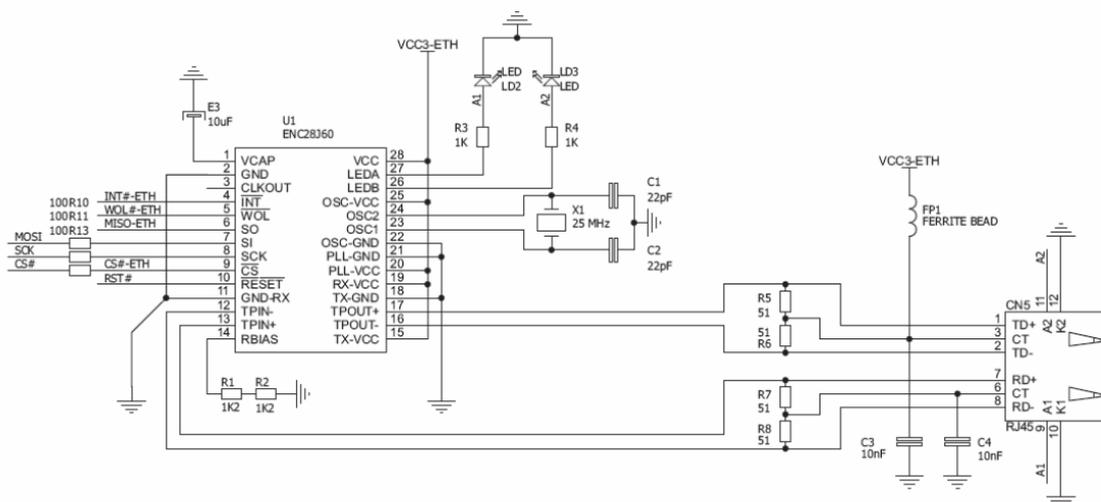
Figura 78 - Módulo de conversão Ethernet para serial RS232 da Tibo modelo EM100.



Fonte: Elaborada pelo autor

Outra conexão avaliada para este trabalho utilizou o CI ENC28J60, componente da Microchip que permite o desenvolvimento de aplicações de comunicações TCP-IP através do bloco de comunicação SPI do microcontrolador conforme apresentado na Figura 79.

Figura 79 - Drive de interface Ethernet, utilizando o CI – ENC28J60 .



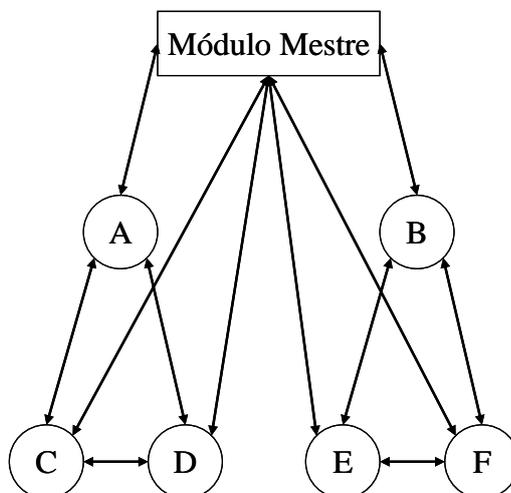
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.0. DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARES

5.1. Rotinas de Comunicação

Nesta etapa foi definida a comunicação entre a estação base e os módulos sensores. O protocolo é descrito da seguinte maneira: o módulo mestre envia uma mensagem a todos os módulos sensores solicitando os dados e esses ao saírem do modo “dormir” e entrar no modo “acordar”, detectam o pedido e enviam os dados para o módulo mestre ou através de um módulo sensor mais próximo por *multihop*. Dessa forma, os dados de todos os módulos sensores são remetidos ao destino final e em seguida analisados. A **Figura 80** apresenta um exemplo de topologia utilizada durante os testes. Os componentes A e B referem-se aos módulos definidos como *multihops*, ou seja, não possuem sensores capacitivos FDR, e as letras C, D, E e F são os módulos sensores que coletam os dados do lugar monitorado e que também podem realizar a função *multihop*. Os módulos sensores somente enviam os dados diretamente para a estação base quando as condições do raio de transmissão e a cobertura da plantação ainda são favoráveis, caso contrário, o módulo sensor *multihop* se encarregará desta função, já que o mesmo estará situado em condições mais adequadas.

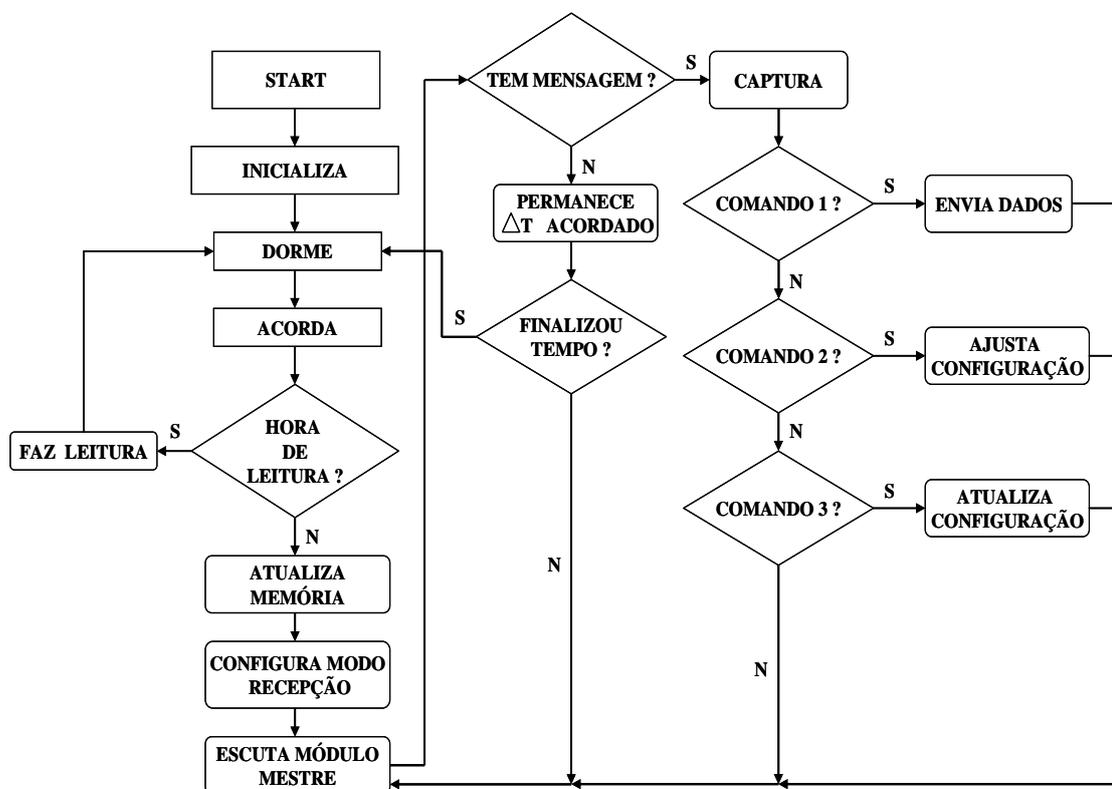
Figura 80 – Desenho esquemático da comunicação dos módulos sensores.



Fonte: Elaborada por CRUZ, 2009.

Duas etapas foram realizadas para definir o processo de envio e recepção do pacote de dados dos módulos sensores. A primeira consiste no controle do transceptor em seus modos de funcionamento transmissão, recepção e *sleep*. Foram desenvolvidas pequenas rotinas de comutação entre seus estados operacionais. Na segunda etapa foi definido o protocolo de comunicação entre o módulo mestre e os módulos sensores. O objetivo foi aplicar processos que considerassem as limitações de energia dos módulos remotos. O desenvolvimento das rotinas dos módulos mestre e sensores foi feito em linguagem C através dos compiladores CCS e Source Boost. A Figura 81 apresenta o fluxograma do programa principal dos módulos sensores.

Figura 81 - Fluxograma do programa de comunicação dos módulos sensores.



Fonte: Elaborada por CRUZ, 2009.

5.2. Drives Controle ModBus

O Modbus é um protocolo de comunicação serial, assíncrono, *half-duplex* baseado em mestre e escravos. Sempre é o mestre quem inicializa a comunicação, seja ela de escrita ou leitura nos registradores do escravo. Cada escravo possui um endereço diferente de zero e distinto dos demais, o endereço zero é utilizado para broadcast, onde todos os escravos recebem a mensagem do mestre. Esse protocolo possui dois tipos de checagem de erro no pacote de dados, o tipo utilizado varia com o tipo de codificação utilizada nos dados.

Os dois tipos de codificação de dados no Modbus são o modo ASCII e o modo RTU. No primeiro modo, os valores em hexadecimal são codificados com caracteres da tabela ASCII. Para cada oito bits a serem transmitidos são necessários dois caracteres que podem ser '1', '2', ..., '9' e 'A', 'B', ..., 'F'. Nesse modo o sistema de verificação de erros é o LRC (*Longitudinal Redundancy Check*). O modo RTU utiliza oito bits para codificar oito bits, ou seja, um valor é transmitido diretamente. Nesse caso utiliza-se o CRC (*Cyclical Redundancy Check*) para detecção de erros.

Neste trabalho optou-se por utilizar o modo de codificação RTU pelo fato deste requerer uma menor quantidade de memória. A Tabela 14 apresenta um exemplo do modelo de pacote utilizado na comunicação Modbus no modo RTU.

Tabela 14 – Modelo do pacote Modbus no modo RTU.

CAMPO	ESPECIFICAÇÃO
INICIO DO PACOTE DE DADOS	Um intervalo de silêncio (nível lógico baixo) por pelo menos 10 ms.
ENDEREÇO	Endereço de comunicação: 8 bits (zero para broadcast).
FUNÇÃO	Código do comando: comando de 8 bits.
DADO (N-1) ATÉ DADO 0	Parâmetros enviados: N x 8 bits, $N \leq 40$ (20 x 16 bits)
CRC CHK ALTO CRC CHK BAIXO	CRC check sum: O check sum de 16 bits consiste em duas partes de 8 bits.
FIM DO PACOTE DE DADOS	Um intervalo de silêncio (nível lógico baixo) por pelo menos 10 ms.

Fonte: elaborada pelo autor.

A motivação do uso do Modbus é a utilização deste protocolo para o controle a distância de um inversor de frequência conectado à motobomba que alimenta a malha hidráulica. O princípio de funcionamento do inversor de frequência é o chaveamento das três fases da rede elétrica de forma a controlar a velocidade de rotação da motobomba. O chaveamento da tensão e o caráter indutivo do motor da bomba são fontes de ruído eletromagnético, o que justificam o uso de filtros isoladores melhor dimensionados e o de protocolos mais robustos.

Os dados necessários para configurar e operar o inversor pela comunicação via RS-485 estão no manual do fabricante. O aparelho utilizado para os testes neste estudo é o VFD-E 3-phase 460V da Delta Electronics Inc.. Antes de conectar o cabo de par trançado ao conector RJ-45 do inversor é necessário configurá-lo para que a fonte de controle principal do mesmo seja a comunicação remota, para isso existem alguns parâmetros fundamentais a serem alterados tais como:

1. Primeira fonte principal de frequência de comando: Configura a fonte que comandará a frequência de operação do inversor, seu código é 02-00 e deve ser mudado para 03 (Comunicação via RS-485).
2. Primeira fonte principal de comando de operação: Configura o modo que o inversor recebe ordens de partida e parada, seu código é 02-01 e deve ser mudado para 03 (Comunicação RS-485 / Tecla Start-Stop habilitada).

3. Endereço do inversor: O inversor fará o papel de escravo no barramento Modbus. Essa configuração possui o código 09-00, os valores válidos variam entre 01 e 254 e deve ser escolhido pelo programador de acordo com a quantidade de dispositivos Modbus na rede.
4. Velocidade de Transmissão: Toda comunicação assíncrona precisa de uma taxa fixa de transmissão, o parâmetro de configuração é o 09-01 e seu valor padrão de fábrica é 9600 bps.
5. Protocolo de comunicação: O protocolo é o Modbus, essa opção configura o modo de codificação, seu código é 09-04, o valor usado foi 03 que configura o protocolo para o modo RTU com um frame de oito bits, sem paridade e dois bits de parada.

A configuração desses parâmetros é suficiente para que um sistema embarcado devidamente programado possa controlar o inversor à distância, desde que sejam utilizadas as condições especificadas e os comandos e endereços corretos. Os próximos parâmetros definem como devem ser enviadas as informações ao inversor. A Tabela 15 apresenta as funções e registradores importantes para o controle do inversor.

Tabela 15 - Funções e registradores para o controle do inversor

Código da função	Descrição
0x03	Ler dado de um registrador
0x06	Escrever em um registrador
0x08	Detecção de loop

Fonte: elaborada pelo autor.

A função de escrita num registrador (0x03) é essencial para o controle remoto do inversor, pois é através dela que as ordens como partida, parada e mudança de frequência serão realizadas. Para concluir os parâmetros necessários de construção do pacote de comunicação é preciso determinar quais dados devem ser enviados. Esses dados são, basicamente, o endereço de um registrador e o argumento que será trabalhado no registrador. A Tabela 16 apresenta dois registradores importantes e a descrição de seus bits.

Tabela 16 – Configuração do registrador de controle.

Registrador	Bits	Descrição
0x2000	Bit 0-1	0b00: Sem função
		0b01: Parar
		0b10: Partir
		0b11: Jog + partir
	Bit 2-3	Reservado
	Bit 4-5	0b00: Sem função
		0b01: Direto
		0b10: Reverso
		0b11: Mudar direção
	Bit 6-7	0b00: Comd. 1ª acel/desc forc.
0b01: Comd. 2ª acel/desc forc.		
Bit 8-15	Reservado	
0x2001	Bit 0-15	Comando de frequência (16 bits)

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da Tabela 16 é possível montar mascaras que representem as ações de controle e configuração desejadas para o inversor.

Máscara de partida:

		Reg. 0x2000															
Bit		15	14	13	12	11	10	09	08	07	06	05	04	03	02	01	00
Valor		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	1	X	X	1	0

Para o comando de partida com direção direta basta escrever o valor 0x0012 no registrador 0x2000.

Máscara de parada:

		Reg. 0x2000															
Bit		15	14	13	12	11	10	09	08	07	06	05	04	03	02	01	00
Valor		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	1	X	X	0	1

Para o comando de parada basta escrever o valor 0x0011 no registrador 0x2000. Como visto na Tabela 16 de registradores, a frequência pode ser alterada ao escrever no registrador 0x2001 (16 bits). O valor a ser escrito depende da velocidade que o operador deseja e pode ser encontrado através de uma relação direta simples.

A velocidade máxima que o inversor pode operar é 600 Hz e o registrador possui 16 bits, logo existe um passo discreto no qual a frequência de operação pode ser incrementada

ou decrementada. Por exemplo, para a velocidade de 132 Hz, o valor hexadecimal de 0x2001 será:

$$600Hz \rightarrow 0xFFFF(65535)$$

$$123Hz \rightarrow N$$

$$N = \frac{123}{600} 65535 = 0x347B(13435)$$

$$f = \frac{13435}{65535} * 600 = 123,003Hz$$

Desse modo a máscara de frequência para a o valor de aproximadamente 123 Hz é:

		Reg. 0x2001														
Bit	15	14	13	12	11	10	09	08	07	06	05	04	03	02	01	00
Valor	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1

Portanto, para alterar a frequência do inversor para 123 Hz basta escrever o valor 0x347B no registrador 0x2001.

O check sum pode ser calculado de uma forma lógica utilizando um algoritmo dedicado, porém uma forma mais eficiente para sistemas embarcados é o uso de valores tabelados. Os códigos em linguagem C escritos durante este trabalho foram feitos no compilador CCS. Este compilador já oferece uma biblioteca para Modbus com valores do CRC e outros processos necessários como funções. Abaixo, seguem trechos do código de teste para o controle do inversor de frequência.

Antes de utilizar as funções descritas é necessário inicializar a porta Modbus, isso é feito com a função “modbus_init”. Somente após chamar essa função será possível realizar as operações com o protocolo Modbus.

O trecho apresentado na Figura 82 configura a comunicação e declara a biblioteca do modbus nativa do compilador, o dispositivo é configurado como mestre, com taxa de 9600 bps, os pinos de transmissão e recepção e o endereço do escravo. É interessante notar que na falta de um hardware dedicado ao RS-485 o problema pode ser contornado atribuindo o pino de recepção ao pino da interrupção externa RB0 com capacidade de gerar interrupção por detecção de borda.

Figura 82 - Configuração da porta Modbus.

```
#include <modbus.c>

#define MODBUS_TYPE MODBUS_TYPE_MASTER
#define MODBUS_SERIAL_RX_BUFFER_SIZE 64
#define MODBUS_SERIAL_BAUD 9600
#define MODBUS_SERIAL_INT_SOURCE MODBUS_INT_EXT
#define MODBUS_SERIAL_TX_PIN PIN_B1
#define MODBUS_SERIAL_RX_PIN PIN_B0
#define MODBUS_SLAVE_ADDRESS 0x01
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

O trecho do código apresentado na Figura 83 define a máscara de alteração de frequência no inversor.

Figura 83 - Configuração da frequência do inversor.

```
exception FREQ(int8 address, int16 freq)
{
    modbus_serial_send_start(address, 0x06);
    modbus_serial_putc(0x20);
    modbus_serial_putc(0x01);

    modbus_serial_putc(make8(freq, 1));
    modbus_serial_putc(make8(freq, 0));
    modbus_serial_send_stop();
    modbus_serial_wait_for_response();
    return modbus_rx.error;
}
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

A função “Modbus_serial_send_start(add, func)” gera automaticamente o sinal de início do pacote, enviando o endereço do escravo e também os parâmetros da função. A função “modbus_serial_putc(byte)” envia um byte pelo barramento, nesse caso, conforme apresentado antes, foram enviados quatro bytes. A função “modbus_serial_send_stop()”, envia os bytes do CRC *check sum* calculados a partir de uma tabela nativa da biblioteca do Modbus e também envia o sinal de término do pacote. Por fim a função “modbus_serial_wait_for_response()” aguarda o escravo retornar se o pacote foi corretamente recebido. A Figura 84 apresenta o argumento a ser escrito no registrador (0x2000), valor constante que irá dar a ordem de partida ao inversor.

Figura 84 - Comando de partida.

```

exception RUN(int8 address)
{
    modbus_serial_send_start(address, 0x06);
    modbus_serial_putc(0x20);
    modbus_serial_putc(0x00);
    modbus_serial_putc(0x00);
    modbus_serial_putc(0x12);
    modbus_serial_send_stop();
    modbus_serial_wait_for_response();
    return modbus_rx.error;
}

```

Fonte: Elaborada pelo autor.

Seguindo o mesmo processo da função de partida a função de parada escreve uma constante no registrador 0x2000, nesse caso o valor 0x0011, conforme apresentado na Figura 85.

Figura 85 - Comando de parada.

```

exception STOP(int8 address)
{
    modbus_serial_send_start(address, 0x06);
    modbus_serial_putc(0x20);
    modbus_serial_putc(0x00);
    modbus_serial_putc(0x00);
    modbus_serial_putc(0x11);
    modbus_serial_send_stop();
    modbus_serial_wait_for_response();
    return modbus_rx.error;
}

```

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.3. Drives I2C

O I2C é um protocolo half-duplex, ou seja, a comunicação é bidirecional sendo que transmissão e recepção não ocorrem de maneira simultânea. Criaram-se duas funções que facilitam a manutenção do código do firmware. Elas são “EN VIA_PACOTE” e “RECEBE_PACOTE”, ambas trabalham com duas variáveis de oito bits. Na função “EN VIA_PACOTE” as variáveis ‘arg1’ e ‘arg2’ são os valores que o sensor I2C mediu e está enviando para o *master* I2C, já a função “RECEBE_PACOTE” possui as variáveis ‘add’ e ‘cmd’ que são o endereço do sensor e o comando que o mesmo deve realizar. O parâmetro

endereço funciona como um dado verificador da integridade da informação recebida, já que os sensores são chaveados para economia de energia.

Na Figura 86 é apresentada uma versão simplificada do código embarcado nos sensores capacitivos de umidade.

Figura 86 – Código simplificado do *drive* I2C.

```
#include <16F628A.h>
#use delay(clock=20000000)
#fuses HS, NOPROTECT, NOWDT, NOBROWNOUT, NOMCLR
#define I2C_DT PIN_B5
#define I2C_CL PIN_B3
#use i2c(slave, sda=I2C_DT, scl=I2C_CL)

void ENVIA_PACOTE(int8 arg1, int8 arg2)
{ i2c_write(arg1);
  i2c_write(arg2); }
void RECEBE_PACOTE(int8& cmd, int8& arg)
{ cmd = i2c_read();
  arg = i2c_read();}
void main()
{ int8 cmd, arg;
  int16 tmr;
  int8 msb, lsb;
  setup_timer_1(T1_EXTERNAL|T1_DIV_BY_2);
  enable_interrupts(GLOBAL|INT_TIMER1);

  while(1)
  { delay_ms(3000);
    RECEBE_PACOTE(cmd, arg);
    switch(cmd)
    { case 0x02 : set_timer1(0);
                delay_ms(20);
                tmr = get_timer1();
                msb = (tmr>>8)&0xFF;
                lsb = (tmr)&0xFF;
                ENVIA_PACOTE(lsb,msb);
                break;
    } } }
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

Outro ponto importante no processo de embarcar o protocolo nos sensores de umidade se refere à capacidade de medir a resposta em frequência do sensor. Isso é feito através do periférico timer1 do microcontrolador PIC16F628a. O timer de 16 bits é configurado para receber um sinal de *clock* externo, definindo um intervalo de tempo dentro do qual a quantidade de pulsos recebidos define a frequência do sinal.

O processo é feito limpando o registrador de contagem do timer1 através da função “set_timer1(0)”, depois disso é dado um intervalo de espera de 20 milissegundos e só então o contador do timer é lido através de “tmr = get_timer1()”. A variável ‘tmr’ é de 16 bits sendo dividida nos seus bytes mais e menos significativos para serem passados, como parâmetros da função “ENVIA_PACOTE”, para a unidade mestre.

Na comunicação I2C apenas o mestre pode começar e encerrar a comunicação então mesmo quando o *master* I2C se prepara para ler algo ele precisa escrever para a unidade dedicada antes. O código do mestre I2C também possui funções “ENVIA_PACOTE” e “RECEBE_PACOTE”.

As rotinas do mestre são integradas a pilha de funções embarcadas na unidade principal do módulo sensor. A Figura 87 apresenta uma rotina simplificada utilizada nos testes de desenvolvimento, onde cada caractere de comando significa uma ordem a ser cumprida. Os marcadores ‘S1’ e ‘S2’ são os pinos de controle do chaveamento e multiplexação de cada sensor, nota-se que o comando “RECEBE_PACOTE” do código do mestre envia previamente a instrução ao escravo de medir a frequência do sensor.

Figura 87 – Rotina de testes do Módulo mestre.

```
#include <16F628A.h>
#use delay(clock=20000000)
#fuses HS, NOPROTECT, NOWDT, NOBROWNOUT, NOMCLR
#define I2C_DT PIN_B5
#define I2C_CL PIN_B4
#use i2c(master, sda=I2C_DT, scl=I2C_CL)
#define RS232_TX PIN_B2
#define RS232_RX PIN_B1
#use rs232(baud = 9600, xmit = RS232_TX, rcv = RS232_RX)
#define S1 PIN_A2
#define S2 PIN_A3

void ENVIA_PACOTE(int8 cmd, int8 arg)
{
  i2c_start();
  i2c_write(cmd);
  i2c_write(arg);
  i2c_stop();
}

void RECEBE_PACOTE(int8& arg1, int8& arg2)
{
  i2c_start();
  i2c_write(0x02);
  i2c_write(0xFF);
  i2c_start();
  arg1 = i2c_read();
  arg2 = i2c_read();
  i2c_stop();
}

void main()
{
  char ordem;
  int8 arg1, arg2;

  output_low(S1);
  output_low(S2);

  while(1)
  {
    ordem = getc();
    switch (ordem)
    {
      case 'a' :
        output_high(S1);
        delay_ms(3500);
        RECEBE_PACOTE(arg1, arg2);
        delay_ms(500);
        printf("%d%c%ca", 3, arg1, arg2);
        delay_ms(100);
    }
  }
}
```

```

        output_low(S1);
        break;

    case 'b' :  output_high(S2);
                delay_ms(3500);
                RECEBE_PACOTE(arg1, arg2);
                delay_ms(500);
                printf("%d%c%cb", 3, arg1, arg2);
                delay_ms(100);
                output_low(S2);
                break;

    case 'c' :  output_high(S1);
                delay_ms(3500);
                RECEBE_PACOTE(arg1, arg2);
                delay_ms(500);
                printf("%d%c%ca", 3, arg1, arg2);
                delay_ms(100);
                output_low(S1);
                delay_ms(500);
                output_high(S2);
                delay_ms(3500);
                RECEBE_PACOTE(arg1, arg2);
                delay_ms(500);
                printf("%d%c%cb", 3, arg1, arg2);
                delay_ms(100);
                output_low(S2);
                break;          }      }

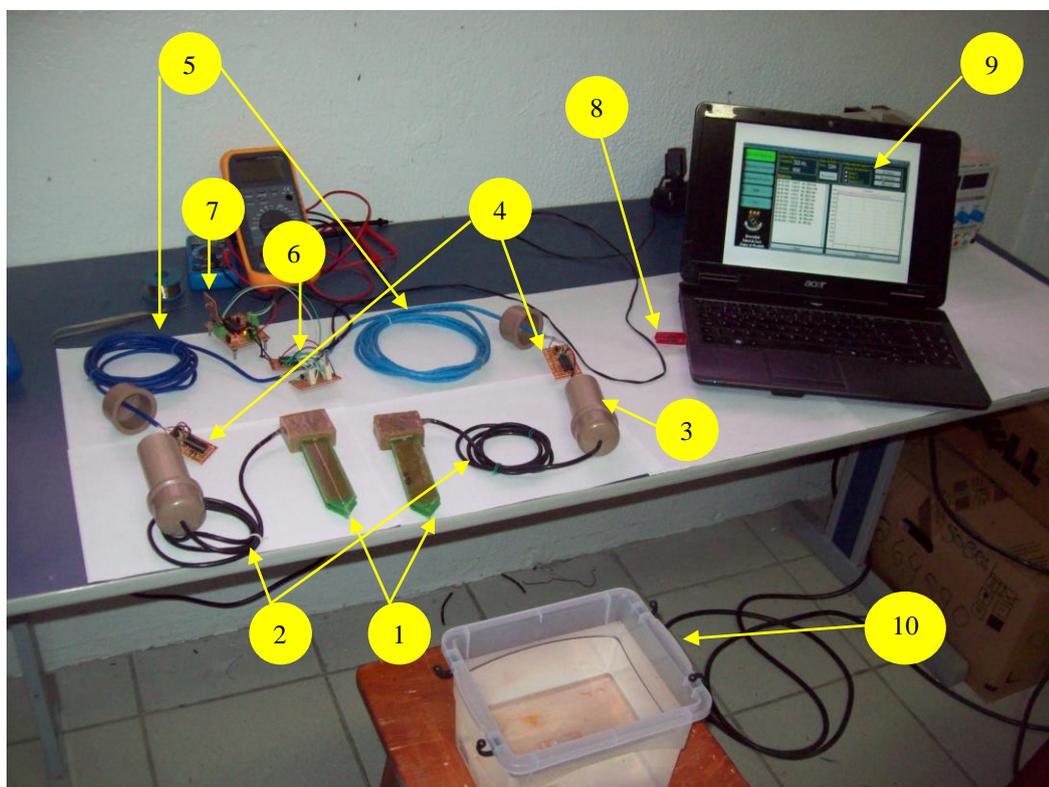
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

O código da unidade mestre I2C foi testado inicialmente em uma comunicação direta com o computador através de um link RS232-Bluetooth. A bancada de testes é apresentada na Figura 88, onde podem ser vistos os seguintes itens:

1. Dois sensores capacitivos de umidade;
2. Fios blindados de 1,5m para conexão convencional;
3. Tubos de PVC para impermeabilização dos microcontroladores;
4. Placas dos microcontroladores, embarcando o protocolo I2C;
5. Fios de par trançando com 5 m para transporte do protocolo I2C;
6. Placa de multiplexação dos sensores com o CI 4016;
7. Placa com micro e módulo Bluetooth, embarcando as rotinas dos módulos mestres;
8. Ponto Bluetooth USB;
9. Interface de testes feita em Delphi;
10. Recipiente com água para testes de imersão dos sensores.

Figura 88 - Bancada de desenvolvimento e testes do sensor I2C.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2. Interfaces Gráficas

As interfaces vêm sendo desenvolvidas em várias linguagens tais com a IDE Builder C++ da Borland, IDE Delphi da empresa Embarcadero, IDE Eclipse para Android e a IDE NetBeans para linguagem Java. O propósito da utilização de vários ambientes teve o objetivo didático de fixação e difusão das novas ferramentas computacionais, no desenvolvimento de aplicações voltadas aos sistemas de irrigação de precisão. A escolha de um ambiente de desenvolvimento deve atender com praticidade as fases de planejamento, preparação, especificação, execução, aplicação, manutenção e reuso de *softwares*. A curva de aprendizagem é outro fator muito importante a ser considerado para as fases de suporte, treinamento e manutenção. Durante o uso e testes dos aplicativos desenvolvidos, procurou-se identificar as dificuldades no projeto das interfaces gráficas e a capacidade de integração dos recursos funcionais da rede de controle em um ambiente de supervisão.

O sistema de supervisão deve ser capaz de processar as informações envolvidas no controle e torná-las visíveis ao operador ou qualquer outro usuário envolvido no processo de manutenção, controle e calibração dos sensores e atuadores. As atividades de controle

durante a supervisão podem contar ainda com o auxílio de mecanismos específicos. Estes sistemas são normalmente utilizados para possibilitar a visualização de iminentes falhas em componentes da planta, antes mesmo, da efetiva ocorrência (JUNIOR e PEREIRA, 2003).

O design das interfaces gráficas traz desafios ao desenvolvimento de ambientes amigáveis. A aplicação deve atender às necessidades dos vários níveis de usuários, dos iniciantes aos mais avançados (MANDEL, 1997). À medida que as interfaces adquirem funcionalidade, os ambientes são submetidos a testes de usabilidade, com os operadores, durante os quais, é avaliada sua intuitividade com o sistema.

A ergonomia do ambiente gráfico deve evitar a ocupação desnecessária do usuário, assumindo de forma automática funções repetitivas no processo de monitoramento e controle. A escolha dos componentes utilizou como critério, observações tais como:

- Agrupamento de campos com funções semelhantes dentro de uma mesma janela;
- Uso de atalhos através de ícone e teclado;
- Uso de campos com valores pré-definidos ou campos auto-completáveis.

A interface procura sempre dar respostas às ações do operador, sinalizando, dentro de intervalos toleráveis, os resultados de seus comandos. O princípio também se aplica ao controle de fluxo de estados que o sistema pode assumir. Os menus e telas foram projetados de forma a oferecer garantias de operabilidade dos periféricos distribuídos.

A aplicação em geral apresenta rapidez nas execuções de suas operações, sofrendo variações no tempo de execução em função da complexidade dos periféricos utilizados. Nos casos de períodos de espera prolongados, em situações como busca de sensores perdidos, processamento de muitos dados, tentativa de conexão com algum dos módulos remotos, dicas visuais devem informar ao operador, através do uso de barras de progresso, que está ocorrendo um processamento, evitando a repetição desnecessária de tentativas que podem gerar conflitos no processamento e danos aos dispositivos periféricos.

5.2.1. Interface Supervisora Desenvolvida no Builder C.

Uma interface de aquisição e controle foi 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.

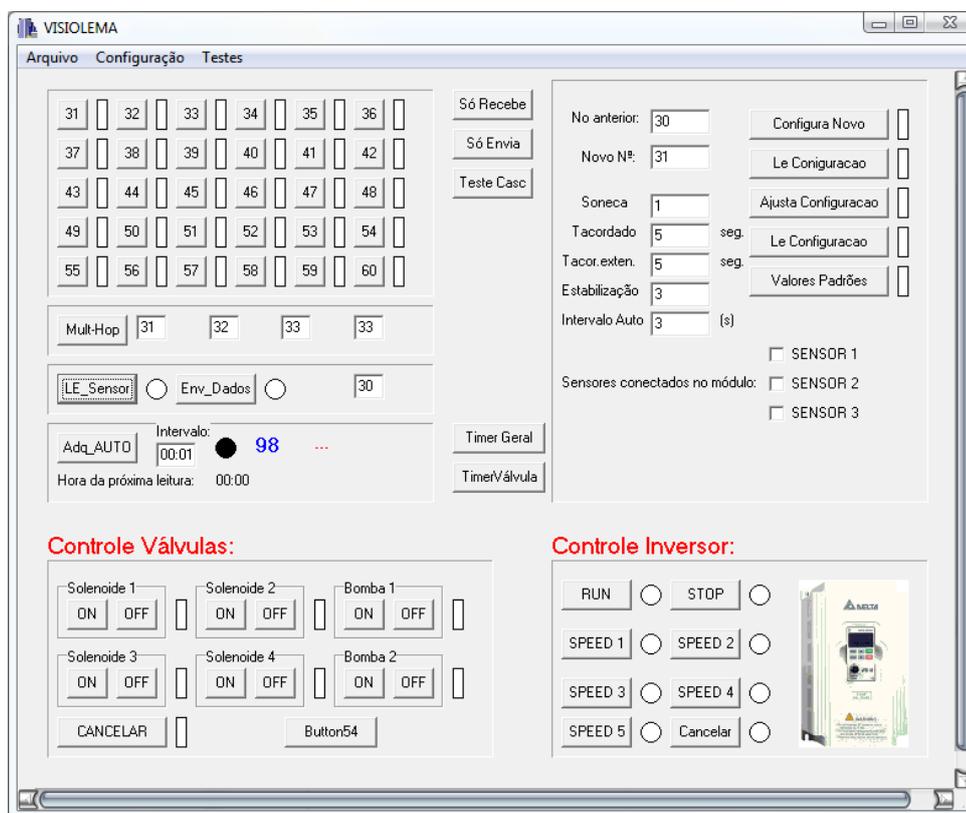
A interface integra as ferramentas de acesso do operador aos recursos de ajuste do sistema para tomada de dados e organização dos módulos. Na Figura 89 é mostrada a tela principal da interface de controle e comunicação dos módulos. O objetivo principal da interface, nesta fase é a de auxiliar na depuração 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 de acordo com o valor definido no campo “intervalo”, de uma sequência de nós sensores cadastrados na interface de monitoramento.

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 “Tacobdado” 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 frequência 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 MULT HOP” foi montado para testar a comunicação dos links em mult-hop, utilizando-se os quatro campos logo acima do botão para montar a sequência de módulos. A sequência é configurada da esquerda para a direita, sendo o primeiro módulo a origem e o último o destino.

A funções se distribuem em uma mesma janela de supervisão contendo em sub-áreas os componentes de administração dos módulos distribuídos na malha de controle, a começar pela configuração da conexão do módulo mestre, determinando o tipo de porta que será utilizado e a velocidade da conexão. Nesta interface, informações como, carga das baterias, temperatura e resposta dos sensores são monitoradas e apresentadas em objetos do tipo Combo Box, EditBox, Label e outros componente gráficos (Figura 89). O sistema conta ainda com interfaces para controle e monitoramento das condições das bombas e válvulas, todas conectadas através de módulos RF.

Figura 89 – Janela de configuração dos módulos sensores.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.2. Interface de Comunicação Ethernet.

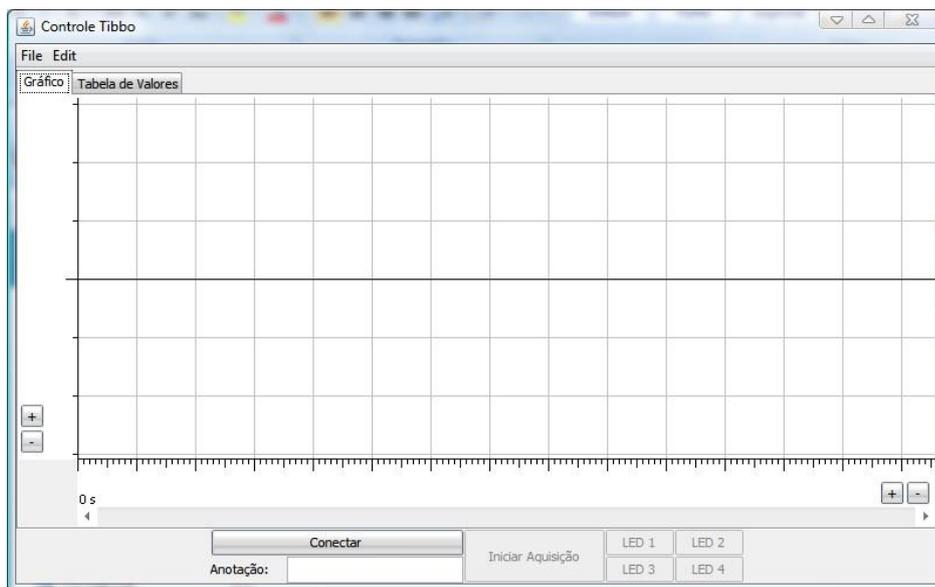
O programa desenvolvido para o teste de comunicação com a estação base foi feito na linguagem Java, que tem por ponto forte a portabilidade de suas aplicações. Toda a comunicação IP foi implementada através de *sockets*, estruturas básicas do IP (*Internet Protocol*). Como o módulo EM100, utilizado inicialmente, cria um *socket* servidor IP quando inicializado, o programa cria um *socket* cliente, que deve se conectar a esse servidor. Este *socket* cliente entra em estado de espera, aguardando uma nova mensagem do servidor (o envio dos dados lidos na entrada serial do PIC). Quando essa mensagem é recebida, ela repassa para uma rotina de geração de gráficos, que apresenta os valores recebidos na tela.

O programa consiste em um painel tabulado (Figura 90), que contém o gráfico obtido a partir dos valores recebidos pela execução do aplicativo cliente. Na outra aba, o painel dispõe de uma tabela formada a partir dos valores adquiridos, bem como o horário e data da aquisição e as anotações feitas em certos instantes de tempo.

No menu inferior constam as opções de controle do módulo, o botão “conectar” realiza a conexão entre a estação base e o módulo. O botão “Iniciar Aquisição” inicia a aquisição e plotagem dos dados. Os botões LED 1 ao LED 4 representam possíveis comandos de controles adotados no desenvolvimento do projeto, os quais quando pressionados, enviam mensagens predefinidas no protocolo da camada de aplicação, correspondente à função de um respectivo atuador. Por fim, a caixa de texto “Anotação” pode ser utilizada para inserir observações em determinados pontos do tempo, muito útil para comentar o comportamento do gráfico observado.

No menu “File” do programa, se encontra uma opção para salvar um LOG com os valores lidos, assim como os outros dados pertinentes à observação (data, hora e anotações). O menu “Edit” possui a opção de modificar o IP ao qual o programa irá se conectar, o que pode ser útil quando se tem vários módulos espalhados por uma rede, ou mesmo quando se necessita de um IP diferente para um novo módulo.

Figura 90 – Interface Java de comunicação Ethernet.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.3. Interface Supervisora Desenvolvida em Delphi.

O Delphi é uma IDE (*Integrated Development Environment*) de programação que utiliza a linguagem de programação homônima que deriva da linguagem Pascal orientada a objetos. Essa plataforma é de uso em sistemas Windows, não importando o tipo do

processador. Originalmente suportada pela empresa Borland, hoje esse *software* pertence e é suportado pela empresa Embarcadero.

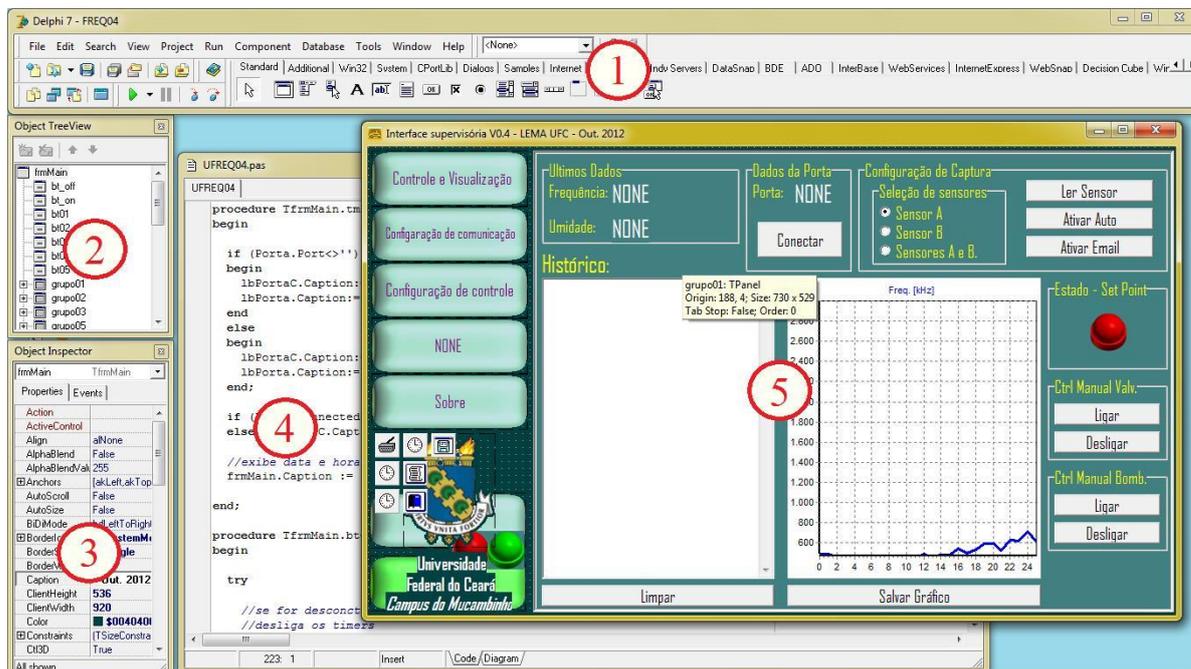
Uma ferramenta profissional consolidada entre os desenvolvedores de *softwares*, o Delphi auxilia no gerenciamento e finalização de projetos, consolidando-se como uma excelente opção para a criação de programas, de maneira rápida e confiável.

O sistema de monitoramento e controle de uma malha hidráulica aqui abordada necessita de uma interface IHM capaz de tratar com todas as necessidades requeridas em uma ferramenta de controle moderno. Tal sistema deve ser capaz de gerenciar a criação de novos pontos na rede, logo é necessária uma forma intuitiva de adicionar e configurar tais componentes. A interface deve expor de forma clara os dados adquiridos durante os períodos de monitoramento da malha e a integridade funcional dos dispositivos atuadores. Ferramentas que exponham dados de forma gráfica podem mostrar a informação de uma forma complementar à catalogação dos dados em planilhas. E a capacidade de empregar diversos tipos de controles com uma fácil configuração de seus parâmetros também é indispensável, assim devem ser utilizados campos que sejam facilmente editáveis.

Além dessas necessidades convencionais existem necessidades técnicas como o suporte a vários tipos de protocolos de comunicação, como o RS232, o TCP/IP, o SMTP (*Simple Mail Transfer Protocol*) dentre outros. Todos esses quesitos devem ser alcançados sem abrir mão da leveza e baixa exigência de hardware, justificando a utilização do Delphi, já que o mesmo abrange todos os requisitos.

Na Figura 91 observa-se o visual da IDE, nela podemos ver os principais itens de gerenciamento e criação de um projeto.

Figura 91 - Ambiente de desenvolvimento do Delphi.



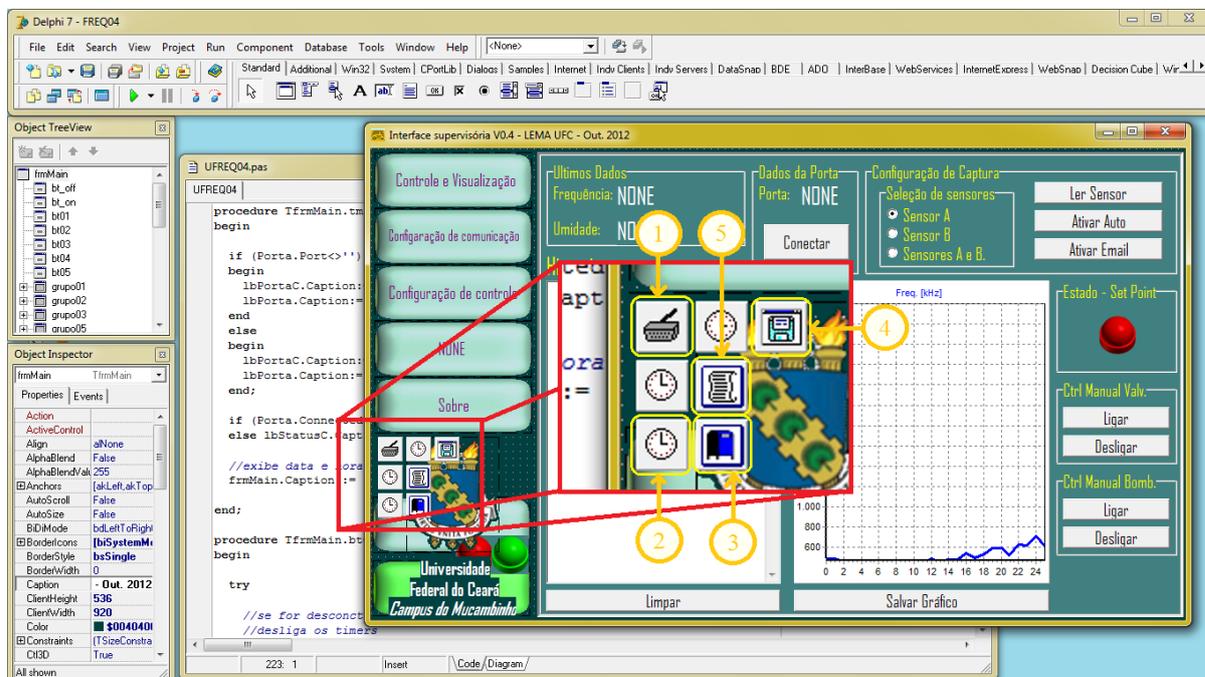
Fonte: Elaborada pelo autor.

A barra de componentes (1) gerencia todos os componentes utilizáveis em uma aplicação. As várias abas que a compõem separam os componentes por tipo e finalidades. Acima desta barra ficam ferramentas de compilação e depuração. O Object TreeView (2) exibe todos os componentes que pertencem ao projeto, inclusive o formulário pai da aplicação. O Object Inspector (3) permite alterar propriedades e configurar eventos e ações do componente em foco. O code editor (4) permite a edição e digitação de códigos escritos em Delphi (Object Pascal modificado) e trechos em assembly que controlam as funcionalidades e relações entre os componentes que pertencem ao projeto. Por fim tem-se o formulário principal ou formulário pai (5) e todos os componentes criados sobre este componente herdam características suas dependendo da correlação entre suas classes.

O processo de criação do *software* da interface começou com a escolha de um ambiente que permitisse, ao usuário, uma visão geral do sistema. A partir desta premissa definem-se os melhores componentes a serem utilizados no desenvolvimento da interface. De maneira geral, foram utilizados componentes de entrada e saída padrão, tais como, buttons e edits. Porém, existem componentes mais complexos que são fundamentais para uma interação mais intuitiva do usuário com o sistema. Como exemplo, o uso de componentes para produção de gráficos, e outros componentes responsáveis pela conexão com as portas seriais

do computador, sejam elas físicas ou emuladas. Na Figura 92 são apresentados alguns desses componentes.

Figura 92 - Componentes utilizados no desenvolvimento da interface supervisória.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Um dos componentes mais utilizados é o *ComPort* (1), o mesmo permite a conexão e o gerenciamento das portas seriais, sejam elas físicas ou emuladas. O próprio *ComPort* cria um objeto em forma de janela que exhibe todas as configurações das portas instaladas no computador. O *Timer* (2) é o componente que permite temporizar certas ações dentro do programa, como por exemplo o “Ativar Auto”, que através de uma configuração prévia de seus parâmetros, pode efetuar a ação de leitura do sensor automaticamente. O *IdSMTP* (3) é um componente pertencente ao pacote *Indy*, este permite o envio de emails completos depois de corretamente configurado a uma conta de email, utilizando o protocolo SMTP. Um protocolo padrão para envio de e-mails através da Internet. Relativamente simples esse protocolo é baseado em texto, onde um ou vários destinatários de uma mensagem são especificados para o envio de mensagens. O *SaveDialog* (4) é um componente que permite o gerenciamento correto no momento de salvar um arquivo. A finalidade deste objeto na interface é configurar corretamente o local onde os dados adquiridos serão salvos. O componente *IdMessage* (5), também pertencente ao pacote *Indy*, é um objeto de criação de emails. Através deste componente é possível editar e configurar o relatório que será enviado

por email para a equipe de administração do sistema. Este componente permite o envio de uma mensagem para vários destinatários diferentes e também o envio de arquivos em anexo (como a imagem do gráfico plotado e uma tabela de pontos coletados).

O desenvolvimento de interfaces gráficas é uma tarefa que exige o envolvimento de uma equipe multidisciplinar capaz de observar cuidadosamente todos os fatores que possam influenciar a sua usabilidade sem deixar de levar em conta questões de portabilidade e manutenibilidade (MATIAS, 1995).

A interface gráfica do *software* supervisor, vem sendo desenvolvida a partir das experiências observadas nos trabalhos de aplicação da rede de sensores sem fio, em ciclos de cultura de milho e melancia, nos trabalhos de Cruz (2009) e Neto (2010) que utilizaram respectivamente, a interface desenvolvida no Builder C++ para o desenvolvimento de estratégias de manejo da irrigação, através do uso de Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) para monitoramento da umidade e para o monitoramento automático das condições de umidade no campo e definição de estratégias de manejo a nível de distrito. Durante estes trabalhos, novas funcionalidades e componentes foram agregados à interface com o objetivo de facilitar o trabalho e prover maior autonomia ao sistema. Na Figura 93, observa-se o visual da interface.

Figura 93 - Versão mais recente da interface supervisória desenvolvida em Delphi.



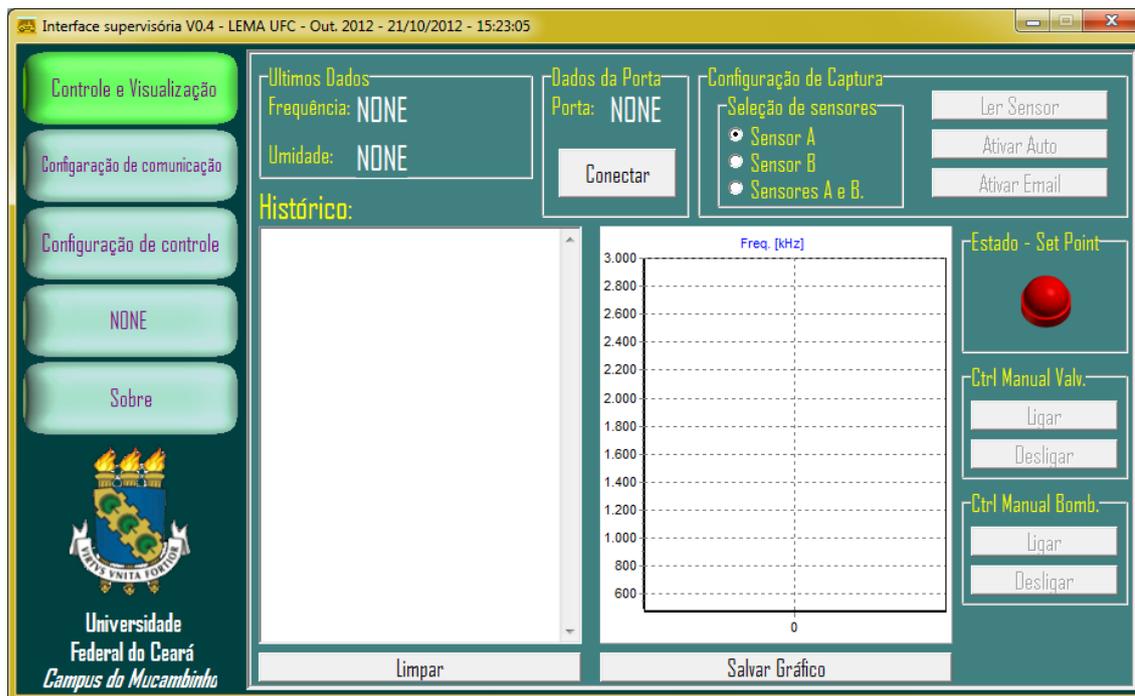
Fonte: Elaborada pelo autor.

A fim de produzir uma interface organizada foi adotado um estilo de painéis que agrupam configurações e componentes de finalidade similares. Os três painéis principais são: painel de “Controle e Visualização”, painel de “Configuração de Comunicação” e painel de “Configuração de Controle”.

O painel de “Controle e Visualização” (Figura 94) é responsável por agrupar as ferramentas que dão ao usuário o acesso ao sistema, permitindo requisitar o envio de dados, atuar sobre o sistema e visualizar e armazenar os dados adquiridos. Os elementos deste painel são:

1. Visualização dos últimos dados: Consiste em “labels” que mostram em caixa alta os últimos dados recebidos, o que evita que o usuário precise olhar o histórico para saber o estado atual do sistema.
2. Dados da Porta: Exibe a porta selecionada para a conexão e possui o botão “Conectar/Desconectar”, que permite iniciar e encerrar a comunicação com a porta serial.
3. Configuração de Captura: Permite selecionar quais sensores serão lidos a cada requisição. O botão “Ler Sensor” permite requisitar uma leitura manualmente, o botão “Ativar Auto” permite acionar um timer configurável que irá requisitar as leituras automaticamente. Por último, há o botão “Ativar Email”, que aciona um timer configurável para o envio periódico de relatórios para o email de contatos gravados em uma lista.
4. Histórico: é uma caixa de texto de várias linhas que registra os dados recebidos. Os dados são armazenados em forma de texto e é dividido em colunas com valores como data, hora, identificação do sensor e dado recebido. Os dados aqui armazenados podem ser exportados posteriormente na forma de um arquivo de texto.
5. Gráfico: Esse componente plota os dados adquiridos à medida que são recebidos. Essa ferramenta permite uma análise rápida dos dados recebidos.
6. Estado do Set Point: É um indicador se o controle ativo foi disparado ou não sendo mais um indicador intuitivo dos dados.
7. Controle Manual da Válvula: Permite enviar comandos diretamente para o controlador de uma válvula instalada no sistema.
8. Controle Manual da Bomba: Permite enviar comandos diretamente para o controlador de uma bomba de água instalada no sistema.

Figura 94 - Painel de Controle e Visualização.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O segundo, dos três painéis mais importantes do sistema supervisório, é o painel de “Configuração de Comunicação”, é neste que as opções de configuração da comunicação serial e do envio de relatório por email é feita. Os elementos que compõem esse painel são:

1. Configurações da Porta: Exibe algumas configurações escolhidas, como status da comunicação e nome da porta escolhida. Possui o botão “Configurar”. Ao clicar nesse elemento uma nova janela será aberta exibindo propriedades editáveis da porta serial.
2. Configurações de Email: Este espaço possui configurações referentes ao envio de dados por email. Os dados serão enviados na forma de um arquivo de texto com os valores tabelados e uma imagem do gráfico plotado. Os controles pertencentes a este espaço estão disposto na Tabela 17.

Tabela 17 – Controles de Configuração para envio de Email

Controle	Descrição
Intervalo:	Esse espaço configura o intervalo de ação do timer responsável por enviar arquivos para o email dos contatos listados.
Host:	Endereço do servidor SMTP cuja conta do cliente pertence. É a esse servidor que o componente de envio de email (<i>IdSMTP</i>) irá requisitar os serviços necessários para cumprir o envio de informações.
Porta:	É a porta pela qual o programa irá se conectar ao servidor. Cada servidor SMTP especifica as portas corretas às quais o cliente deve acessar seus serviços, por exemplo, para o servidor do Gmail a porta padrão é a 587.
Cliente:	Conta de usuário em algum servidor de email como Gmail, Yahoo, hotmail ou outros.
Senha:	Senha de acesso à conta, senha atual utilizada pelo usuário para logar na conta.
Lista de Endereços:	Local reservado para listar os endereços de email dos contatos que receberam os dados via e-mail. É importante frisar que não é obrigatório que os contatos tenham conta de e-mail no mesmo servidor da conta de envio, todos os servidores são aceitos. Existe um detalhe acima da Lista de Endereços que mostra quantos contatos estão listados.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O próximo painel a ser comentado é o de “Configuração de Controle”, apresentado na Figura 95. Neste painel foi instalado um conjunto de ferramentas fundamentais para configuração da forma como os dados serão recebidos e tratados.

Figura 95 - Painel de Configurações de Controle .



Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste ambiente são encontradas ferramentas de controle da malha. Os elementos que constituem este painel são:

1. **Parâmetros do Timer (uC)** : Este espaço possui parâmetros fundamentais para a conversão do valor capturado do timer no microcontrolador para um valor de frequência válido. Seus campos são o “Pre-Scaler” e o “Int. de espera (ms)”. Pre-scaler é um valor comum a todo timer de microcontrolador que possui a finalidade de dividir a frequência de entrada, sendo o mesmo necessário para tornar o timer capaz de contar frequências altas. Porém, seu uso requer atenção, pois um valor muito elevado aumenta o passo em que a frequência é lida, diminuindo a resolução das medidas. O tempo de espera é a referência de tempo necessária para a solução da equação da frequência.
2. **Configurações de Captura**: Nesse espaço encontram-se os elementos de configuração do timer de aquisição automática de dados habilitados no painel “Controle e Visualização”. Seus campos são o “Intervalo”, onde é possível definir a frequência em que os dados serão requisitados e o espaço de Conversão, que permite configurar a forma como os dados recebidos serão convertidos, ou seja, se a saída dos dados será apenas em frequência ou já convertida em valores absolutos de umidade.

3. Controle: Alterna entre os diferentes tipos de controle que a interface pode disponibilizar, basta selecionar o método adequado.
4. Set Points: Esse espaço agrupa os parâmetros do controle por Set-Point. Dois grupos de parâmetros são exibidos, a “Referência” que define a forma como serão aplicados os valores de corte, os valores limiares de acionamento e desligamento dos atuadores.
5. PID: Esse espaço agrupa os parâmetros do controle por PID, existem três componentes de texto editáveis onde o usuário pode definir os coeficientes do controle.
6. Rede Neural: Esse espaço permite ao usuário importar um arquivo que contenha a organização e os pesos de uma rede neural previamente treinada para o controle da malha.
7. Fuzzy: Esse espaço permite ao usuário importar um arquivo que contenha os parâmetros do controle de lógica Fuzzy.

5.2.5. Interface Supervisora Desenvolvida para Android.

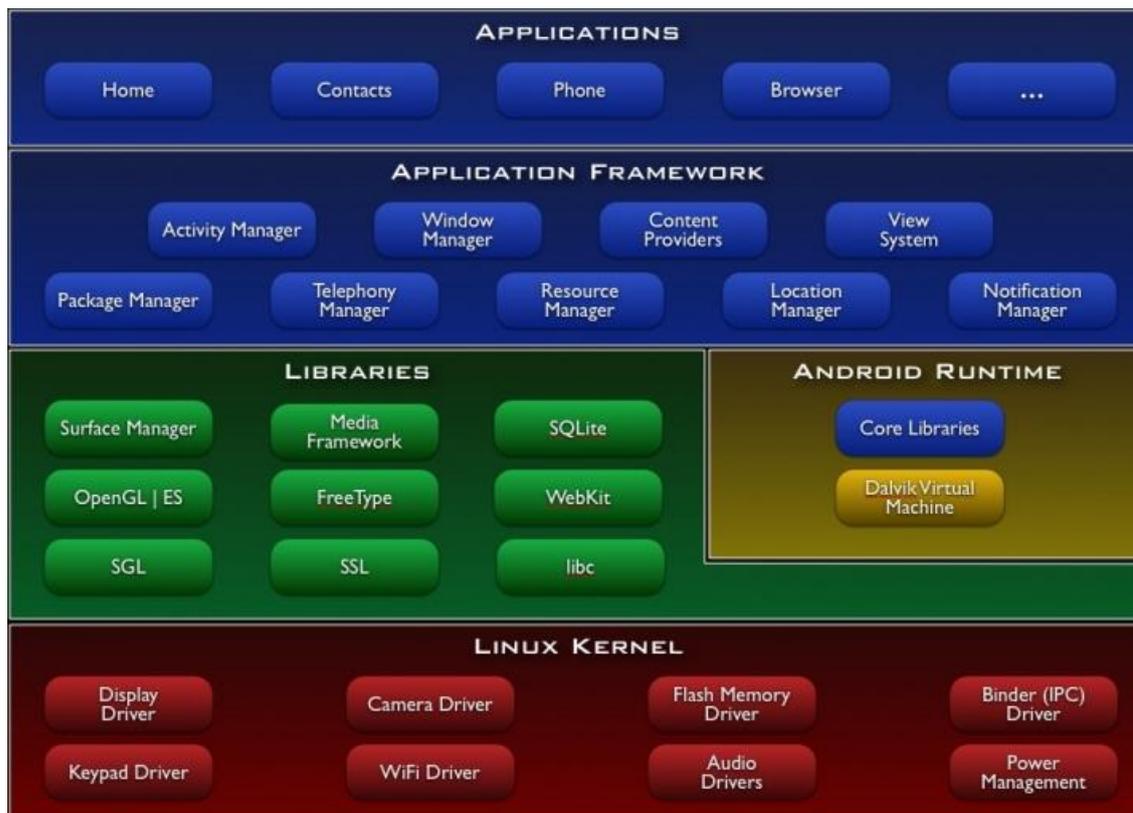
O aplicativo foi desenvolvido na IDE Eclipse, SDK de desenvolvimento para Android com linguagem de programação Java. Bluetooth foi a tecnologia utilizada pela aplicação para a comunicação sem fio.

Inicialmente, para o desenvolvimento da aplicação, foram efetuados testes de comunicação da aplicação com um computador pessoal, utilizando a arquitetura de comunicação cliente-servidor, onde o computador era o servidor e a aplicação enviava comandos pelo enlace Bluetooth entre os dois terminais. Concluída esta fase de teste, foi desenvolvida uma placa de controle com um rádio Bluetooth acoplado, que assumiu a função de servidor enquanto o *smartphone* com a aplicação embarcada era o cliente da arquitetura cliente-servidor. Nesta modelagem a aplicação envia comandos responsáveis pelo acionamento de saídas na placa de controle.

Como resultado deste trabalho, obteve-se a criação de uma aplicação Android que se comunica através do protocolo Bluetooth a uma placa de controle e monitoramento, aplicada aos processos de consulta e testes da rede de sensores e atuadores.

A arquitetura da plataforma android é dividida em cinco partes: Kernel Linux, bibliotecas, ambiente de execução, framework e aplicativos. A estrutura é apresentada na Figura 26.

Figura 96 - Arquitetura Plataforma Android



Fonte: <http://www.devmedia.com.br>

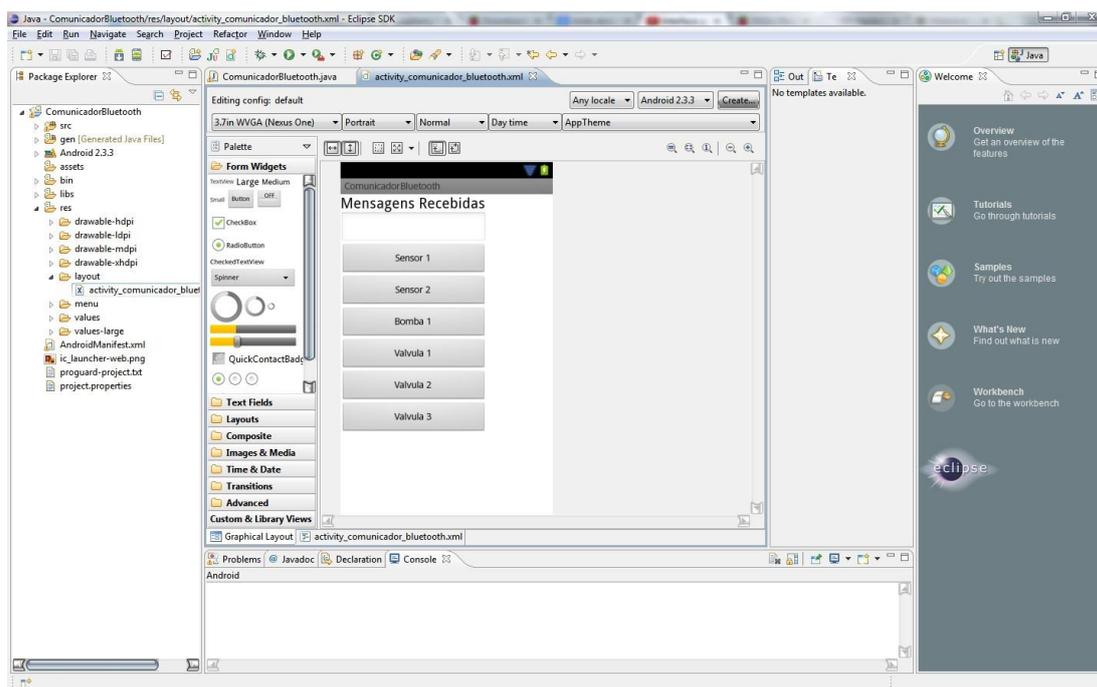
O kernel Linux é responsável pelo gerenciamento dos recursos de memória, segurança e processos nos dispositivos que usam o sistema operacional Android. O kernel atua como uma camada abstrata entre o hardware e o restante da pilha de *software*. Várias alterações foram realizadas no Linux até o sistema atender às características dos dispositivos portáteis, elas incluem a incorporação de novos *drives* ao sistema de gerenciamento de energia *Wake locks* e um sistema para administração criteriosa de processos quando há pouca memória disponível, o *lowmem killer*.

A camada de aplicações é a mais alta da plataforma Android. É onde são encontrados os aplicativos chave para o funcionamento do sistema operacional. Ela também é responsável por executar os programas Java interpretados pela Máquina Virtual Dalvik.

O desenvolvimento da aplicação utilizou a tecnologia Bluetooth para comunicação wireless do dispositivo móvel com os módulos sensores e atuadores distribuídos na malha de controle. A comunicação bluetooth foi trabalhada utilizando a arquitetura cliente servidor entre a aplicação e os transceptores bluetooth acoplados às placas dos módulos e já apresentados no tópico.

O aplicativo Android foi desenvolvido na IDE Eclipse versão JUNO (Figura 97). A IDE disponível para desenvolvimento em diversas linguagens, Java, C/C++, Python, PHP, entre outras. A Hadset Alliance, conjunto de empresas que desenvolvem a plataforma Android, possui um conjunto de ferramentas e plug-ins escritos para esta IDE que auxiliam no desenvolvimento de aplicativos.

Figura 97 – IDE Eclipse verão JUNO.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A SDK (Standard Develop Kit) possui ferramentas para o desenvolvimento de aplicações que administram os periféricos de hardware dos dispositivos móveis nos quais os testes foram realizados. Especificamente para a aplicação descrita nesse trabalho, utilizamos parte dessas ferramentas para trabalhar com o comunicador Bluetooth *on-circuit* aos smartphones Galaxy ACE e Galaxy Duo apresentados na Figura 98 (a) e (b).

Figura 98 – Smartphones utilizados para o desenvolvimento e testes das interfaces.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dispositivos *smart-phones* rodam as versões 2.3 e 4.0 do sistema operacional Android. Para o desenvolvimento da aplicação, foi criada uma conexão cliente-servidor entre o celular e um dispositivo. Nos testes iniciais a simulação utilizou um computador como servidor e o celular como cliente. O primeiro objetivo da simulação foi a troca de mensagens do tipo *String*. Para ser executado no computador foi desenvolvido um código em Java responsável por criar um servidor de comunicação por Bluetooth. Esse código utilizou a biblioteca Bluecove versão 2.1.

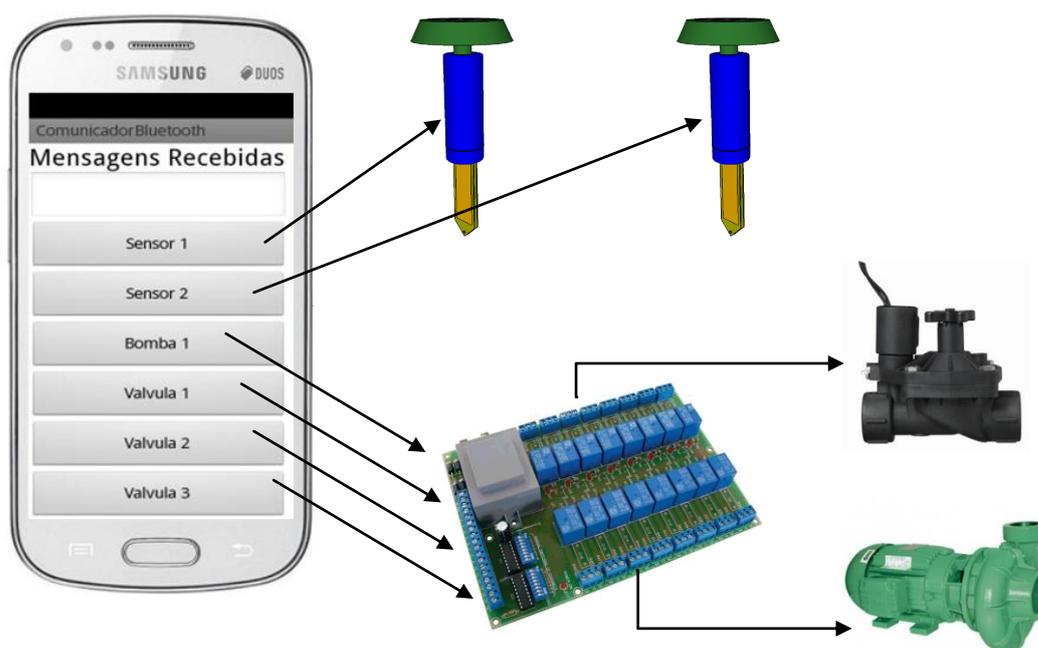
O kit de desenvolvimento instalado na IDE Eclipse possui um emulador Android, que permite que o PC de desenvolvimento teste aplicações diretamente no Computador, sem que haja a necessidade de se possuir um celular que trabalhe com Android. Esse emulador foi útil para o desenvolvimento na etapa de modelagem da interface gráfica, uma vez que esse simulador Android não possui comunicador bluetooth.

O próximo passo do desenvolvimento foi o estabelecimento da comunicação com uma placa microcontrolada portando o módulo Bluetooth da CST Inc. já comentado anteriormente. Os transceptores Bluetooth possuem um ID de serviço associados que a utiliza para identificar o dispositivo a se conectar. Porém, antes o celular precisa ser pareado ao módulo transceptor, através de sua camada de transporte embarcada. A Figura 98 apresenta a interface desenvolvida para os testes de controle de atuadores e leituras de sensores.

Os testes iniciais foram realizados com o dispositivo Galaxy ACE, executando o Android 2.3. Porém, o gerenciamento de Hardware do Android 4.0 se apresentou bem mais robusto para o desenvolvimento baseado em versão mais recente do Android.

A aplicação desenvolvida (Figura 99) exige que o celular esteja pareado com um ou mais módulos transceptores. Após o pareamento a aplicação espera a seleção dos serviços de um dos dispositivos pareados. O usuário pode realizar o controle ou a coleta de informações dos sensores distribuídos em uma área de alcance.

Figura 99 – Interface Android para testes de controle e leitura de sensores.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O desenvolvimento para a plataforma Android baseia-se no conceito de *Activity*, que representa uma tela da aplicação, responsável por gerenciar os serviços do aplicativo. Para essa aplicação foram desenvolvidas duas *Activitys*. A primeira responsável por gerenciar a comunicação, controle e coleta de dados de uma conexão bluetooth. E a segunda *Activity* foi desenvolvida com o objetivo de realizar a configuração da conexão Bluetooth.

A aplicação desenvolvida e compilada gera um arquivo tipo .apk, o executável do sistema operacional Android. Isso permite que a aplicação desenvolvida seja distribuída pela comunidade e operacionalizada pelos setores de interesse.

6.0. RESULTADOS

Neste trabalho foram apresentados a modelagem, implementação e testes das diversas unidades que compõem uma plataforma de automação sem fio para irrigação de precisão. O sistema é constituído de módulos sensores e atuadores remotos distribuídos dentro de uma área agrícola irrigada.

A pesquisa efetuada ao longo do projeto assimilou novas tecnologias para a concepção de ferramentas de suporte aos sistemas de irrigação. A evolução dos trabalhos nesse segmento aponta para um futuro, onde a computação pervasiva atenderá a uma grande gama de serviços no campo. As redes de atuadores e sensores *wireless* são um exemplo desta afirmativa.

O esforço desse projeto resultou no desenvolvimento de uma ferramenta prática para o pesquisador e acessível ao produtor agrícola que deseja investir em tecnologias capazes de lhe garantir maior eficiência na aplicação dos insumos agrícolas.

A construção dos protótipos apresentados, foi capaz de atender às exigências impostas pelo campo, flexibilizando a rápida automação de um sistema de irrigação pressurizado, e servindo com plataforma para aplicação de futuros algoritmos de controle mais eficientes.

7.0. CONCLUSÕES

Na execução desse trabalho foi alcançado o desenvolvimento de uma plataforma para monitoramento e controle de sistemas de irrigação de precisão. O sistema apresentado integrou várias tecnologias de comunicação e automação para a concepção de dispositivos práticos, de fácil operação e rápida instalação, capazes de proporcionar a pesquisadores, técnicos e produtores rurais, ferramentas importantes para o acompanhamento das condições do solo nas áreas cultivadas.

A plataforma proposta possui a maleabilidade necessária para atender vários cenários encontrados no campo, adaptando-se a diferentes áreas e tipos de cultura, proporcionando eficiência e economia na aplicação de insumos agrícolas como água e energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUS, J. S. **Outline for a theory of intelligence**. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, v.21, n.3, p.473-509. 1991.

AXELSON, J. L. **USB Complete: The Developer's Guide, Fourth Edition**, Published by Lakeview Research LLC, 5310. USA. 2009.

AXELSON, J. L.; **USB Complete: The Developer's Guide**. Fourth Edition, Pgs.: 504. Published by Lakeview Research LLC, 5310 Chinook Ln., Madison WI 53704, in 2009.

AZEVEDO, Fernando. M; BRASIL, Lourdes Mattos; OLIVEIRA, Roberto Célio Limão. **Redes Neurais com aplicações em controles e sistemas especialistas**. – Florianópolis: Ed. Bookstore, 2000.

BERNARDO, S. **Impacto Ambiental Da Irrigação No Brasil**. Winotec 2008. II Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação & I Simpósio Brasileiro sobre o Uso Múltiplo da Água. Fortaleza- Ceará. Junho de 2008. Disponível em: <http://www.agr.feis.unesp.br/imagens/winotec_2008/winotec2008.php>. Acesso em 5 de Julho de 2010.

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. Viçosa: UFV, Impr. Univ., 1989.

BERNARDO, S; SOARES, A; MANTOVANI, E. **Manual de Irrigação**. 8. ed. - Viçosa: Ed.UFV, 2006, pág. 625.

BISCARO, G. A..**Sistemas de irrigação por aspersão**. Dourados, MS : Editora da UFGD, 2009.134p.

BOMAN, B.J. Distribution patterns of microirrigation spinner and spray emitters. Applied Engineering in Agriculture, St. Joseph v.5, n.2, p.50-56. 1989.

BOTREL, T. A. **Hidráulica de microaspersores e linhas laterais para irrigação localizada**. Dissertação Mestrado – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba: ESALQ, 1984. 78 f.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.. **A Evolução dos Pivôs**, 2007, disponível em <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/daniel/Downloads/Material/Pos-graduacao/Agricultura%20Irigada/705pivos.pdf>. Último acesso em: fev/2013.

CHRISTOFIDIS, D. **Situação das áreas irrigadas no Brasil**. (Versão Preliminar). Brasília, DF MMA/SRH, 1997. Não paginado. (Programa Nacional de Irrigação e Drenagem).

COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO F., Maurício A.. **Sonda De TDR para Estimativa da Umidade e Condutividade Elétrica do Solo, com Uso de Multiplexadores**. Rev. bras. eng. agríc. ambient., Campina Grande, v. 9, n. 4, Dec. 2005 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662005000400006&lng=en&nrm=iso>. access on 07 Jan. 2013.

CRUZ, T. M. L. **Avaliação de um sensor capacitivo para o monitoramento da umidade do solo**. 2007. 63 p. Monografia (Conclusão em Agronomia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

CRUZ, T. M. L. **Estratégia de monitoramento e automação em sistemas de irrigação utilizando dispositivos de comunicação em redes de sensores sem fio**. 2009. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

CYBIS, W. A. et al. **Uma abordagem ergonômica para o desenvolvimento de sistemas interativos**. Workshop sobre Fatores Humanos em Sistemas Computacionais. 1., 1998, Rio de Janeiro. Anais... Disponível em <<http://www.inf.puc-rio.br/~ihc98/atas/L-Cybis.zip>>. Acesso em: 09 de janeiro de 2013.

DALLLY, W. F. R.; Mc.Connell, K. G. **Instrumentation for Enginnnering Measuments**. 2ª Edição. Editora: Jonh Wiley & Sons, Inc.New York, 1993;

ERZIN, Y., B. H. Rao, *et al.* **Artificial neural network models for predicting soil thermal resistivity**. International Journal of Thermal Sciences, v.47, n.10, Oct, p.1347-1358. 2008.

FARINES, J. M.; FRAGA, J. S.; OLIVEIRA, R. S. **Sistemas de Tempo Real**. Departamento de Automação de Sistemas. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Julho de 2000. On line from: www.das.ufsc.br/~romulo/discipli/cad-cbtisa/escola-1.pdf. Acesso em 28 de junho de 2010.

FONTES, I. R.; CAGNON, J. A.; RODRIGUES, R. M. **Sistema de supervisão e controle para casas de vegetação empregando rede wireless de sensores..** In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Campinas.Proceedings online... Available from: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000200046&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 24 de junho de 2010.

FRANÇA, F. A.. **Instrumentação e Medidas: grandezas mecânicas**. UNICAMP 2007. Disponível em:http://www.fem.unicamp.br/~instmed/Inst_Med.html. Último acesso em: fev/2013.

HATFIELD, J. L. **Precision agriculture and environmental quality: challenges for research and education**. In: National Workshop Precision Agriculture and the Environment: Research Priorities of the Nation, 2000. Disponível em: <www.arborday.org/programs/Papers/PrecisAg.PDF>. Acesso em: 02 de julho de 2009.

HAYKIN, S. **Neural Networks**, 2ª Ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1999.

IDOETA, I. V., **Elementos de Eletrônica Digital**, Editora: Erica, Edição : 35 Brasil, Pg.s 524, jan.2003

JUNIOR, W. P. ; C. E. PEREIRA. **A supervisory tool for real-time industrial automation systems**. Object-Oriented Real-Time Distributed Computing, 2003. Sixth IEEE International Symposium on. 14-16 May 2003, 2003. 230-237 p.

KAMMER, D; MCNUTT, G.; SENESE, B.; BRAY, J.. **Bluetooth Application Developer's Guide:The Short Range Interconnect Solution**. Published by Syngress Publishing, Inc. 800

Hingham Street Rockland, MA 02370 in 2002, Pgs, 525.

KLIR, George, CLAIR, Ute H. St., YUAN, Bo. **Fuzzy Set Theory – Foundations and Applications**. Estados Unidos : ed. Prentice Hall, 1997.

KUMAR, M., A. BANDYOPADHYAY, *et al.* Comparative study of conventional and artificial neural network-based ETo estimation models. *Irrigation Science*, v.26, n.6, Sep, p.531-545. 2008.

LIMA, J. E. F. W.; FERREIRA, R. S. A.; CHRISTOFIDIS, D. **O uso da Irrigação no Brasil**. Disponível em :

http://ag20.cnpia.embrapa.br/Repositorio/irrigacao_000fl7vsa7f02wyiv80isprr5frxoq4.pdf

Último acesso em: 03/01/2013.

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

MANTOVANI, E. C., RAMOS, M. M. Eficiência na aplicação da água. In: COSTA, E. F., VIEIRA, R.F., VIANA, P. A. *Quimigação: aplicação de produtos químicos e biológicos via irrigação*. Brasília: EMBRAPA - SPI, 1994. p. 135 - 152.

MATIAS, M. Checklist: **Uma Ferramenta de Suporte à Avaliação Ergonômica de Interfaces**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em

<<http://www.eps.ufsc.br/disserta/matias/indice/>>. Acesso em: 09 janeiro de 2013.

MIRANDA, D. B.; SANTORO, B. L.; PIRES, R. C. M.; SOUZA, C. F. **Calibração e validação de um equipamento de capacitância para a estimativa da umidade do solo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 38., 2009, Juazeiro/Petrolina. Anais...Juazeiro/Petrolina: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2009. CD-ROM.

MIRANDA, J.H.; PIRES, C.M.P. **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2001. 410p. (Série Engenharia Agrícola, 1).

MOKARZEL, M. P.; CARNEIRO, K. P. M. **Internet Embedded: TCP/IP para Microcontroladores**. São Paulo. Editora Érica, 2004. ISBN 10: 8536500425.

MONTEIRO, F.; BRASA, A.; OROZCO, L.; GARCIA, F. M. **A wireless sensor network for remote environmental data acquisition in precision viticulture**. In: International Conference of Agricultural Engineering. Brazilian Congress of Agricultural Engineering, 37, 2008, Iguassu Falls City, Brazil. CD ROM.

MUKAIDONO, Masao. **Fuzzy Logic for beginners**. Singapore: ed. World Scientific, 2001.

NETO, M. O. R. **Manejo da Irrigação a Nivel de Distrito e Automação em Sistemas de Irrigação Utilizando Dispositivos de Comunicação em Redes de Sensores Sem Fio**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Tradução Paulo Álvoro Maya. São Paulo. Prentice Hall, 2003. 788p. Título original: Modern Control Engineering.

OLIVEIRA A. D. S. **Avaliação do Sensor de Umidade TOPDEA no manejo da irrigação**. 2008. 68 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Oliveira, A. D.; SANTOS, C. C. ; COSTA, C. A. G. ; TEIXEIRA, A. S. ; VILIOTTI, C. A.; CANAFISTULA, F. J. F; **Desenvolvimento de Medidor Digital Portátil de Umidade do Solo**. In: XXXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2007, Bonito - MS. XXXVI CONBEA. Jaboticabal: SBEA, 2007. p. 1-4.

OLIVEIRA, Mário R. N. **Rede de Sensores Sem Fio Aplicado ao Manejo da Irrigação com Diferentes Frequências na Cultura da Melancia**. . 2010. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

PARALAX. HS1101 Relative Humidity Sensor. Disponível em: www.parallax.com V1.0, Page 1 of 4. Último acesso em: fev/2013.

PEREIRA, F.; **Microcontroladores PIC: Programação em C**. Editora: Érica, 1ª Edição, Pgs. 365, São Paulo, 2003.

PIERCE, F. J.; CHÁVEZ, J. L.; ELLIOTT, T. V.; MATTHEWS, G. R.; EVANS, R. G.; KIM, Y. **Remote-real-time continuous move irrigation control and monitoring system**. In: ASABE – Annual International Meeting, Portland, Oregon. Paper Number: 062162, July 2006, 11p.

QUEIROZ, T. M.; CARVALHO, J. A.; RABELO, G. F.; ANDRADE, M. J. B. **Avaliação de sistema alternativo de automação da irrigação do feijoeiro em casa de vegetação**. Revista de Engenharia Agrícola, v.25, n.3, p.632-641, set/dez de 2005.

RASHID, M. H.; **Power Electronics – Circuits, Devices and Applications**. 2ª ed. Prentice Hall, New Jersey: 1993.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; KRANE, K. S. **Física 3**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., 1992. 303p.

ROCHA NETO, O. C. ; BEZERRA, E. ; CRUZ, T. M. L. ; BRAGA, A. P. de S. ; Teixeira, A. S. . **Previsão de Evapotranspiração de Referência (eto) utilizando Redes Neurais Artificiais MLP de Série Temporal com Atraso de Tempo**. In: XL Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2011, 2011, Cuiabá.

ROSSI, L.F. L., HERNANDEZ, F. B. T. **O Futuro da Irrigação nos Países de Terceiro Mundo**, Correio da Ilha, Ilha Solteira, Ano X, nº 1.361, 21 de Julho de 2001, p.02. Disponível em (<http://www.agr.feis.unesp.br/avp180701.htm>). Último acesso em 03.01.2013.

SANTOS, C. C. **Sistema de sensoriamento remoto de umidade e temperatura do solo para irrigação de precisão**. 2008. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

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.

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.

SUZUKI, M. A.; HERNADEZ, F. B. T. **Automação de sistemas de irrigação**. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos. Curso 25 a 29 de Janeiro, Ilha Solteira – SP. Disponível em: <<http://www.agr.feis.unesp.br/curso2.htm>> . Acesso em: 10 de Junho de 2008.

SYDENHAM, P. H. **Transducers in Measurements and Control**, (ISA) Instrument Society of America, North Carolina, 1978;

TEIXEIRA, W. M. da S. *et al.* **Caracterização de parâmetros no inversor de frequência para controle de pressão em sistema de irrigação com válvula hidráulica**. Encontros Universitários da UFC. XXVIII Encontro de Iniciação Científica. Fortaleza-CE, 2009. Disponível em: <<http://www.prppg.ufc.br/eu2009.ufc.br/Resumos/wrappers/MostrarResumo.php?cpf=38292106391&cod=005>> . Acesso em 23 de junho de 2010.

THEBAS, V. M.; **Características dos Sensores**, Instituto Federal do Espírito Santo, Serra, 2009.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. de. **Sensores Industriais: fundamentos e aplicações**. 3º Ed. Editora Érica, São Paulo, 2007. 222p.

TOMMASELLI, J.T.G.; BACHI, O.O.S. **Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.36, n.9, p.1145-1154, 2001.

TOPP, G. C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A. P. **Eletromagnetic determination of soil watercontent: measurements in coaxial transmission lines**. Water Resources Research, New York, v.16, p.574-582, 1980.

TORRE NETO, A.; RABELLO, L.M. **Redes de sensores sem fio para manejo da irrigação**. II Workshop de aplicações de técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental, Taubaté – SP, 2008. CD ROM.

TRINTINALHA, M. A.; GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; TORMENA, C. A.; BERTONHA, A.; TSUKADA, J. **Efeito da instalação e da variabilidade entre sondas no uso da técnica de TDR em um nitossolo vermelho distroférico**. Acta Scientiarum, Maringá, v.23, n.5, p.1165-1171, 2001.

VIEIRA, D. B. As técnicas de irrigação. São Paulo: Globo, 1989. 263p

VLACK, L. H. V., **Princípios de Ciência dos Materiais**, Editora: Edgard Blucher, Pags 448,1998, Edição : 12

WATCHARA, S. e T. TAWATCHAI. **A combined simulation-genetic algorithm optimization model for optimal rule curves of a reservoir: a case study of the Nam Oon Irrigation Project, Thailand.** 21: 3211-3225 p. 2007.

WEISER, M. **The Computer for the 21st Century.** 1991, Disponível em (<http://www.ubiq.com/hypertext/weiser/SciAmDraft3.html>). Acesso em 30 de dezembro de 2012.

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.

ZAZUETA, F. S.; *Irrigation System Controllers*; SS-AGE-32 Agricultural Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service; March, 1993.

ZAZUETA, F. S.; XIN, J. **Soil Moisture Sensors.** University of Florida, Bulletin 292, 12p., April 1994. Disponível em: <<http://www.p2pays.org/ref/08/07697.pdf>>. Acesso em: 20 de Janeiro de 2013.

ZUBEN, V. **Control Systems. Tópicos Avançados: Controle Robusto, Controle Adaptativo e Controle Inteligente.** Notas de Aula. Curso de Graduação. Tópico 03. 2003. Disponível em: < <http://www.dca.fee.unicamp.br/~vonzuben/courses/ea932.html> >. Acessado em: 5 de julho de 2010.

ANEXOS

ANEXO A – Características Básicas do Microcontrolador PIC18F4550

Figura 100 - Página inicial do Data-Sheet.



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

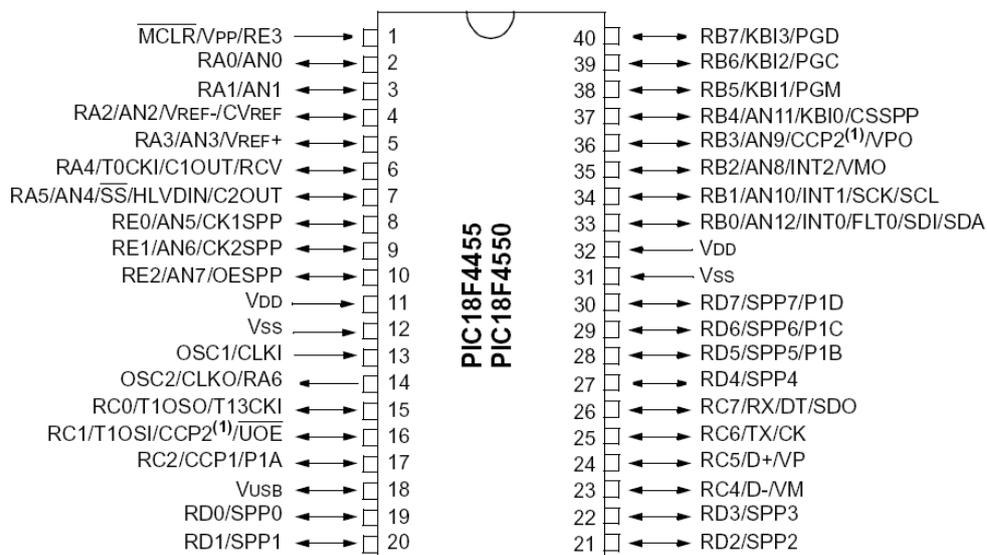
Special Microcontroller Features:

- 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

Fonte: (MICROCHIP, 2004).

Figura 101 - Diagrama de pinos.



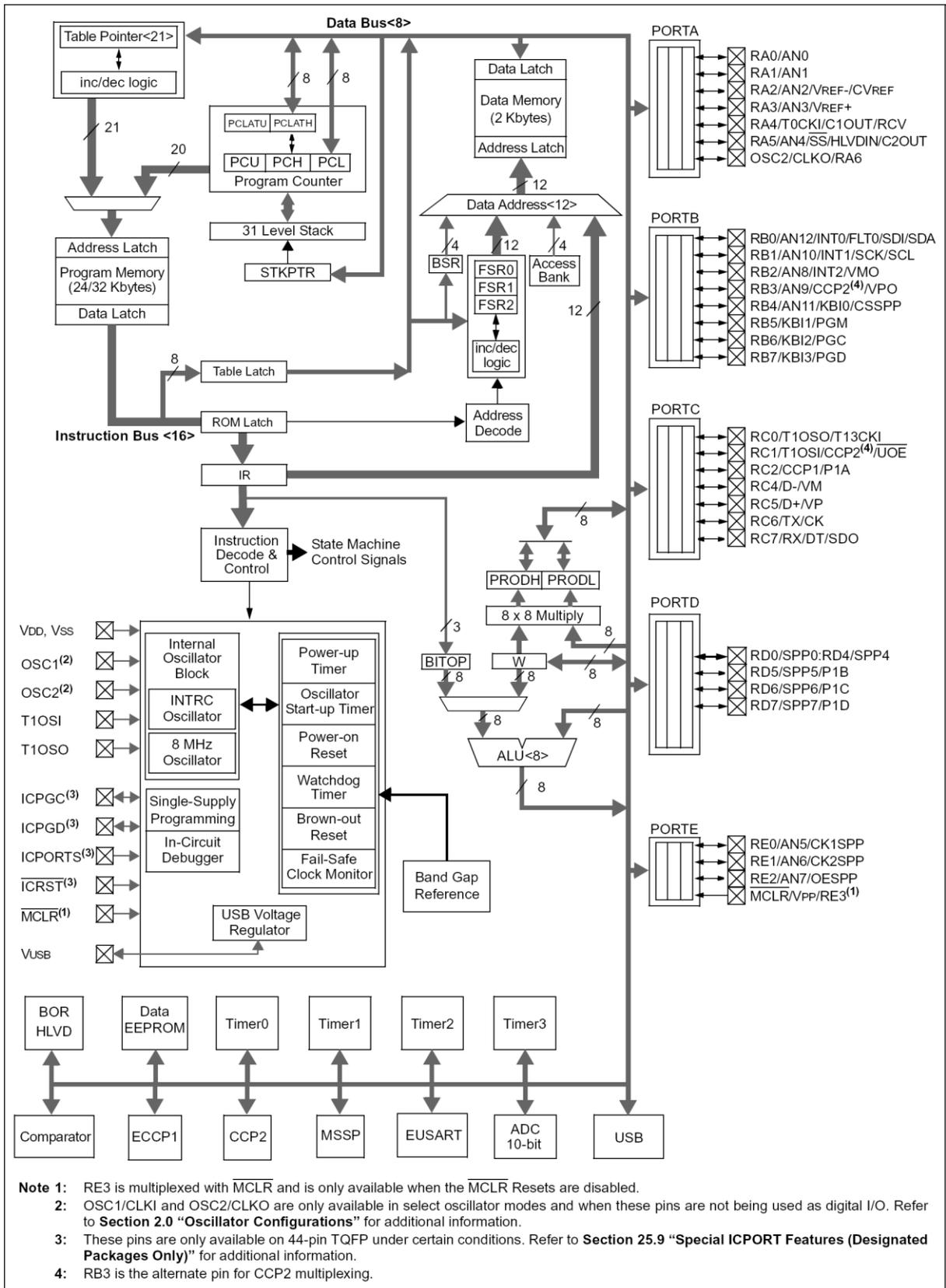
Fonte: (MICROCHIP, 2004).

Figura 102 - Características do dispositivo.

Features	PIC18F2455	PIC18F2550	PIC18F4455	PIC18F4550
Operating Frequency	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

Fonte: (MICROCHIP, 2004).

Figura 103 - Diagrama em blocos do PIC18F4455/4550.



Fonte: (MICROCHIP, 2004).

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, TA = - 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						
VIH	HIGH level input voltage		VCC-0.3		VCC	V
VIL	LOW level input voltage		Vss		0.3	V
Digital output pin						
VOH	HIGH level output voltage (IOH=-0.5mA)		VCC-0.3		VCC	V
VOL	LOW level output voltage (IOL=0.5mA)		Vss		0.3	V
General RF conditions						
fOP	Operating frequency	1)	2400		2524	MHz
Δf	Frequency deviation			±156		kHz
RGFSK	Data rate ShockBurst		>0		1000	kbps
RGFSK	Data rate Direct Mode	2)	250		1000	kbps
FCHANNEL	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	2nd Adjacent Channel Transmit Power 2MHz				-20	dBm
PRF3	3rd Adjacent Channel Transmit Power 3MHz				-40	dBm
IvCC	Supply current @ 0dBm output power	4)		13		mA
IvCC	Supply current @ -20dBm output power	4)		8.8		mA
IvCC	Average Supply current @ -5dBm output power, ShockBurst	5)		0.8		mA
IvCC	Average Supply current in stand-by mode	6)		12		μA
IvCC	Average Supply current in power down			1		μA
Receiver operation						
IvCC	Supply current one channel 250kbps			18		mA
IvCC	Supply current one channel 1000kbps			19		mA
IvCC	Supply current two channels 250kbps			23		mA
IvCC	Supply current two channels 1000kbps			25		mA
RXSENS	Sensitivity at 0.1%BER (@250kbps)			-90		dBm
RXSENS	Sensitivity at 0.1%BER (@1000kbps)			-80		dBm

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);
}
```