

AUTOMAÇÃO AGRÍCOLA: INTEGRAÇÃO DE HARDWARE E SOFTWARE PARA O CONTROLE DA IRRIGAÇÃO POR SULCO

David John Turnell

Tese de doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de doutor em ciências no domínio de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração

Processamento da Informação

Orientadores

Gurdip Singh Deep, Ph.D.

Raimundo C. S. Freire, Dr.

Campina Grande – Paraíba

Junho de 1999



T944a

Turnell, David John

Automacao agricola : integracao de hardware e software para o controle da irrigacao por sulco / David John Turnell. - Campina Grande, 1999.

152 f.

Tese (Doutorado em Engenharia Eletrica) - Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

1. Irrigacao 2. Automacao Agricola 3. Sistemas Abertos
4. Tese - Engenharia Eletrica I. Deep, Gurdip Singh II.
Freire, Raimundo Carlos Silverio III. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB)

CDU 631.67(043)

**AUTOMAÇÃO AGRÍCOLA: INTEGRAÇÃO DE HARDWARE E SOFTWARE PARA
O CONTROLE DA IRRIGAÇÃO POR SULCO**

DAVID JOHN TURNELL

Tese Aprovada em 05.11.1999



GURDIP SINGH DEEP, Ph.D., UFPB
Orientador



RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFPB
Orientador



LUIZ PEREIRA CALÔBA, Ph.D., UFRJ
Componente da Banca



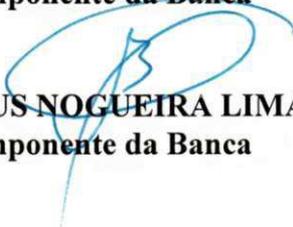
YARO BURIAN JÚNIOR, Ph.D., UNICAMP
Componente da Banca



ANTONIO MAURO SARAIVA, Dr., USP
Componente da Banca



JURGEN WOLFGANG PRECKER, Pr.D., UFPB
Componente da Banca



ANTONIO MARCUS NOGUEIRA LIMA, Dr., UFPB
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
Novembro - 1999

RESUMO

Em torno de 20% da área mundial cultivada depende da irrigação. Uma das modalidades de irrigação, popular nas regiões semi-áridas, inclusive no Nordeste do Brasil, é a irrigação por sulco. Apesar de sua popularidade, este tipo de irrigação se caracteriza por uma baixa eficiência no uso da água, quando o controle é manual. A automação da irrigação por sulco restringe-se tipicamente ao acionamento de válvulas e comportas, em tempos predeterminados, com a finalidade de direcionar o fluxo de água entre parcelas irrigadas. Para aumentar a eficiência da irrigação por sulco e torná-la mais viável em regiões semi-áridas, investigou-se nesta tese alternativas de hardware e software para a automação do gerenciamento do uso da água. Propôs-se então o desenvolvimento de uma abordagem de controle automático distribuído baseada em um conjunto de estratégias de controle baseado na detecção, em tempo real, da presença de água em múltiplos pontos de uma área irrigada.

Três das estratégias de controle foram propostas visando otimizar o uso da água na irrigação por sulco. Duas destas estratégias baseiam-se no emprego de simulação como suporte ao algoritmo de controle. Uma destas estratégias, 'Análise de Avanço', consiste na otimização da entrada de água com base em um conjunto de coeficientes de infiltração de água no solo. Estes coeficientes são identificados em tempo real, durante a primeira fase da irrigação, a partir de dados de avanço da água, conforme uma técnica proposta por Engenheiros Agrícolas.

A estratégia de otimização 'Escoamento residual', busca minimizar o escoamento da água nos finais dos sulcos. A identificação dos coeficientes de infiltração se dá a partir das características de avanço/recessão da água.

Em qualquer das estratégias propostas, o algoritmo de controle implementa a variação do ciclo de trabalho da entrada de água apoiado pelo hardware desenvolvido para o sensoramento e controle distribuído e pelo software de suporte à gestão da irrigação. Este trabalho analisa a influência exercida sobre o controle por erros no sensoramento das condições de campo e erros nos parâmetros de entrada do modelo de irrigação adotado.

Do ponto de vista de hardware, a partir da constatação da necessidade de métodos de telemetria, de baixo custo e de baixo consumo, para envio de dados sobre curtas distâncias (1- 2 km), foram desenvolvidas três redes de sensores para detectar a presença de água no sulco e permitir o controle da entrada de água no sistema de irrigação. Duas redes são baseadas em elementos sensores resistivos e uma rede é baseada em elementos sensores capacitivos. Foi também desenvolvida uma estação de campo, e os meios para comunicação entre estes elementos e a estrutura de controle (redes de sensores e computador central). O desenvolvimento do hardware levou em consideração a energização disponível no campo, as condições de ruído impostas à comunicação, a robustez necessária para operar nas condições hostis no campo e buscou oferecer uma relação custo benefício que motivasse a adoção da automação da irrigação.

Do ponto de vista de software, foi desenvolvido um sistema, denominado *FarmWeb*, com base no modelo 'Objeto-Ação', adotado por sistemas distribuídos, para oferecer suporte ao desenvolvimento

de aplicações integradas de automação agrícola. Trata-se de um sistema que oferece aplicativos para controle em tempo real da irrigação por sulco, com recursos para a simulação e visualização simultânea, na forma gráfica, de dados sobre a evolução do processo de irrigação. O sistema também oferece mecanismos para comunicação entre aplicações, recursos para multiprocessamento e um conjunto de serviços de suporte às aplicações que facilitam o seu desenvolvimento. Este sistema se propõe a servir como 1) uma plataforma para estudos de alternativas de controle, a partir da simulação dos processos agrícolas a serem controlados, 2) uma base para o desenvolvimento de sistemas de controle que possam ser usados em aplicações reais, e 3) um ambiente didático, quando for utilizado em conjunto com programas para simulação de processos agrícolas. Nesta tese, foram investigados aspectos de integração de hardware e software que possibilitassem um controle distribuído e em tempo real visando a integração em um sistema mais abrangente de automação agrícola.

A tese resultou no desenvolvimento tanto de hardware quanto de software que, devido às suas características, poderão ser aplicados no desenvolvimento de aplicações distribuídas em outros contextos da automação agrícola. As soluções propostas adequam-se também a um conceito de agricultura de precisão integrada, no qual diversos processos apoiados por grande número de estações distribuídas no campo, comporiam um ambiente integrado de automação agrícola.

ABSTRACT

Around 20% of the world's cultivated area depend upon irrigation. One type of irrigation, popular in the semi-arid regions, including those in the Northeast of Brazil, is furrow irrigation. In spite of its popularity, this type of irrigation is characterized by low water use efficiency when controlled manually. The automation of furrow irrigation typically is limited to the controlling of valves and gates, at predetermined times, to direct water between irrigated sets. To increase the efficiency of furrow irrigation and make it viable in semi-arid regions, this thesis research investigates alternatives in hardware and software for the automated management of water use. A development approach is proposed for distributed automated control based upon a set of control strategies based upon the detection, in real time, of the presence of water at multiple points in an irrigated area.

Three control strategies were proposed that aim to optimize the use of water in furrow irrigation. These strategies are based upon the use of simulation to support the control algorithm. One of these strategies, 'Advance Analysis', consists of the optimization of the water inlet based upon a set of water infiltration coefficients. These coefficients are identified in real-time, during the first phase of the irrigation, using water advance data. The technique utilized in the identification of the coefficients is adopted from Agricultural Engineering.

The optimization strategy 'Runoff Control' aims at minimizing the runoff of water at the ends of the furrows. The identification of the infiltration coefficients arises from the advance/recession characteristics of the water.

For all of the proposed strategies, the control algorithm implements the duty cycle variation of the water inlet supported by hardware for remote sensing and distributed control and by software for irrigation management support. The work analyzes the influence upon the control of errors in sensing of field conditions and input parameters for the irrigation model adopted.

From the hardware point of view, based upon the need for low-cost, low-power telemetry method, for the transmission of data over short distances, three sensor networks were developed to detect the presence of water in the furrow and to allow the water inlet control of the irrigation system. Two of the networks are based upon resistive sensing elements and one network is based upon capacitive sensing elements. Also developed were a field station and the means of communication between these elements and the control structure (sensor networks and central computer). The development of hardware took into consideration the powering available in the field, the noise conditions imposed upon the communication, the robustness necessary to cope with the hostile field conditions and the need to offer cost-effectiveness to motivate the adoption of irrigation automation.

From the software point of view, a system called FarmWeb was developed based upon the object action model adopted for distributed systems, in order to offer support to the development of integrated agricultural automation applications. FarmWeb is a system that offers: applications for the real-time control of furrow irrigation, with features for the simulation and simultaneous visualization, in graphical form, of the progress of the irrigation process; mechanisms for communication between

applications; multiprocessing support, and a set of application support services that aid their development. This system is offered as 1) a platform to study control alternatives based upon simulation of the agricultural processes to be controlled, 2) a base for the development of control systems that can be used in real applications, and 3) a research environment for use with agricultural process simulators. Investigated in this research were aspects of hardware and software integration which allow distributed real-time control with the objective of creating an agricultural automation system with broad capabilities.

This thesis research resulted in the development of both hardware and software, that due to its characteristics, can be applied to the development of distributed applications in other contexts of agricultural automation. The proposed solutions are compatible with the concept of integrated precision agriculture, in which diverse processes backed by a large number of field stations, embody an integrated agricultural automation environment.

ÍNDICE

1	Introdução	1
1.1	Contexto: A Automação Agrícola	2
1.2	Foco: A Irrigação por Sulco	3
1.3	Objetivo: Controle e Otimização da Irrigação por Sulco.....	3
1.4	Motivação para este Trabalho.....	4
1.5	Trabalho de Pesquisa	5
1.6	Apresentação da Tese	7
2	Automação Agrícola	8
2.1	Sistemas de Automação Agrícola.....	8
2.1.1	Automação Local.....	8
2.1.2	Automação Local Supervisionada.....	9
2.1.3	Automação Centralizada	9
2.1.4	Automação Distribuída	12
2.2	Integração de Sistemas de Automação	13
2.2.1	Centralização e Distribuição	14
2.2.2	Integração de Sistemas.....	16
2.2.3	Modelo Objeto-Ação.....	16
2.2.4	Comunicação entre Processos	17
2.2.5	Serviço de Nomes	18
2.2.6	Tolerância e Tratamento de Falhas	18
2.2.7	Transparência no Acesso a Dispositivos.....	19
2.2.8	Hardware Genérico	19
2.3	Controle da Irrigação por Sulco.....	20
2.3.1	Irrigação por Sulco.....	22
2.3.2	Sensoreamento Remoto na Irrigação	27
2.3.3	Controle Automático da Irrigação por Sulco	29
2.3.4	Otimização do Controle Automático da Irrigação	32
2.3.5	A Simulação como Estratégia de Otimização da Irrigação	33
2.4	Operação de Hardware no Campo	34
2.4.1	Ruído.....	34
2.4.2	Degradação de Condutores Elétricos	35
2.4.3	Facilidade de Manutenção.....	35
2.4.4	Energização.....	36
3	Sistema FarmWeb	37
3.1	Arquitetura.....	37
3.1.1	Grupos de Automação.....	38
3.1.2	Arquitetura de um Sistema FarmWeb.....	39
3.1.3	Classes de Objetos	41
3.1.4	O Corretor de Nomes	43
3.1.5	Acionamento a Base de Eventos.....	44
3.1.6	Passagem de Mensagens entre Agentes e Servidores	47
3.1.7	Estruturação dos Aplicativos.....	49
3.1.8	Dispositivos Genéricos	51
3.1.9	Recuperação de Falhas.....	53
3.1.10	Segurança no Acesso	54
3.1.11	Persistência de Objetos	54
3.1.12	Ferramentas.....	55
3.2	Interface com o Usuário.....	55
3.2.1	Interface Baseada em Janelas.....	57
3.2.2	Criação de Janelas Sinópticas	60
3.2.3	Estilo de Interação.....	60
3.3	Serviços de Apoio.....	62

3.3.1	Serviço para Tratamento de Eventos.....	62
3.3.2	Serviço de Relatórios	63
3.3.3	Serviços Gráficos	64
3.3.4	Serviço de Análise Numérica.....	67
3.4	Suporte para o Desenvolvimento de Aplicativos.....	67
3.4.1	Biblioteca de Apoio a Depuração	67
3.4.2	Biblioteca de Processos Simulados.....	68
3.4.3	Projeto Arcabouço.....	69
4	Automação e Otimização da Irrigação por Sulco.....	70
4.1	Módulo de Controle da Irrigação.....	71
4.2	Aplicativo de Controle da Irrigação por Sulco	72
4.2.1	Estruturação do Aplicativo de Controle	72
4.2.2	Implementação do Modelo Onda-Cinématica.....	74
4.2.3	Representação Gráfica Compósita de uma Irrigação	75
4.3	Estratégias de Controle	76
4.3.1	Estratégia ‘Entrada Constante’	77
4.3.2	Estratégia ‘Redução Programada de Entrada’	77
4.3.3	Estratégia de Otimização ‘Análise de Avanço’	78
4.3.4	Estratégia de Otimização ‘Controle de Escoamento’	80
4.3.5	Estratégia de Otimização ‘Reutilização de Coeficientes’	81
4.4	Análise de Sensibilidade.....	82
4.4.1	Intervalo de Tempo	83
4.4.2	Erro de Declividade	84
4.4.3	Coefficiente de Rugosidade Manning	85
4.4.4	Atraso nos Dados de Avanço	86
4.4.5	Entrada de Água.....	88
4.5	Interface com o Usuário do Aplicativo de controle da Irrigação por Sulco	89
4.5.1	Janelas Sinópticas	89
4.5.2	Janela de Configuração	90
4.5.3	Janela ‘Painel de Controle’	92
4.6	Ferramentas de Apoio a Decisão	93
4.6.1	Ferramenta 1: ‘Simulador da Irrigação por Sulco’.....	94
4.6.2	Ferramenta 2: ‘Analisador de Avanço’	95
4.7	Gerente de Irrigação	96
4.7.1	Comunicação entre o Gerente e o Controlador de Irrigação por Sulco.....	98
5	Hardware para o Controle da Irrigação por Sulco	99
5.1	Controle de Entrada de Água no Sulco.....	100
5.1.1	Dispositivo ‘AtuadorPID’	101
5.1.2	Dispositivo ‘Atuador’	102
5.1.3	Dispositivo ‘AtuadorCíclico’	104
5.2	Determinação da Entrada de Água	107
5.3	Detecção de Água no Sulco.....	108
5.3.1	Análise de Requisitos.....	109
5.3.2	Detecção de Água com Elementos Sensores Resistivos	110
5.3.3	Detecção da Água com Elementos Sensores Capacitivos.....	113
5.3.4	Rede de Detetores Resistivos Simples	117
5.3.5	Rede de Detetores Resistivos Endereçáveis.....	119
5.3.6	Rede de Sensores Capacitivos Endereçáveis	124
5.4	Estação de Campo para o Controle da Irrigação por Sulco	126
5.4.1	Comunicação/Energização	128
5.4.2	Protocolo de Comunicação	132
5.4.3	Gerente de Hardware	133
6	Conclusões do Trabalho.....	136
6.1	Análise dos Resultados	136
6.2	Trabalhos Futuros	138
6.3	Considerações Finais	140

Referências Bibliográficas.....	141
A.1 Modelo Onda-Cinemática.....	147
A.2 Solução do Problema Inverso do Avanço.....	151

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Estratégias para aumento da produção agrícola	1
Figura 2-1: Automação local	9
Figura 2-2: Automação local supervisionada	9
Figura 2-3: Automação centralizada.....	9
Figura 2-4: Automação distribuída	12
Figura 2-5: Exemplo de integração de sistemas.....	13
Figura 2-6: Diversidade na interligação de dispositivos de campo.....	19
Figura 2-7: Técnicas de irrigação mais comuns.....	21
Figura 2-8: Irrigação por sulco	22
Figura 2-9: Quatro fases da irrigação por sulco	23
Figura 2-10: Curvas de infiltração e infiltração acumulada	24
Figura 2-11: Escoamento e infiltração em função da duração da irrigação	25
Figura 2-12: Avanço e recessão usando a técnica <i>surge</i> de média duração.....	26
Figura 3-1: Componentes do software FarmWeb	38
Figura 3-2: Grupo de automação	39
Figura 3-3: Arquitetura de um sistema FarmWeb	39
Figura 3-4 Diagrama UML de pacotes do software FarmWeb.....	41
Figura 3-5 Diagrama UML de classes de objeto.....	42
Figura 3-6: Comunicação entre objetos locais.....	43
Figura 3-7: Comunicação entre objetos remotos	44
Figura 3-8: Multiprocessamento através de trechos executáveis e eventos.....	46
Figura 3-9 Processamento dos eventos pelos trechos executáveis	47
Figura 3-10 Diagrama UML de classes de mensagem agente/servidor.....	48
Figura 3-11 Definição das classes de um conjunto de aplicativos.....	49
Figura 3-12: Diagrama UML de estados para o aplicativo de controle de aviário	50
Figura 3-13 - Janela de configuração de sensor.....	53
Figura 3-14 Diagrama UML 'Use cases'	56
Figura 3-15: Interface multi-janela	57
Figura 3-16: Exemplo de janela sinóptica principal	58
Figura 3-17: Exemplo de janela sinóptica secundária	59
Figura 3-18: Janela de configuração de símbolo gráfico	60
Figura 3-19: Menu dinâmico e comandos disponíveis	61
Figura 3-20 Uso de menus dinâmicos para invocar ferramenta de configuração	61
Figura 3-21: Janela de eventos.....	63
Figura 3-22: Janela de relatório	64
Figura 3-23: Gráfico bidimensional.....	65
Figura 3-24: Gráfico tridimensional	66
Figura 3-25: Gráfico de tendências.....	66
Figura 3-26: Aplicativo de simulação de processo agrícola	68
Figura 4-1: Integração de aplicativos do módulo de controle da irrigação.....	71
Figura 4-2: Configuração de dispositivos no controle da irrigação por sulco	72
Figura 4-3 Classes que compõem o aplicativo de controle.....	73
Figura 4-4 Diagrama de estado do aplicativo de controle da irrigação por sulco.....	74
Figura 4-5: Simulação usando o modelo Onda-Cinemática	75
Figura 4-6: Representação gráfica de uma irrigação	76
Figura 4-7: Irrigação com entrada de água constante	77
Figura 4-8: Irrigação com redução programada de entrada	78
Figura 4-9: Otimização da tabela de entrada de água	79
Figura 4-10: Exemplo de uma irrigação otimizada.....	79
Figura 4-11: Irrigação otimizada usando técnica 'Escoamento zero'	81
Figura 4-12: Irrigação não otimizada de referência.....	82

Figura 4-13: Irrigação otimizada de referência.....	82
Figura 4-14: Irrigação de comparação com tempo base de 90 s.....	83
Figura 4-15: Irrigação de comparação com tempo base de 320 s.....	83
Figura 4-16: Irrigação de comparação com erro de declividade de -50%.....	84
Figura 4-17: Irrigação de comparação com erro de declividade de +100%.....	85
Figura 4-18: Irrigação de comparação com erro de coeficiente Manning de +100%.....	86
Figura 4-19: Irrigação de comparação com atraso de 120 s nos dados de avanço.....	87
Figura 4-20: Irrigação de comparação com atraso de 240 s nos dados de avanço.....	87
Figura 4-21: Irrigação de comparação com erro de entrada de +10%.....	88
Figura 4-22: Irrigação de comparação com erro de entrada de -10%.....	89
Figura 4-23: Janela sinóptica de uma área irrigada.....	90
Figura 4-24: Janela de configuração de uma área irrigada (por sulco).....	90
Figura 4-25: Janela de configuração de uma parcela de área irrigada (por sulco).....	91
Figura 4-26: Janela de configuração de dispositivos de parcela de área irrigada.....	91
Figura 4-27: Janela de programação de entrada de água.....	92
Figura 4-28: Janela de configuração de sessão.....	92
Figura 4-29: Janela de estado da irrigação - informação global.....	93
Figura 4-30: Janela de estado da irrigação - informação de parcela.....	93
Figura 4-31: Ferramenta 'Simulador de Irrigação por Sulco'.....	94
Figura 4-32: Ferramenta 'Analisador de avanço' - configuração.....	95
Figura 4-33: Ferramenta 'Analisador de avanço' - resultados.....	96
Figura 4-34: Painel de controle do aplicativo 'Gerente de irrigação'.....	96
Figura 4-35: Janela para escalonamento diário.....	97
Figura 4-36: Janela para escalonamento sob demanda.....	97
Figura 4-37: Janela de configuração dos dispositivos.....	98
Figura 5-1: Estratégias de redução de água.....	100
Figura 5-2: Comporta com canal lateral e <i>spiles</i>	102
Figura 5-3 Válvula borboleta.....	103
Figura 5-4: Controle de entrada usando válvula borboleta.....	103
Figura 5-5: Controle variável de entrada usando uma comporta.....	104
Figura 5-6: Fluxo de água de uma válvula diafragma em função do ciclo de trabalho.....	105
Figura 5-7: Controle de entrada usando válvulas diafragma individuais.....	106
Figura 5-8: Controle de entrada usando uma válvula diafragma por parcela.....	106
Figura 5-9 Válvula traveseiro.....	107
Figura 5-10: Resistência do elementos resistivos revestidos.....	112
Figura 5-11: Sensor capacitivo com fio duplo.....	113
Figura 5-12: Cabo flexível como capacitor.....	114
Figura 5-13: Seção transversal do cabo flexível.....	115
Figura 5-14: Sinalização do sensor em função da altura de água no sulco.....	116
Figura 5-15: Aumento de capacitância.....	116
Figura 5-16: Elementos capacitivos longos (no sulco).....	117
Figura 5-17: Rede de detetores resistivos simples.....	117
Figura 5-18: Alternativas para o aumento da corrente dos detetores.....	118
Figura 5-19: Circuito do detetor da rede resistiva simples.....	119
Figura 5-20: Rede de detetores resistivos endereçáveis.....	120
Figura 5-21: Endereçamento de detetores da rede resistiva.....	120
Figura 5-22: Circuito do detetor da rede resistiva endereçável.....	121
Figura 5-23: Endereçamento por tensão.....	121
Figura 5-24: Interface entre o computador e a rede endereçável.....	122
Figura 5-25: Faixa de endereçamento por tensão.....	123
Figura 5-26: Rede de sensores capacitivos endereçáveis.....	124
Figura 5-27: Sinalização de estado por pulsos de corrente.....	124
Figura 5-28: Janela de monitorização de pulsos de corrente.....	125
Figura 5-29: Circuito do sensor capacitivo endereçável.....	126
Figura 5-30: Diagrama de blocos da segunda estação de campo.....	127
Figura 5-31: Rede de estações digitais.....	128

Figura 5-32: Transmissão de dados usando curto-circuito	129
Figura 5-33: Interface entre a rede e a estação de campo	129
Figura 5-34: Tensão no capacitor durante uma interrogação.....	130
Figura 5-35: Interface entre o computador e a rede de estações de campo.....	131
Figura 5-36: Dispositivos relacionados com a estação de campo.....	133
Figura 5-37: Janela de configuração da rede de estações de campo	134
Figura 5-38: Janela de configuração de estação de campo	134
Figura 5-39: Janela de configuração de detetor	135
Figura A-1: Volume de água no sulco em um dado instante do avanço.....	147
Figura A-2: Volume de água superficial e infiltrada em quatro intervalos de tempo.....	148
Figura A-3: Os três tipos de célula deformável	149
Figura A-4: Matriz de soluções t-x euleriano para o modelo onda cinemática	149
Figura A-5: Cálculo do erro de encaixe dos dados de avanço	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Comparação dos sistemas de comunicação	11
Tabela 3-1: Tipos de evento.....	45
Tabela 3-2: Sumário dos comandos de menu	59
Tabela 3-3: Classificação de eventos no controle da irrigação.....	62
Tabela 5-1: Aumento da capacitância de fio duplo imerso em água	114
Tabela 5-2: Capacitâncias seco e molhado de 1 m de cabo flexível.....	114
Tabela 5-3: Correntes de sinalização dos detetores da rede resistiva simples	118
Tabela 5-4: Tensões de endereçamento dos detetores de água.....	123
Tabela 5-5: Endereços dos dispositivos da estação de campo	133

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial está sendo acompanhado pelo aumento da produção agrícola. Tradicionalmente, a maior parte desse aumento veio da expansão das terras agrícolas, através do desmatamento de florestas e da irrigação de terras áridas. Entretanto, a expansão urbana, a disponibilidade limitada de água para a irrigação e a vigilância dos ambientalistas são alguns dos vários fatores que hoje estão limitando a expansão das terras agrícolas na maioria das regiões do mundo. Diante deste quadro, cresce em importância o aumento da produtividade das terras agrícolas já existentes. Afora a expansão das terras, o aumento da produção agrícola, pode ser alcançado através de outras estratégias que levam ao aumento da produtividade das terras existentes, como ilustra a Figura 1-1.

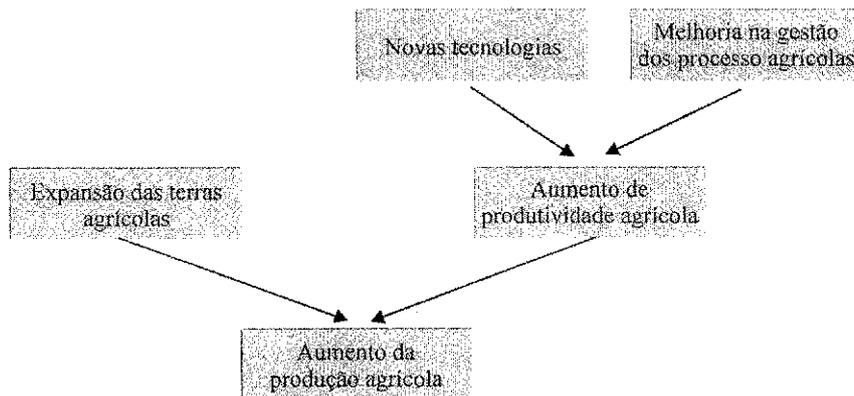


Figura 1-1: Estratégias para aumento da produção agrícola

O desenvolvimento e implantação de novas tecnologias tem levado a um aumento significativo da produção agrícola. Nesta categoria, estão entre outras, a irrigação, a engenharia genética, a indústria química com os fertilizantes e os defensivos agrícolas e a mecanização agrícola.

Uma outra estratégia que contribui para o aumento da produtividade é a melhoria da gestão dos processos agrícolas. A gestão de processos agrícolas envolve a alocação de recursos tais como: água, energia, insumos, mão de obra e o escalonamento de eventos tais como: a irrigação, a aplicação de defensivos e fertilizantes, o plantio, a colheita, etc. Esta gestão pode ser apoiada por sistemas de

automação, que controlem variáveis dos processos, tais como temperatura, umidade, luminosidade, suprimento de água, etc. Um aspecto importante na gestão dos processos é a relação custo-benefício dos investimentos necessários para introduzi-la. Para auxiliar o processo de gestão, têm sido desenvolvidos sistemas de apoio a decisão, e o uso de simuladores cada vez mais sofisticados baseados em modelos dos processos.

A importância do uso da simulação é demonstrada pela existência de um grande número de simuladores para uma larga faixa de processos agrícolas, a exemplo de simuladores de: condições ambientais de pocilgas [Naas 1996], produção de laticínios [Kristensen 1980], disseminação de pragas [Roermund 1997], cultivo de trigo, efeito de pesticidas [Javis 1997] e escalonamento de irrigação [Fox 1994]. Na maioria destes casos, a simulação é empregada como parte integrante de sistemas de apoio a decisão [Faye 1998, Gonçalves 1998, Singh 1995]. Estes sistemas são ferramentas poderosas na otimização da alocação de recursos e do perfil de controle. Porém, a simulação já começa a ser incorporada nos algoritmos de controle com o objetivo de aumentar a eficiência dos processos agrícolas.

Este trabalho foi desenvolvido no contexto da automação agrícola, e teve como foco o controle da irrigação por sulco. Seu principal objetivo foi o aumento da eficiência da irrigação por sulco através de uma abordagem de controle distribuído que buscou viabilizar sua utilização no aumento da produtividade agrícola. Assim, espera-se contribuir para o aumento da produtividade a partir do aperfeiçoamento da tecnologia existente e da oferta de um suporte para a gestão mais eficiente dos processos agrícolas:

- *Aperfeiçoamento da Tecnologia*, desenvolvimento de hardware e software para apoiar o controle distribuído da irrigação por sulco.
- *Suporte para gestão da irrigação*, oferta de algoritmos de controle, de uma plataforma de software e o emprego da simulação como estratégia na otimização da eficiência da irrigação por sulco.

1.1 CONTEXTO: A AUTOMAÇÃO AGRÍCOLA

A exemplo do que vem ocorrendo no setor industrial, a automação no controle dos processos agrícolas vem causando uma melhoria na eficiência da produção, percebida na redução de custos e de ciclos de produção, bem como no aumento da qualidade dos produtos e da produtividade do setor. Assim como no setor industrial, a busca por maior produtividade tem sido alvo de uma crescente pressão social pela proteção ao meio ambiente e pela demanda por melhores condições de trabalho para o trabalhador rural. Em particular, a busca por maior produtividade tem resultado em sistemas de automação cada vez mais sofisticados. Isso é exemplificado pelo surgimento da agricultura de precisão [Neto 1997, Cranfield 1999, Georgia 1999], que tipicamente consiste no controle automático

de máquinas agrícolas via telemetria, baseado no sensoriamento remoto e em dados obtidos de satélites e de GPS¹.

1.2 FOCO: A IRRIGAÇÃO POR SULCO

Dentre as iniciativas adotadas para aumento da produção agrícola, uma das mais antigas é a irrigação, que tem sido praticada pelo homem por milhares de anos. A irrigação foi usada pela primeira vez no rio Nilo há 8000 anos [Hoffman 1990]. A irrigação é responsável por fixar populações nas regiões áridas e semi-áridas do planeta, a exemplo do que ocorre na área semi-árida da região Nordeste do Brasil, onde as chuvas são escassas e concentradas em um curto período e com intensidade e frequência variada. Atualmente, em torno de 20% da área cultivada mundialmente depende da irrigação [Walker 1987]. Este quadro ressalta a importância da tecnologia de irrigação na oferta de água para a agricultura. Para atender à demanda com uma reserva de água em declínio, a conservação e o uso eficiente da água são críticos. Apesar destes fatos, estudos extensivos das relações água/planta/solo só foram realizados a partir do início deste século [Doneen 1984]. O **gerenciamento da irrigação** baseia-se no uso destas relações para melhorar a produção agrícola, aumentar a eficiência no uso dos recursos e assegurar maior proteção ao meio ambiente.

A maneira mais antiga e mais comum de irrigação é a **irrigação por superfície**, por apresentar baixos custos de implantação e operação. Uma de suas modalidades é a **irrigação por sulco**, na qual a aplicação da água é feita através de pequenos canais inclinados. Quando controlada manualmente, a irrigação por sulco é caracterizada por uma baixa eficiência no uso da água, levando a perdas inaceitáveis por escoamento e infiltração profunda. Devido à crescente demanda por água, a exemplo do que ocorre na região semi-árida do Nordeste do Brasil, para que este método de irrigação seja viável deve contar com um gerenciamento mais preciso do uso da água.

1.3 OBJETIVO: CONTROLE E OTIMIZAÇÃO DA IRRIGAÇÃO POR SULCO

Segundo a Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem ICID², *“a automação da irrigação consiste no uso de comportas, estruturas, válvulas, controladores e outros dispositivos e sistemas, para mudar automaticamente a aplicação de água entre áreas irrigadas na quantidade e seqüência desejadas”* [Framji 1986]. Ainda segundo o ICID, os sistemas automatizados podem reduzir a mão de obra, energia, e quantidade de água aplicada e manter, ou mesmo aumentar, a eficiência da irrigação.

O controle manual da aplicação de água, até por uma questão de conveniência, pode levar à aplicação da água em déficit ou em excesso. Por sua vez o gerenciamento inadequado da irrigação pode levar ao desperdício de grandes volumes de água, prejudicar o desenvolvimento das culturas,

¹ GPS- *Global Positioning System*, sistema que utiliza satélites para fornecer a localização precisa (erro < 100m) de um objeto sob monitoração.

² ICIDC – *International Commission on Irrigation and Drainage*.

causar lixiviamento³ dos nutrientes do solo e contaminar lençóis freáticos, açudes e rios com produtos agroquímicos.

Com a automação, a irrigação com diferentes períodos de duração pode ser realizada de acordo com as condições do solo e as necessidades da cultura irrigada. Embora a redução de mão de obra não seja o principal fator motivador para a automação da irrigação em países em desenvolvimento, deve-se destacar seus efeitos sobre a otimização do uso da água, e sobre o aumento da produtividade das terras irrigadas.

Quando comparada à automação de outras modalidades de irrigação (irrigação localizada, irrigação por aspersão, etc.) a automação de sistemas de irrigação por sulco é mais complexa, porque a água deve ser distribuída uniformemente para muitos sulcos em paralelo. Isso requer o controle de um número elevado de saídas de água em uma mesma área irrigada. A automação da irrigação por sulco é uma prática já estabelecida, pelo menos nos países desenvolvidos. Por outro lado, a otimização da eficiência deste tipo de irrigação, usando simulação em tempo real, ainda está restrita ao campo experimental.

Uma dificuldade na otimização da irrigação por sulco resulta da alteração temporal e espacial das características de infiltração de água no solo. De uma sessão de irrigação para outra, e de um campo irrigado para outro, as características de infiltração podem variar de forma significativa. Esta variação torna mais complexa a determinação da infiltração e, portanto, a otimização de uma sessão de irrigação.

1.4 MOTIVAÇÃO PARA ESTE TRABALHO

A otimização da irrigação por sulco é uma questão multi-disciplinar, exigindo soluções tanto no âmbito de Engenharia Agrícola quanto de Engenharia Elétrica. Do ponto de vista de Engenharia Agrícola, a modelagem matemática da irrigação e a técnica para a identificação dos coeficientes de infiltração são já comprovadas e disponíveis na literatura [Walker 1987, Azevedo 1992, Bautista 1993a]. Por outro lado, do ponto de vista de Engenharia Elétrica, existem aspectos tanto de hardware quanto de software que deverão ser pesquisados com o objetivo de viabilizar a otimização desta forma de irrigação a partir de um sistema de controle automático em tempo real. Estes aspectos são apresentados a seguir e são discutidos em mais detalhes em outros capítulos deste trabalho.

Hardware

Um sistema automatizado para o controle e otimização da irrigação por sulco envolve o uso de sensores, atuadores, estações de campo, redes de comunicação de dados, e computadores centrais. Com exceção dos computadores centrais, todos os outros equipamentos operam em condições hostis no campo, ficando sujeitos a grandes variações de temperatura, umidade, poeira, ruído

³Lixiviamento –separação, por meio de lavagem, dos sais contidos no solo.

eletromagnético e a danos causados por máquinas agrícolas e a ataque de animais silvestres. São importantes, portanto, os aspectos de robustez e facilidade de manutenção destes sistemas. Observa-se nos países em desenvolvimento a investigação de tecnologias alternativas, que utilizam materiais localmente disponíveis de modo a reduzir custos e agilizar a rotina de manutenção. Tal estratégia ajuda a tornar os sistemas de controle mais acessíveis aos pequenos e médios produtores rurais.

Para que seja adotada uma técnica de otimização da irrigação por sulco é necessária a detecção da presença de água em diversos pontos de cada área irrigada. Para tanto é necessário desenvolver redes de detetores de água capazes de cobrir centenas de metros de extensão. A instalação de um número elevado de estações de campo requer meios de energização e comunicação, de baixo custo e de fácil aquisição pelos proprietários agrícolas. Atualmente, enlaces de rádio e painéis solares oneram as estações de campo e as tornam difíceis de serem adquiridas pela maioria dos agricultores. Para a otimização da irrigação por sulco, também faz-se necessário o controle preciso da entrada de água nos sulcos, utilizando comportas ou válvulas.

Software

Atualmente, na automação agrícola baseada em sistemas centralizados, cada sistema é composto de hardware e software proprietários. Nesta situação, o software de controle no computador central, lida com configurações específicas de dispositivos no campo, levando às seguintes dificuldades.

Falta de integração entre sistemas de controle de processos agrícolas, que dificulta ou mesmo impossibilita a interação entre eles. Esta falta de integração dificulta a gestão global dos diferentes processos em uma empresa agrícola, particularmente em situações nas quais estejam envolvidos diferentes contextos de controle da produção. Este problema agrava-se à medida que o número de sistemas independentes aumenta em cada instalação agrícola. Um exemplo de situação que poderia beneficiar-se da integração entre sistemas seria aquele em que um sistema desenvolvido para monitorizar a relação água/solo/planta dos cultivos pudesse interagir diretamente com outro sistema de controle de irrigação, o qual por sua vez pudesse interagir com um terceiro sistema para controle da distribuição de água nos canais de irrigação.

Uma outra dificuldade é a falta de transparência na localização e acesso aos dispositivos. Os detalhes de implementação e métodos de localização e acesso aos dispositivos usados no campo são codificados no software de controle. Como consequência, cada sistema só pode ser estendido ou atualizado através de pacotes compatíveis com os originais limitando a capacidade de incorporar componentes alternativos de hardware ou software.

1.5 TRABALHO DE PESQUISA

Este trabalho consistiu na investigação de alternativas de hardware para o controle da irrigação por sulco, que apresentasse características tais como baixo custo e robustez para instalação no ambiente agrícola. Do ponto de vista de hardware, foram estudadas alternativas de construção de

dispositivos sensores e atuadores a serem utilizados no controle da irrigação por sulco; construção de estações de campo, técnicas para comunicação de dados e para a integração do hardware utilizado na coleta de dados. Do ponto de vista de software foram investigadas abordagens para o desenvolvimento de software que fossem adequadas ao desenvolvimento de aplicativos para o controle distribuído, em tempo real, da irrigação por sulco. A abordagem a ser adotada deveria ainda possibilitar a integração de software proprietário para modelagem de processos agrícolas em uma plataforma de software para simulação e controle.

Este trabalho envolveu o uso de um modelo matemático capaz de descrever o deslocamento da água no sulco e sua infiltração no solo; além de ser capaz de considerar um conjunto de parâmetros relevantes a um projeto de irrigação. Detectou-se então a necessidade de uma plataforma de software que apoiasse o estudo de alternativas de projeto de irrigação, possibilitando considerações sobre a relação custo/benefício, robustez, disponibilidade de água, tipos de terreno, tipos de cultura, e que permitisse a incorporação de diferentes modelos do processo de irrigação. Assim, foram investigadas técnicas para simulação e monitorização do processo de irrigação, a apresentação de resultados na forma de gráficos, além de uma representação sinóptica do processo de irrigação. Neste trabalho, foi estudada a influência de erros nos parâmetros de entrada do modelo matemático adotado.

O trabalho resultou no desenvolvimento tanto de hardware quanto de software voltados para o controle da irrigação por sulco, que, devido às suas características, poderão ser aplicados no desenvolvimento de aplicações distribuídas em outros contextos da automação agrícola. Do ponto de vista de hardware foram construídos sensores para determinar a presença de água no sulco e permitir o controle da entrada de água no sistema de irrigação. O hardware foi desenvolvido com características de baixo custo e robustez para instalação no ambiente agrícola. Do ponto de vista de software, foi desenvolvido um programa para controle em tempo real da irrigação por sulco, baseado em um modelo matemático da irrigação por sulco e em dados coletados do campo. O software oferece recursos para a simulação e visualização simultânea, na forma gráfica, de dados sobre a evolução do processo de irrigação.

Foram também investigados aspectos de integração de hardware e software que possibilitassem um controle distribuído e em tempo real visando a integração em um sistema mais abrangente de automação agrícola. Um sistema de software, denominado *FarmWeb*, foi construído para oferecer suporte ao desenvolvimento de aplicações integradas de automação agrícola e de controle em tempo real. Este sistema propõe-se a servir de plataforma para estudos de alternativas de controle, a partir da simulação dos processos agrícolas a serem controlados e também como base para sistemas de controle que possam ser usados em aplicações reais. Trata-se de um sistema que oferece uma interface gráfica desenvolvida segundo critérios de usabilidade; mecanismos para comunicação entre aplicações; recursos para multiprocessamento e um conjunto de serviços de suporte às aplicações que facilitam o seu desenvolvimento. Este sistema também poderá ser utilizado para fins didáticos, se for utilizado em conjunto com programas para simulação de processos agrícolas, tais como a irrigação. Na sua versão atual, o sistema *FarmWeb* é voltado para o controle da irrigação por sulco.

1.6 APRESENTAÇÃO DA TESE

Esta tese está organizada em seis capítulos, incluindo este capítulo de introdução.

No capítulo 2 apresenta-se conceitos associados à automação agrícola e à integração de aplicações de controle, seguidos de uma descrição da irrigação por sulco e sua automação.

No capítulo 3 descreve-se o sistema de automação agrícola FarmWeb. O capítulo inicia com uma descrição da sua arquitetura, seus mecanismos de comunicação e gerenciamento distribuído de objetos e mecanismos para recuperação de falhas. Em seguida é discutida a interface com o usuário do sistema, apresentando o estilo de interação. Sua conclusão é feita com uma apresentação dos serviços que o sistema oferece para facilitar o desenvolvimento de aplicativos de controle.

No capítulo 4 descreve-se o controle da irrigação por sulco e sua otimização em relação ao consumo de água. Inicia-se com uma descrição das diferentes estratégias de controle adotadas neste trabalho. Em seguida há um estudo sobre a sensibilidade destas estratégias de controle em relação a atrasos na leitura dos sensores e erros na medição da entrada de água e nos parâmetros usados no modelo matemático adotado na simulação. Conclui-se este capítulo 4 com uma descrição dos aplicativos de controle que foram desenvolvidos para a irrigação.

No capítulo 5 descreve-se o *hardware* que foi desenvolvido para dar suporte ao controle da irrigação por sulcos. Inicialmente são discutidas as alternativas de controle da entrada de água. Em seguida são apresentados os dispositivos detetores e sensores de água desenvolvidos para acompanhar o deslocamento de água nos sulcos. Finalmente é apresentada uma estação de campo baseada em microcontrolador e que oferece os dispositivos utilizados pelo aplicativo de controle.

Finalmente, no capítulo 6 apresenta-se as conclusões deste trabalho de tese e aponta-se possibilidades de trabalhos futuros para a continuidade da pesquisa.

2 AUTOMAÇÃO AGRÍCOLA

A automação tem sido aplicada a diversos processos agrícolas, a exemplo do controle ambiental de aviários e estufas, nas condições de uso de silos e na irrigação. Neste capítulo apresentam-se, inicialmente, conceitos básicos relativos aos sistemas de automação agrícola e discutem-se meios para integração destes sistemas. Em seguida, são descritas alternativas para o controle automático da irrigação por sulco. Finalmente, são tecidas considerações sobre a operação de hardware instalado no campo.

2.1 SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO AGRÍCOLA

Dentre os objetivos da automação agrícola estão o aumento da produtividade, a melhoria da qualidade dos produtos agrícolas e a proteção do meio ambiente [Neto 1997]. Apesar de reduzir a demanda por mão-de-obra, efeito duramente criticado pelos trabalhadores, particularmente nas regiões em desenvolvimento, a automação agrícola também pode levar a uma melhoria nas condições de trabalho no campo, reduzindo longas jornadas de trabalho dos trabalhadores rurais e viabilizando a adoção de soluções mais eficazes, de outra forma impraticáveis. De um modo geral, os sistemas de automação agrícola podem ser classificados em local, local supervisionado, centralizado e distribuído. A seguir são descritas cada uma destas configurações.

2.1.1 Automação Local

Atualmente, a maioria dos sistemas de automação agrícola é do tipo local. Estes sistemas utilizam controladores programáveis dedicados ao controle de processos ou de ambientes agrícolas específicos, conforme ilustra a Figura 2-1. Originalmente estes controladores eram eletro-mecânicos [Fischbach 1979]. Atualmente os controladores programáveis são baseados em microcontroladores ou microprocessadores, oferecendo maior confiabilidade e precisão e um maior número de opções de controle. Um dos primeiros sistemas que utilizou o microprocessador na automação local da irrigação é descrito em [Lillevik 1979]. Nos sistemas atuais, as opções de controle são tipicamente selecionadas pelo usuário através de um teclado do tipo membrana e de um visor de cristal líquido [Deho 1991].

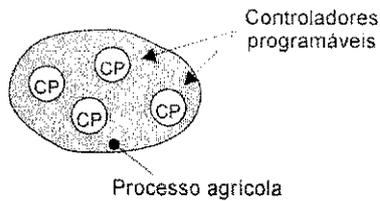


Figura 2-1: Automação local

2.1.2 Automação Local Supervisionada

Na automação local supervisionada os controladores programáveis são conectados a um computador central por meio de fios ou por enlace de rádio ou radiação infravermelha, conforme ilustra a Figura 2-2:

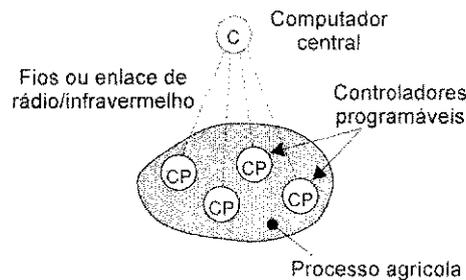


Figura 2-2: Automação local supervisionada

O computador central faz o papel supervisor, através do qual um operador pode monitorar à distância o estado de sensores e fazer alterações na sua programação, a exemplo do sistema GAL, descrito em [Deho 1991]. Uma característica importante da automação local supervisionada é que o algoritmo de controle reside em estações de campo e portanto seu processamento continua no caso de falha do computador central ou do enlace de comunicação.

2.1.3 Automação Centralizada

Na automação centralizada (ver Figura 2-3), o controle dos processos é efetuado por estações de campo, conectadas a um computador central através de fios, enlace de rádio ou luz infravermelha, a exemplo do sistema ARFIS [Latimer 1990] e do sistema Geo255 [Gil 1999].

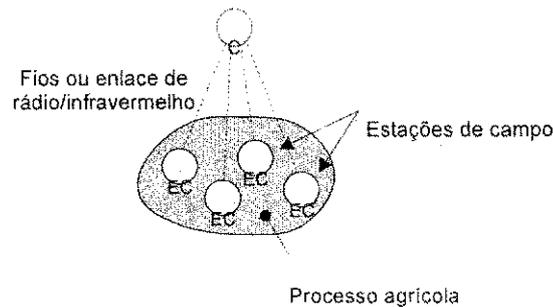


Figura 2-3: Automação centralizada

Diferentemente de um controlador programável, uma estação de campo não dispõe de interface para programação e opera de forma dependente do computador central, uma vez que o algoritmo de controle reside no computador central. O computador central executa um software específico de controle; possui portas de comunicação para acesso a sensores e atuadores⁴ os quais por sua vez executam instruções remotas do software de monitorização e controle .

Estações de Campo

Estações de campo são unidades remotas de entrada e saída, localizadas onde quer que seja necessária a aquisição de dados (por meio de sensores), armazenamento e transferência, e o acionamento de dispositivos e equipamentos de controle, por meio de atuadores. Os dados são armazenados para envio posterior, quando solicitados pelo sistema de monitorização ou controle, através de uma porta de comunicação.

As estações de campo mais simples consistem em plataformas remotas de entrada/saída, enquanto as mais complexas executam algoritmos de controle sob a direção do computador central. Algumas estações de campo são capazes de realizar o pré-processamento dos dados, como calcular a média dos parâmetros registrados (*dataloggers*) para transferência futura na forma de arquivo. Outras executam programas de controle específicos. Sua configuração depende da finalidade de utilização. Para atender aos requisitos de uso no campo, este equipamento deve possuir dimensões reduzidas e apresentar um baixo consumo.

Comunicação entre Estação de Campo e o Computador Central

Os processos agrícolas em geral e as áreas de irrigação em particular, são distanciados centenas ou milhares de metros do centro de controle, onde localiza-se o computador central. Uma vez coletados, os dados armazenados nas estações de campo são disponibilizados para transferência para o centro de controle, por meio físico, através de fio, como descrito em [Turnell 1997]; ou por meios de transmissão à distância tais como: telemetria por modem ou satélite, ou ainda por rádio-frequência ou luz infravermelho, como nos sistemas ARFIS [Latimer 1990], GAL [Deho 1991] e GIL [Gil 1999].

A comunicação sem fio, especialmente quando acompanhada pela energização por painéis solares, torna as estações de campo portáteis e independentes da rede elétrica. Por outro lado, a comunicação sem fio tem algumas desvantagens, como seu maior custo, devido aos subsistemas de transmissão/recepção, e maiores dimensões físicas, devido à necessidade de uma estrutura que eleve as antenas/receptores acima de obstáculos locais. Esta estrutura também apoia painéis solares e alguns dos sensores pertencentes à estação, como nos sistemas ARFIS, GAL e GIL, já citados. Além disso, os receptores/antenas estão sujeitos a danos físicos no ambiente do campo. Estas considerações, fazem

⁴ Atuadores são dispositivos utilizados para conversão dos sinais elétricos de controle, proveniente dos controladores, em ações requeridas pelo controle dos sistemas (pneumáticos, hidráulicos, elétricos tais como motores, válvulas e chaves).

com que a comunicação sem fio seja mais apropriada para estações de campo de maior porte que estão localizadas a grandes distâncias dos computadores centrais.

Por sua vez, a comunicação por fio é mais apropriada para distâncias até 1 km. Embora a instalação de enlaces por fio possa se tornar inconveniente, em termos de conexão e instalação entre múltiplos sulcos no campo, a energização destas estações pode ser feita através do próprio fio. Uma vez instalado o enlace, o custo por nó, para adicionar novas estações de campo pode ser baixo [Turnell 1997], comparado ao custo de adicionar novas estações ao enlace de infravermelho ou rádio. Devido ao baixo custo, estas estações são mais adequadas à visão da agricultura de precisão, na qual um grande número de estações poderá ser instalado para atender aos diversos processos que compõem um ambiente agrícola. Segundo Duke [1992], são necessários métodos de telemetria, de baixo custo e de baixo consumo, para telemetria de dados sobre curtas distâncias (1- 2 km). A Tabela 2-1 compara os sistemas de comunicação mais comuns nas estações de campo utilizadas no ambiente agrícola.

Tabela 2-1: Comparação dos sistemas de comunicação

Comunicação	Fios	Rádio (VHF)	Infravermelho
Custo da rede	Baixo	Alto	Médio
Dimensões	Pequenas	Grandes	Grandes
Alcance	1 km	400 m a 3 km	800 m – 2 km
Robustez	Média	Alta	Alta
Confiabilidade	Alta	Média	Alta
Manutenabilidade	Alta	Média	Média

Na comunicação por infravermelho os enlaces são limitados em alcance até 2 km e estão restritos à linha de visão. Os enlaces de rádio têm maior alcance. No sistema GIL, por exemplo, os enlaces de rádio alcançam até 3 km, com encadeamento das estações para distâncias maiores. A confiabilidade da comunicação por rádio é reduzida pelo ruído produzido pelas linhas de transmissão, por equipamentos elétricos e outros sinais de rádio, limitando seu alcance. Para que estes problemas sejam superados é necessário utilizar sinais de alta potência, o que demanda uma licença especial de operação. Por sua vez, a comunicação por infravermelho é sensível à luz direta do sol.

As duas formas de comunicação (com fio e sem fio) são compatíveis com o modelo de automação proposto neste trabalho para FarmWeb. Entretanto, neste trabalho concentrou-se na comunicação por fio, pelas considerações tecidas acima, que parece atender melhor ao modelo de automação agrícola do futuro. Neste modelo dezenas de estações de baixo custo são conectadas em diversas redes e distribuídas no campo para atender ao controle de diversos processos. A vantagem da comunicação por fio é seu custo da implantação por nó que torna-se menor na medida que a rede de estações torna-se maior. Na comunicação por enlace de rádio/infravermelho o custo por nó é fixo.

2.1.4 Automação Distribuída

As tecnologias de redes de comunicações desempenham um papel importante na transição da época industrial para a época da informação. Redes de computadores e computação distribuída já fazem parte integrante da automação industrial (a exemplo das redes MAP⁵, usadas na produção automobilista). No entanto, sistemas distribuídos no contexto de automação agrícola ainda são escassos, apesar de se mostrarem vantajosos para aplicação neste contexto. Situações de automação nas quais estações de campo são capazes de realizar o pré-processamento dos dados coletados, executam instruções remotas do software de monitorização e controle, ou executam localmente algoritmos de controle sob a direção do computador central, configuram-se como sistemas distribuídos de computação (ver Figura 2-4). A automação agrícola é uma aplicação inerentemente distribuída e como tal requer um sistema distribuído que ofereça suporte para sua operação, que possibilite o compartilhamento de informação entre diferentes nós do sistema e consequentemente aumente sua confiabilidade e sua disponibilidade.

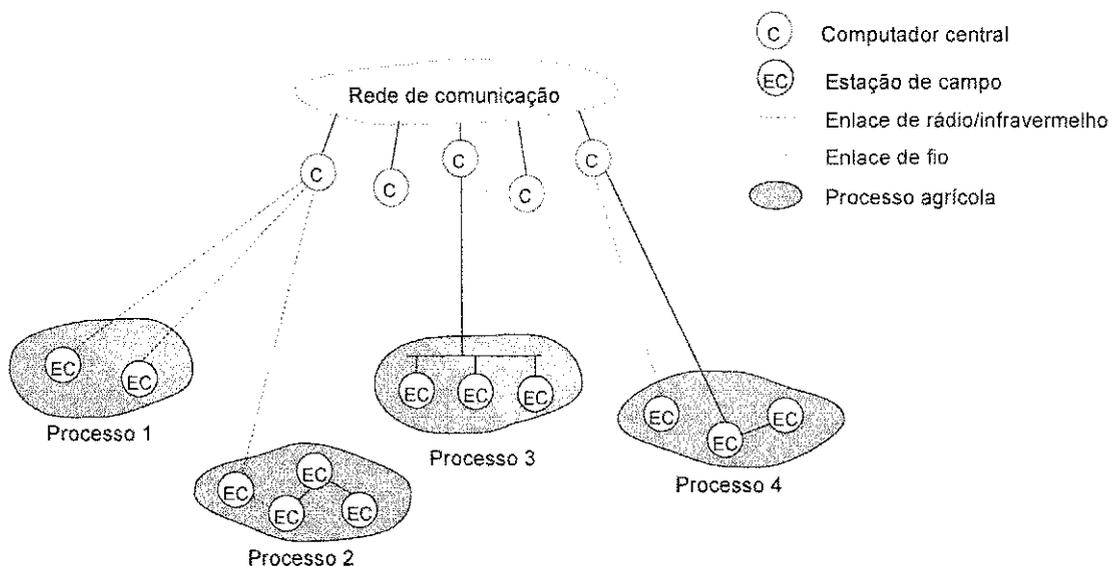


Figura 2-4: Automação distribuída

Por outro lado, observa-se o crescimento no número de sistemas de automação para diferentes contextos e disponíveis para instalação no ambiente agrícola, levando à necessidade de um maior nível de integração entre estes sistemas. Um dos aspectos desta demanda por integração decorre da necessidade de integrar dados obtidos de diferentes fontes, tais como dados de mercado, previsão de tempo, incidência de pragas, entre outros, objetivando adequar o perfil de operação dos processos agrícolas. Estas informações estão disponíveis em diferentes fontes, inclusive na rede mundial de computadores (*World Wide Web*), mas o acesso às informações e sua utilização por algoritmos de controle ainda está em fase de pesquisa. Um outro aspecto que demanda integração, é o acompanhamento remoto de atividades no campo, possibilitando o acesso, em tempo real, a

⁵ MAP - *Manufacturing Automation Protocol*

informações sobre a produção, não apenas local, mas também acesso remoto a qualquer ponto geograficamente remoto, que possa ser conectado a uma rede externa, pública ou privada. Este nível de integração possibilitará que um sistema de automação, enquanto supervisor de processos, atue como uma interface entre o ambiente de produção e a gerência do processo agrícola. Finalmente, a tolerância a falhas é um aspecto fundamental na automação agrícola. Segundo Gelb, uma das desvantagens potenciais de um sistema computadorizado para controle da irrigação- CCIS – é que uma falha no sistema de computação pode interromper a irrigação [Gelb 1994]. Assim, estes sistemas poderiam se beneficiar do conceito de distribuição, uma vez que seria possível duplicar e distribuir recursos, aumentando assim a confiabilidade do sistema.

2.2 INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO

Nesta seção, apresentam-se e discutem-se aspectos relativos a integração de sistemas de computação em geral, e mais especificamente de sistemas de automação. Estes conceitos serviram de suporte às escolhas para a integração que foram adotadas no contexto deste trabalho. Apesar do caráter de revisão desta seção, é importante que seja esclarecido o escopo da integração tratado neste trabalho. Para tanto é necessário definir o conceito de integração que será adotado e desenvolvido neste trabalho. O termo integração significa transparência e homogeneidade nos mecanismos de comunicação utilizados para realizar a interação entre aplicativos de controle e, entre estes aplicativos e os dispositivos de controle.

Este conceito pode ser ilustrado através da Figura 2-5, na qual é apresentado um caso hipotético de integração, no qual diversos aplicativos de controle e gerenciamento cooperam para a otimização da produção avícola.

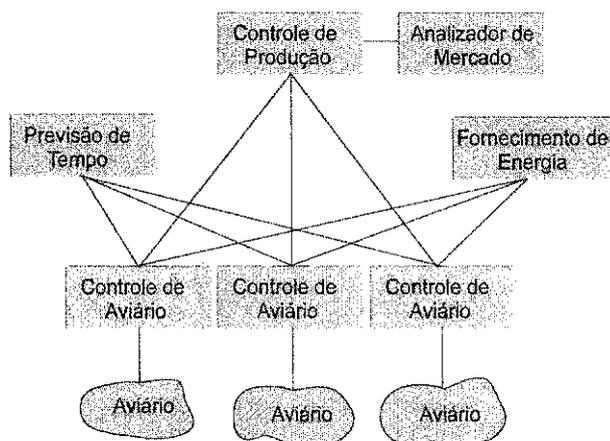


Figura 2-5: Exemplo de integração de sistemas

Neste exemplo, cada aviário é controlado por um aplicativo que utiliza simulação para otimizar o controle ambiental. Os aplicativos de controle são apoiados em sua tarefa por um aplicativo de previsão de tempo, que utiliza dados obtidos de uma estação meteorológica remota via telemetria e por satélite, para realizar previsões de curto prazo sobre as condições no campo, tais como: temperatura,

umidade e radiação solar. Um outro aplicativo de gerenciamento de energia fornece informações sobre a disponibilidade e o custo de energia, buscando combinar as previsões de demanda com a disponibilidade de energia elétrica comprada da rede pública e a energia obtida de fontes alternativas. Um aplicativo de controle de produção faz análises de custo e benefício para determinar o perfil geral da produção, apoiado por um aplicativo de análise de mercado, o qual fornece dados e previsões sobre o preço do produto final e dos insumos utilizados na produção, tal como a ração animal. Outros componentes poderiam ser adicionados ao sistema para controlar e gerenciar outros processos agrícolas tais como a irrigação. Em sistemas de médio e grande porte podem existir dezenas de aplicativos, exigindo um nível alto de interação entre si.

Um exemplo de outra situação que se beneficiaria da integração é aquele no qual um aplicativo para monitorização da relação água-solo-planta pode interagir diretamente com outro aplicativo que controla a irrigação, o qual por sua vez pode interagir com um terceiro aplicativo que controla a distribuição de água nos canais de irrigação.

As situações descritas acima ilustram apenas alguns aspectos de sistemas de integração. Nestas situações de integração, os aplicativos podem compartilhar serviços comuns oferecidos por uma plataforma hospedeira, através de uma interface com o usuário comum a todos os aplicativos, de modo a facilitar a utilização do sistema. Estas reflexões conduzem a soluções, tais como o sistema FarmWeb e o hardware genérico, que são apresentadas neste trabalho.

2.2.1 Centralização e Distribuição

Na configuração atual dos sistemas centralizados de automação agrícola, cada processo é controlado por um pacote proprietário de software e hardware⁶. Nesta configuração, os computadores centrais são, hospedeiros de um conglomerado de sistemas individuais que executam algoritmos de controle sofisticados. Dentre as limitações desta configuração destacam-se:

- *Falta de interação entre sistemas.* A menos que os sistemas de automação de diferentes processos tenham sido desenvolvidos por um mesmo grupo, com objetivos de integração, a capacidade de interação entre sistemas independentes é praticamente inexistente. Ou seja, estes são sistemas fechados.
- *Sobrecarga do operador.* A capacidade de um operador lidar, em tempo real, com diversos sistemas de automação, independentes e incompatíveis, é bastante limitada. Essa dificuldade é agravada pela diferença de estilos de interface com o usuário.
- *Duplicação de funcionalidade.* A falta de integração resulta em elevada duplicação de funcionalidade. Ainda que funções de suporte, a exemplo da geração de gráficos e recursos para análise numérica estejam presentes em um sistema de automação, o projeto de um novo sistema implicaria na sua implementação, mais uma vez; aumentando desnecessariamente o custo do

⁶ Pacote proprietário de *hardware* e *software* –o sistema não obedece a um padrão conhecido, impossibilitando que o todo, ou as partes que o compõem, possam ser incorporados em sistemas que utilizem padrões diferentes

sistema. Visando superar estas limitações, este trabalho investiga o desenvolvimento e integração de sistemas distribuídos de automação agrícola. Uma das vantagens de um sistema integrado é eliminar a duplicação de funcionalidades através de objetos de apoio e serviços de suporte implementados como parte de uma plataforma.

Entende-se por um **sistema integrado de automação agrícola**, um sistema composto por múltiplos computadores conectados em rede, cada um com uma plataforma de execução, capaz de suportar aplicativos de controle e gerenciamento, e que ofereça ferramentas e gerentes de dispositivos. No contexto atual da automação agrícola, o termo 'integrado' é usado num sentido mais restrito para descrever aqueles sistemas que incorporam uma faixa larga de sensores e atuadores [Neto 1997].

A arquitetura de um sistema de computação distribuído consiste de múltiplos processadores interconectados. Eles podem ser fortemente acoplados, quando a comunicação dá-se por memória compartilhada, ou levemente acoplados, quando possuem memória local independente e comunicam-se através da passagem de mensagens. Os sistemas abertos são normalmente sistemas levemente acoplados [Sinha 1997].

Aplicações inerentemente distribuídas, tais como a automação, requerem um sistema distribuído para sua realização. Nestes sistemas ocorre o compartilhamento de informação e de recursos de hardware e software, entre usuários distribuídos em diferentes nós do sistema. Decorre deste compartilhamento uma melhor relação custo-benefício do que aquela de um grande sistema centralizado. Observa-se ainda: menores tempos de resposta do sistema; maior flexibilidade para atender às necessidades dos usuários a partir de um conjunto maior e mais variado de recursos; maior extensibilidade, ou seja, capacidade de expansão incremental na qual a adição de recursos não interrompe o funcionamento do sistema; maior confiabilidade decorrente da maior tolerância a erros e falhas de componentes graças à multiplicidade de componentes e uma maior disponibilidade, isto é, maior fração de tempo durante a qual o sistema está disponível para uso.

Comparados aos sistemas distribuídos, os sistemas centralizados oferecem maior segurança no acesso aos dados, facilitam o controle de integridade e oferecem maior funcionalidade para gerência dos sistemas. Por outro lado, a falha de um componente de hardware ou software pode comprometer todo o sistema [Simon 1996].

Por sua vez, os sistemas distribuídos possibilitam o compartilhamento de informações e recursos sobre uma ampla área geográfica, permitindo ao projetista otimizar a localização dos componentes do sistema. Aumentam a autonomia local dos componentes quando comparados a um sistema centralizado e aumentam a confiabilidade e disponibilidade do sistema, uma vez que em um sistema distribuído, múltiplos componentes do mesmo tipo podem ser configurados para 'falhar' independentemente, tornando as falhas localizadas e assegurando um nível mais alto de tolerância a faltas. Ressalte-se ainda, o aumento no desempenho global do sistema devido ao suporte ao paralelismo. Suas principais desvantagens devem-se à complexidade na gerência de recursos e à implementação de mecanismos de segurança.

2.2.2 Integração de Sistemas

A integração de sistemas, tanto do ponto de vista de *hardware* quanto de *software*, supõe transparência na visibilidade dos componentes distribuídos. Segundo Simon, em [Simon 1996], esta transparência refere-se, dentre outras, às seguintes características:

- *Transparência no acesso*, o acesso aos recursos remotos deve parecer local.
- *Transparência na localização* – a localização dos recursos remotos deve ser desconhecida. Estes recursos devem ser acessados por nomes.
- *Transparência na concorrência*, o acesso paralelo a recursos remotos não deve ser percebido.

Aplicações em tempo real, tal como o controle de processos, são inerentemente distribuídas e têm requisitos rigorosos de tempo real e de confiabilidade, tal como tolerância a falhas. Para lidar com restrições de tempo real, algoritmos de escalonamento devem dar prioridade a processos com compromissos, ou ainda abortar processos que retêm um recurso, se um processo com um grau de prioridade maior requisitá-los [Stankovic 1994].

Segundo [Casavant 1994], um dos grandes desafios dos sistemas distribuídos é a concepção de software distribuído que funcione e de modo mais confiável. Confiabilidade é o grau de tolerância a erros e falhas. A prevenção a falhas resulta de um projeto conservador que usa componentes altamente confiáveis e de um projeto sem ambigüidade. A tolerância a falhas emprega a detecção de erros e redundância para lidar com falhas e erros. Estas e outras características tornam o projeto dos sistemas integrados bastante complexo. Entretanto, esta complexidade pode ser adequadamente administrada pela aplicação dos princípios da Orientação a Objeto como no modelo apresentado a seguir.

Segundo [Duke 1992], a tecnologia de hardware é mais desenvolvida que a tecnologia de aplicação de controle. Esforços adicionais são necessários para integrar soluções de hardware com algoritmos de controle, que possam ser facilmente adotados na irrigação.

2.2.3 Modelo Objeto-Ação

O modelo Objeto-Ação é um modelo de comunicação de alto nível, no qual o sistema é visto como uma coleção de objetos, cada um disponibilizando um conjunto de operações [Jalote 1994]. Um pedido de operação é enviado ao objeto, o qual realiza a operação e devolve o resultado. A operação em si, pode ser considerada uma chamada remota de procedimento (RPC). Este modelo de comunicação está ganhando popularidade, tal como o RPC.

Neste modelo, o sistema consiste de muitos objetos, cada um deles encapsulando dados e possuindo métodos (operações) bem definidos para serem aplicados sobre estes dados. Os dados encapsulados podem ser acessados ou modificados apenas através dos métodos definidos para o objeto. Os objetos, em si, são instâncias típicas de uma classe geral de objetos. Este método de organizar um sistema é conhecido como orientação a objeto. Muitos componentes, ou entidades, em um sistema podem ser considerados objetos. Arquivos são um bom exemplo. Um arquivo em particular é uma instância de uma classe geral de arquivos. Para cada arquivo, são definidas operações

através das quais o arquivo pode ser manipulado, tais como: abrir, ler, escrever, fechar, etc. Em um sistema tradicional, em que o sistema não é organizado ou implementado na orientação a objeto, estas operações podem ser chamadas a subrotinas. Em um sistema orientado a objeto, estas operações são executadas por métodos definidos para um objeto arquivo.

Em um sistema orientado a objeto, um objeto exporta tipicamente alguns de seus métodos. Estes são os métodos que estariam disponíveis para outros objetos, ou processos fora deste objeto. Este modelo é adequado para sistemas distribuídos. Os objetos podem residir em diferentes nós. Um processo quando necessita executar um método em um objeto particular, envia uma mensagem para este objeto, que realiza uma ação ao executar o método (se o método estiver disponível externamente) e retorna o resultado. Em um sistema distribuído, isto torna-se uma chamada remota de procedimento, exceto pelo fato de que o procedimento é um método pertencente a um objeto particular e tem sua execução restrita a este objeto. A execução de um método sobre um objeto pode invocar métodos de outros objetos. Isto leva a chamadas aninhadas de procedimentos, nas quais uma chamada remota pode fazer um outra chamada remota. Em um sistema distribuído, também é possível que métodos de objetos possam ser executados em paralelo. Isto leva à possibilidade de que chamadas concorrentes possam ser feitas ao mesmo método, ou ao mesmo objeto.

O Modelo Objeto-Ação, está sendo cada vez mais utilizado e tem se mostrado muito útil no suporte à tolerância a falhas. Os aspectos de falhas dos nós são semelhantes aos de uma chamada remota de procedimento. Se um nó falha, os requisitos podem ser tais que os efeitos de um método parcialmente executado sejam desfeitos. Chamadas concorrentes podem exigir algumas restrições de como podem ser resolvidas. Objetos provêm naturalmente uma unidade para replicação. Objetos podem ser replicados para torná-los tolerantes a falhas.

2.2.4 Comunicação entre Processos

A integração requer compartilhamento de informação entre dois ou mais processos⁷ executados em diferentes computadores. Os mecanismos possíveis são o compartilhamento de dados ou passagem de mensagem. Uma vez que computadores configurados em rede não compartilham memória, neste caso, os processos comunicam-se pela passagem de mensagem [Jalote 1994]. A mensagem, consiste em um bloco de informações formatada pelo remetente, que contém um cabeçalho e dados. A comunicação pode ser local (intra-nó) ou remota (inter-nó) [Sinha 1997].

A chamada remota a um procedimento (RPC) é uma comunicação de natureza síncrona, embora use passagem de mensagem que é de natureza assíncrona. Isto ocorre porque o processo cliente é bloqueado até que o serviço complete-se, uma vez que o cliente não pode continuar até que receba o resultado. Primitivas *send/receive* são suficientes para programar a passagem de qualquer tipo de mensagem entre processos.

⁷ Processo – programa em execução.

2.2.5 Serviço de Nomes

O serviço de nomes é um componente importante de um sistema distribuído ao permitir a identificação de serviços e objetos e seu acesso. O serviço fornece ao usuário uma abstração de um objeto que esconde os detalhes de como e onde o objeto está de fato localizado na rede. É formado dos recursos de denominação e localização. O recurso de denominação habilita usuários e programas a denominar objetos e subseqüentemente referenciá-los através destes nomes. O recurso de localização mapeia o nome do objeto em um endereço do objeto no sistema distribuído [Sinha 1997]. O sistema de nomes desempenha um importante papel para atingir os seguintes objetivos em um sistema distribuído:

- *Transparência na localização* – o nome não deve revelar a localização física do objeto.
 - *Independência da localização* – o nome do objeto não deve mudar devido a mudanças de localização, causadas pela migração de objetos, ou a relocação dinâmica de objetos entre os nós.
 - *Transparência na replicação* – o usuário não deve estar ciente de que múltiplas cópias de um objeto estão em uso. Dado o nome de um objeto, o sistema de nomes retorna o conjunto de endereços das replicas dos objetos e assegura a eficiência na localização dos objetos a partir da localização da cópia mais próxima.
 - *Integração de Hardware* – facilita a comunicação entre computadores
- Além destas qualidades o sistema de nomes facilita também o compartilhamento de objetos.

2.2.6 Tolerância e Tratamento de Falhas

Um sistema é tolerante a falhas se o comportamento do sistema é consistente com sua aplicação a despeito de falhas nos seus componentes. O objetivo é evitar uma falha total do sistema, mesmo quando falhas estão presentes em seus subsistemas. Isto pode ser feito mascarando a presença das falhas a partir do uso de redundância [Jalote 1994]. A redundância pode ser no hardware (redundância de componentes), no software (incluindo software para gerenciar hardware redundante) ou no tempo (provendo tempo adicional para executar métodos de redundância).

As fases envolvidas na tolerância a falhas são: detecção do erro, confinamento do dano causado pelo erro, recuperação do erro e tratamento da falha. A detecção do erro deve ser seguida da avaliação do problema e da determinação dos limites de corrupção causados pelo erro. Em seguida, antes de iniciar o tratamento da falha, o componente defeituoso deve ser isolado. Na fase de recuperação do erro, o sistema é restaurado a um estado consistente. Duas estratégias utilizadas nesta fase são: 1) a recuperação que reverte os sistema a um estado anterior e, 2) a recuperação para frente, quando um estado anterior não estiver disponível. Esta estratégia de recuperação consiste em continuar adiante, tomando as medidas corretivas, até encontrar um estado livre de erros. Para que seja possível a recuperação de um estado do sistema é necessária a ordenação de eventos. Uma vez que uma propriedade dos sistemas distribuídos é a inexistência de um *clock* global, (cada sistema tem seu *clock*

independente), torna-se difícil a recuperação de estados. Uma solução adotada é a ordenação de eventos através de *clocks* lógicos.

2.2.7 Transparência no Acesso a Dispositivos

Na automação agrícola cresce a diversidade e a quantidade de dispositivos de campo. Paralelamente aumentam as estratégias de conexão destes dispositivos com os computadores centrais. Assim, um computador central pode estar diretamente conectado a dispositivos no campo através de redes com conexão física (através de um par de fios), ou por enlace de rádio ou radiação infravermelha. Este computador pode ainda estar conectado a estações de campo de forma individual, ou em rede. Por sua vez, as estações de campo podem estar conectadas a dispositivos individuais ou conectados em rede. A Figura 2-6 ilustra esta diversidade.

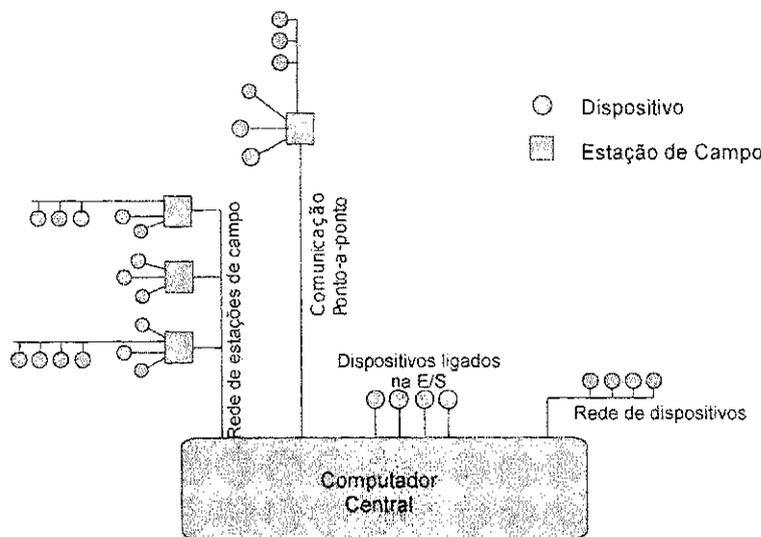


Figura 2-6: Diversidade na interligação de dispositivos de campo

Atualmente, nos sistemas de automação, há pouca ou nenhuma transparência no acesso aos dispositivos de campo. Nestes sistemas, o mecanismo de acesso aos dispositivos está embutido no código dos aplicativos de controle. Como consequência, os sistemas de automação consistem de pacotes fechados de hardware e software, isto é, o sistema como um todo ou seus componentes individuais não podem ser incorporados ou aproveitados em sistemas de maior porte.

O conceito de sistemas integrados proposto neste trabalho baseia-se no princípio da transparência de acesso e localização dos dispositivos de campo. Neste conceito os aplicativos necessitam conhecer apenas os tipos de dispositivo utilizados, dispensando detalhes sobre o método de acesso a eles.

2.2.8 Hardware Genérico

O conceito de hardware genérico, que é uma das bases que suporta o conceito de sistemas integrados proposto neste trabalho, foi desenvolvido com base no paradigma da orientação a objeto. De acordo com o conceito de *hardware* genérico, a funcionalidade dos dispositivos de campo mais comuns (como detetores, sensores, válvulas, etc.) seria encapsulada na classes de objetos genéricos

que os representam. Os aplicativos de controle podem então ser desenvolvidos para lidar com estes dispositivos genéricos (virtuais) ao invés de lidar com os dispositivos reais. Quando o mecanismo de hardware genérico é associado a um mecanismo de localização e acesso transparente aos dispositivos, o resultado é um sistema aberto com as seguintes vantagens:

- *Independência de hardware.* Os aplicativos de controle tornam-se independentes de detalhes locais do hardware. Assim, um aplicativo que faz o controle de uma casa de vegetação utiliza sensores e atuadores genéricos, desconhecendo detalhes sobre a localização e métodos de acesso relativos aos dispositivos reais.
- *Foco no desenvolvimento.* A utilização de dispositivos genéricos permite que especialistas em automação agrícola possam se concentrar na implementação de aplicativos de controle e gerenciamento, sem preocupar-se com detalhes de instrumentação e telemetria. Por outro lado, especialistas em telemetria e instrumentação podem concentrar-se em soluções de hardware, sem necessitar um conhecimento mais aprofundado em engenharia agrícola.

Agricultura de Precisão

Segundo Torre-Neto, em [Neto 1997], a **agricultura de precisão** representa o estado da arte em termos de sistemas centralizados de automação agrícola. A agricultura de precisão objetiva ajustar o controle ou manejo dos processos agrícolas a partir da identificação de variações espaciais nas condições do campo. Os sistemas mais avançados nesta área gerenciam culturas a partir de dados obtidos de satélite e de sensores no campo. Estes dados são utilizados para identificar e assimilar variações nas características do solo e no crescimento da cultura, normalmente com uma resolução espacial superior a cem metros. Nos sistemas mais avançados, máquinas agrícolas podem ser equipadas com GPS⁸ e computadores, interligados por enlace de rádio com o computador central. Essa conexão de sistemas permite o controle preciso do plantio e da colheita, bem como o controle da aplicação de fertilizantes e de agrotóxicos.

Apesar de resultar em uma maior eficiência na supervisão de um processo, a automação centralizada impõe limitações a eficiência de supervisão e controle de processos complexos, nos quais estejam envolvidos diferentes contextos de produção.

2.3 CONTROLE DA IRRIGAÇÃO POR SULCO

O controle ou manejo da irrigação, como é denominado na área de engenharia da irrigação, baseia-se no uso de relações água/planta/solo para melhorar a produção agrícola, aumentar a eficiência no uso dos recursos e assegurar maior proteção ao meio ambiente. O gerenciamento inadequado da irrigação pode levar ao desperdício de grandes volumes de água, prejudicar o desenvolvimento das culturas, causar lixiviamento dos nutrientes do solo e contaminar lençóis freáticos, açudes e rios, com

⁸ GPS - *Global Positioning System*

produtos agroquímicos. Portanto, o controle deve ser automatizado de modo a tornar a irrigação mais eficiente e competitiva com outros usos da água disponível, [Framji 1996]. Isto é possível porque a automação resulta em um controle mais preciso e eficiente da aplicação de água.

Antes de iniciar a discussão sobre o controle da irrigação por sulco, é apresentada neste tese uma breve descrição de outras formas de irrigação de modo a contextualizar esta prática. As formas mais usadas de irrigação são a irrigação localizada, a irrigação por aspersão e a irrigação por superfície, conforme ilustra a Figura 2-7:

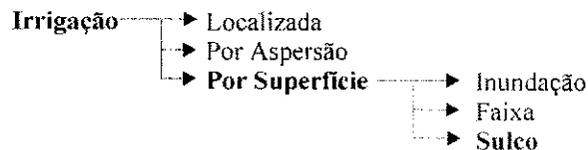


Figura 2-7: Técnicas de irrigação mais comuns

Na **irrigação localizada**, a água é distribuída, sob pressão, através de pequenos tubos flexíveis de polietileno. Gotejadores são instalados nos tubos no local de cada planta. O fluxo de água aplicado é pequeno, sendo necessárias aplicações longas e freqüentes para manter adequado o nível de umidade do solo em torno das raízes. Na irrigação localizada, a eficiência de uso da água é elevada, e seu uso é especialmente recomendado em 1) solos arenosos que apresentam um baixo nível de retenção de água e 2) áreas com inclinação acentuada. A água deve ser filtrada para evitar entupimento dos gotejadores. É comum que sistemas de irrigação localizada sejam equipados para “fertilização”, situação na qual pequenas bombas injetam adubos químicos na água a ser utilizada no processo.

Na **irrigação por aspersão** a água é aspergida sobre a superfície do terreno, de modo semelhante à chuva, devido ao fracionamento do jato d’água em gotas. O pivô central é uma forma da irrigação por aspersão. Em culturas sensíveis (como na floricultura) a irrigação por aspersão pode ser usada para esfriar o ambiente no período mais quente do dia. Em alguns locais, a irrigação por aspersão é combinada com a irrigação localizada.

A **irrigação por superfície** é a maneira mais antiga e mais comum de irrigação [Latimer 1990]. Nesta modalidade, a água é aplicada na área irrigada de modo a formar um lençol de vários centímetros de profundidade. A irrigação por superfície apresenta baixos custos de implantação e operação. Este método de irrigação pode ser classificado de acordo com o método de aplicação da água:

- *Irrigação por inundação* - áreas irregulares em volta de bacias hidrográficas são inundadas. Esta forma de irrigação é usada principalmente no cultivo de arroz.
- *Irrigação por faixa* - a água é aplicada uniformemente no topo de uma faixa inclinada de terreno. A lâmina de água deve cobrir a largura da faixa e descer lentamente ao longo de sua extensão para acumular-se no final da inclinação.

- *Irrigação por sulco*, a água é aplicada em pequenos canais inclinados (sulcos) que percorrem a extensão da área irrigada. Normalmente, a água que chega nos finais dos sulcos escoar para um canal de drenagem.

2.3.1 Irrigação por Sulco

A irrigação por sulco é uma prática adotada tanto nos países desenvolvidos quanto nos países em desenvolvimento. Nos Estados Unidos e na Rússia ela é utilizada em 60% da área irrigada [Varlev 1998]. No Brasil, segundo a Embrapa Semi-árido, a agricultura irrigada está transformando a economia do semi-árido nordestino, em economia competitiva, onde cerca de 600 mil ha da região são irrigados [Embrapa 1999]. Ainda segundo a Embrapa Semi-árido, nesta região, a irrigação por sulco foi adaptada, utilizando sulcos parcialmente fechados de modo a aumentar a eficiência da aplicação e reduzir as perdas de água por escoamento e por percolação.

Na irrigação por sulco, a aplicação da água dá-se através de pequenos canais inclinados (ver Figura 2-8). Este método é usado em plantios cultivados em fileira como o algodão, o milho e a batata. As plantações são cultivadas sobre leitos elevados e a água escorre nos dois lados dos leitos. A irrigação por sulco também tem sido usada para vinhas e pomares, onde sulcos múltiplos são colocados entre as fileiras plantadas. Os sulcos geralmente têm uma seção transversal parabólica ou em forma de V, tipicamente com altura entre 0,15 e 0,25 m; largura entre 0,2 e 0,4 m e separação de 1 m [Benami 1984].



Figura 2-8: Irrigação por sulco

Os sulcos apresentam pequena declividade (tipicamente entre 0,2 e 0,6%) e são abertos nos seus finais para que a água possa escoar livremente, evitando assim alagamento. A declividade dos sulcos faz com que a água desça pela força da gravidade na direção dos seus finais. A medida que avança, a água infiltra verticalmente e horizontalmente no solo. O comprimento ideal dos sulcos depende principalmente do tipo de solo e da declividade do terreno. De acordo com [Benami 1984], sulcos mais compridos são geralmente usados em solos argilosos porque a taxa de infiltração da água nestes solos é menor e a água avança mais rapidamente no sulco. O comprimento típico de um sulco é 120 m para solos arenosos e 400 m para solos argilosos. Por razões de custo da mão de obra, a tendência é construir sulcos o mais compridos possíveis. Uma característica desta forma de irrigação é a não uniformidade de infiltração de água no solo ao longo dos sulcos. Devido ao tempo considerável que a

água leva para alcançar a extensão total do sulco, a infiltração é sempre maior no seu início que no seu final.

Na irrigação por sulco, algum escoamento de água nos finais dos sulcos é inevitável. No entanto, se exceder níveis aceitáveis (prática comum) a eficiência no uso de água é comprometida. Alguns sistemas de irrigação por sulco são equipados para reutilizar este escoamento, bombeando-o de volta para o sistema de distribuição. A maioria dos sistemas, porém, não dispõe de tal recurso e o escoamento deve ser controlado, para que seja alcançada uma eficiência razoável.

As Fases da Irrigação por Sulco

Segundo [Walker 1987], a irrigação por sulco consiste de quatro fases distintas, descritas a seguir:

- A *fase de avanço* inicia-se quando a água começa a ser despejada nos sulcos e termina quando a água atinge os finais do sulco. A duração da fase de avanço é função do comprimento do sulco e do tipo e estado do solo, tendo duração típica de 1 a 3 horas.
- A *fase de aplicação* começa quando a água chega nos finais dos sulcos e continua até que a infiltração apropriada seja obtida nos finais dos sulcos. Tipicamente, a fase de aplicação tem uma duração três ou quatro vezes maior que a duração da fase de avanço.
- A *fase de depressão* começa quando a entrada de água é interrompida no início dos sulcos, e termina quando o nível de água aproxima-se de zero em algum ponto do sulco, normalmente no início. A fase de depressão dura poucos minutos.
- Na *fase de recessão* a secagem propaga-se ao longo do sulco. Esta fase dura tipicamente 20 minutos.

Estas fases são ilustradas na Figura 2-9, notando-se que a) a colocação do eixo de tempo no eixo vertical segue a norma usada por Engenheiros de Irrigação, e b) há duas curvas separadas na figura, a primeira sendo a curva de avanço A-C e a segunda sendo a curva de recessão B-C:

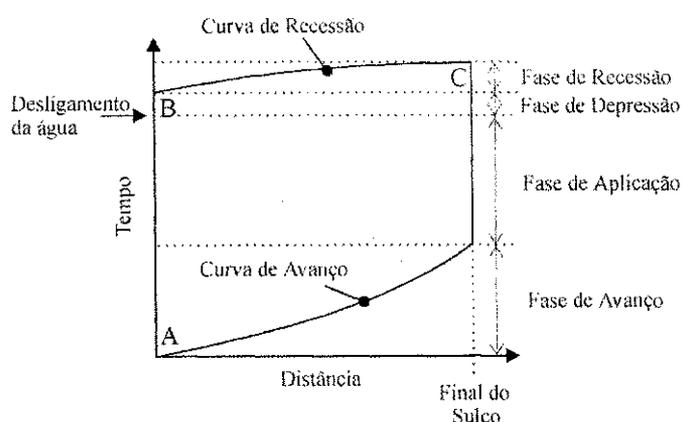


Figura 2-9: Quatro fases da irrigação por sulco

A Infiltração de Água no Solo

Uma característica da irrigação por sulco é a infiltração não uniforme de água no solo ao longo dos sulcos. Devido ao tempo considerável que a água leva para avançar ao longo da extensão do sulco, a infiltração é sempre maior no início que no final dos sulcos. A taxa de infiltração da água no solo depende de vários fatores, entre os quais estão o tipo do solo, sua umidade inicial e sua compactação. A Figura 2-10 apresenta as curvas de infiltração de água no solo e infiltração acumulada [Walker 1989], em função do **tempo de oportunidade**⁹. A taxa de infiltração (*I*) é representada por uma curva acentuada no início da irrigação, que aproxima-se após algumas horas, de um valor constante denominado **taxa básica de infiltração**.

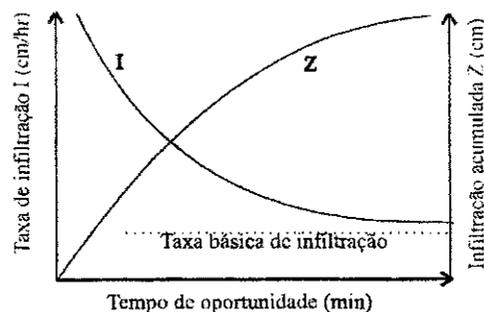


Figura 2-10: Curvas de infiltração e infiltração acumulada

A relação Kostiakov-Lewis, que descreve a infiltração de água no solo em função do tempo de oportunidade [Walker 1987] é dada por:

$$Z = k\tau^a + f_0\tau \quad (2.1)$$

em que f_0 representa a taxa básica de infiltração, k e a são parâmetros empíricos e τ é o tempo de oportunidade de infiltração. Ao longo deste texto, k , a , e f_0 serão referenciados como os coeficientes Kostiakov de infiltração.

A infiltração da água no solo é sempre menor no final do sulco uma vez que o tempo de oportunidade é menor neste ponto. Idealmente, uma irrigação é encerrada quando o nível desejado de infiltração de água é registrado nos finais dos sulcos. Na prática, a irrigação pode encerrar antes ou depois deste nível ser atingido. A Figura 2-11 ilustra as três possibilidades.

⁹ Tempo de oportunidade – tempo cumulativo de contato entre água e o solo, em um dado ponto do sulco

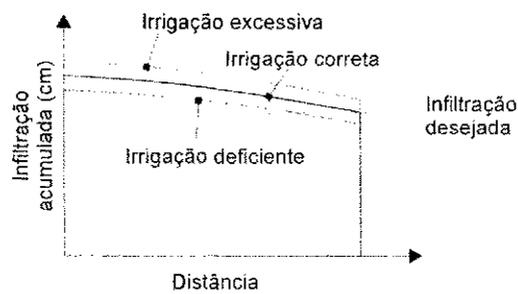


Figura 2-11: Escoamento e infiltração em função da duração da irrigação

Na irrigação deficiente a aplicação de água é encerrada antes que os finais dos sulcos apresentem a infiltração de água pretendida. Isso prejudica o desenvolvimento das plantas nos finais dos sulcos embora reduza as perdas de água por escoamento e por infiltração profunda. Na irrigação excessiva a irrigação é prolongada demais e toda a extensão do sulco recebe uma aplicação de água maior da desejada. A irrigação excessiva é consequência típica do manejo manual da irrigação por sulco, em que ajustes na entrada de água durante uma sessão de irrigação são feitas de acordo com a conveniência do trabalhador. A irrigação excessiva resulta em maiores perdas de água por escoamento e num aumento do nível de infiltração profunda, aumentando o risco de contaminação do lençol freático por produtos agroquímicos.

A Uniformidade e Eficiência da Aplicação de Água

Para fins de comparação e análise existem diversas medidas utilizadas na avaliação do desempenho da irrigação por sulco [Walker 1987]. Neste trabalho são usadas três, a primeira é a **Uniformidade de Distribuição (UD¹⁰)**:

$$UD = \frac{\text{Infiltração média nos últimos 25\% do sulco}}{\text{Infiltração média no sulco}} \quad (2.2)$$

Valores típicos obtidos para a UD estão na faixa de 0,7 a 0,9. A segunda medida de desempenho é a **Eficiência de Aplicação (E_A)**:

$$E_A = \frac{\text{Volume de água adicionada à zona dos raízes}}{\text{Volume de água aplicada ao campo}} \quad (2.3)$$

Valores típicos de E_A estão na faixa de 0,4 a 0,6 para o controle manual e 0,6 a 0,85 para o controle automático.

A terceira medida de desempenho é a **Relação de Percolação Profunda (RPP)**:

$$RPP = \frac{\text{Volume de percolação profunda}}{\text{Volume de água aplicada ao campo}} \quad (2.4)$$

¹⁰ *Distribution Uniformity*

Perdas por percolação profunda agravam o encharcamento do campo e causam problemas de salinidade, além de provocar a remoção de nutrientes do solo por lixiviação.

A quarta medida de desempenho é a **Relação de Escoamento (RE)** :

$$RE = \frac{\text{Volume de escoamento}}{\text{Volume de água aplicado ao campo}} \quad (2.5)$$

A menos que haja um sistema de reciclagem, uma RE alta significa um desperdício excessivo de água e, possivelmente, problemas de erosão do solo e remoção de nutrientes.

A Técnica 'Surge' de Aplicação de Água

Tradicionalmente, no controle da irrigação por sulco, a entrada de água é mantida constante durante a fase de avanço. Quando a infiltração de água no solo é elevada, o avanço da água no sulco torna-se lento, podendo chegar ao extremo de não atingir o final do sulco em um intervalo de tempo aceitável. Uma possível solução para esta situação é aumentar a entrada de água, mas na prática isso não é viável porque significa o uso de fluxos erosivos.

Uma alternativa é a técnica *surge* [Walker 1987] que consiste em interromper uma ou mais vezes a entrada de água durante a fase de avanço. As interrupções na entrada de água podem ser de curta duração, média duração ou longa duração [Varlev 1989]. Na modalidade *surge* de curta duração, a entrada de água é ligada/desligada em ciclos de segundos ou dezenas de segundos, não havendo recessão significativa de água no sulco. Na modalidade *surge* de média duração, a água é ligada/desligada em ciclos de algumas dezenas de minutos, havendo normalmente recessão total da água no sulco. Uma irrigação com *surge* de média duração está ilustrada na Figura 2-12. Observe-se que na quarta interrupção a água chega ao final do sulco e a entrada de água é reduzida para um valor constante.

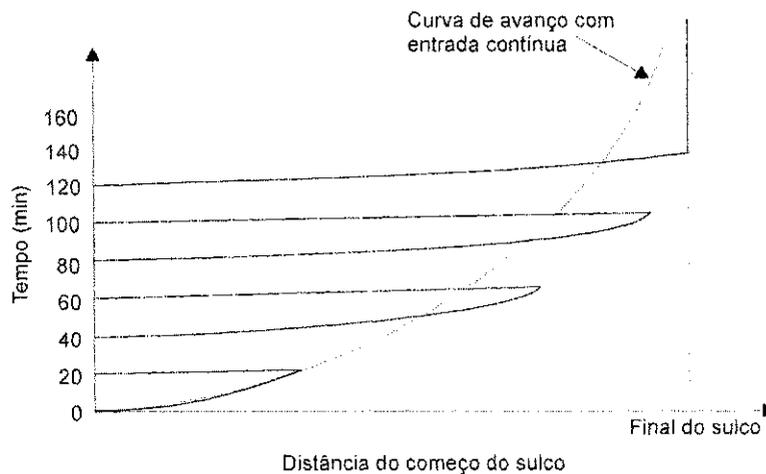


Figura 2-12: Avanço e recessão usando a técnica *surge* de média duração

A modalidade *surge* de longa duração é caracterizada por uma única e prolongada interrupção na entrada de água, acontecendo tipicamente durante a noite [Varlev 1998]. As vantagens desta modalidade de *surge* são:

- Avanço até o final do sulco em menos tempo e com um menor volume de água aplicada;
- Maior uniformidade de distribuição nos sulcos e,
- Menor variação no avanço da água entre sulcos.

De acordo com os autores desta técnica, o mérito da proposição desta técnica deve ser creditado a [Stringham 1979]. Entretanto, de acordo com [Varlev 1998], a técnica *surge* já vem sendo usada na Bulgária desde 1965, porém sua divulgação foi limitada ao idioma Búlgaro, com apenas resumos em língua inglesa.

2.3.2 Sensoreamento Remoto na Irrigação

A coleta de dados no campo, de parâmetros relacionados ao conjunto solo/planta/atmosfera, é de grande importância para a determinação das necessidades hídricas da cultura. A automação destas medições, em tempo real, possibilita estabelecer estratégias de controle da irrigação, sobre quando e quanto irrigar visando otimizar e racionalizar a utilização da água e da energia [Faria 1998]. No controle da irrigação por sulco, por exemplo, são relevantes dados sobre o solo (como umidade e taxa de infiltração da água), sobre o ambiente (como temperatura e umidade relativa do ar), e sobre a taxa de escoamento da água nos sulcos, entre outros. A automação da coleta de dados no campo, em tempo real, elimina os erros de leitura de sensores, erros de digitação e perdas de dados, e possibilita o sincronismo de leitura de vários instrumentos com uma frequência de leitura a intervalos precisos.

Existe, no mercado, uma grande variedade de dispositivos utilizados em sensoreamento. Estes dispositivos diferem quanto à tecnologia empregada (princípio de funcionamento), aos materiais utilizados, à precisão, à vida útil e ao custo. O princípio de funcionamento do elemento sensor é que define o tipo de dispositivo sensor e o tipo de aplicação a que se destina. São encontrados sensores de temperatura, pressão, vazão, umidade, condutividade, pH, densidade, presença, nível, entre outros.

Métodos para Sensoreamento de Umidade e Presença de Água

Em geral, o solo é composto de ar, partículas minerais e orgânicas e água. As constantes dielétricas (ϵ) para estes materiais são aproximadamente 1 para o ar, 2 a 4 para as partículas minerais e 80 para a água. Por causa da grande diferença da constante dielétrica da água e dos outros constituintes do solo, a presença da água no solo pode ser determinada via seus efeitos na constante dielétrica, medidos pela variação da capacitância entre dois eletrodos colocados no solo [Faria 1998]. Se o solo estiver completamente seco, a constante dielétrica será de 2 a 4. Se 25% do volume do solo for água, o constante dielétrica estará entre 11 e 12. Para solos de interesse agrícola, os valores da constante dielétrica dependem basicamente do volume da água no solo e dependem muito pouco do tipo de solo. Brigs e Zeleny estão entre os primeiros a demonstrar a possibilidade de medir a umidade de um material através de mudanças nas suas propriedades elétricas [Henry 1991].

Medidores elétricos de umidade são basicamente de dois tipos: medidores de capacitância e de condutância. Em comparação com os medidores de condutância, os medidores de capacitância são

menos sujeitos a erros, mais sensíveis e apresentam uma boa resposta de frequência [Henry 1991]. Por outro lado, eles estão sujeitos a erros devido ao acúmulo de resíduos entre as placas e sinais espúrios introduzidos pelos fios. Eles são também sensíveis à temperatura e são de construção relativamente complexa.

Medidas de umidade pelo método da capacitância dependem da constante dielétrica de uma mistura de três materiais: água, ar e a matéria seca (no caso, o solo). A constante da água é 80, do ar é 1. Portanto a constante dielétrica é afetada pela presença do ar no capacitor e pelo grau de compactação do material. Os princípios básicos utilizados na concepção destes sensores são a variação de condutividade ou da capacitância com a umidade. A mudança de condutividade é quase que inteiramente atribuída ao nível de compactação (à quantidade de cargas livres) no material. Para níveis de umidade abaixo de 7%, o composto parece tão coeso que contribui muito pouco para a condutividade. Portanto, leituras satisfatórias não podem ser registradas para níveis baixos de umidade. Para níveis acima de 23%, a condutividade é tão grande que o aumento da umidade resulta apenas em aumentos marginais na condutividade. Portanto, este tipo de medida não é preciso para níveis muito baixos ou muito altos, de umidade [Henry 1991].

Detetor de Presença de Água

Na automação da irrigação, a detecção do avanço da água no sulco é primordial. Um detetor de presença de água possui um elemento sensível que é responsável pela detecção da proximidade da água. Para obtenção desta informação, diferentes dispositivos sensores e princípios de transdução são utilizados, dentre os quais estão os sensores resistivos e capacitivos:

- *Sensor resistivo.* Os detetores de presença de água, do tipo resistivo, apresentam vida útil longa, são robustos e de baixo custo. O sistema ARFIS [Latimer 1990] utiliza a queda de resistência entre duas placas de alumínio como método de detecção de presença de água em um sulco irrigado. Neste trabalho foram desenvolvidos e testados dois detetores resistivos de água (descritos no capítulo 5).
- *Sensor capacitivo.* Nos sensores de umidade do tipo sonda, imersos no solo, a capacitância de dois fios paralelos está relacionada à presença ou não da água. Na solução proposta neste trabalho e apresentada no capítulo 4, a capacitância entre dois fios paralelos está relacionada à presença ou não de água. Este método de detecção da presença da água apresenta as seguintes vantagens: uma resposta rápida, precisão relativamente boa (quando não há mudanças na concentração iônica do solo) e facilidade de acoplamento a sistemas de medição remota (telemetria), pois são dispositivos elétricos, dispensando portanto a transdução. Exemplos de dispositivos sensores, não eletrônicos, são a sonda de neutrons, a sonda de raios gama e o tensiômetro, utilizados na determinação da umidade do solo [Faria 1998], cujos dados não são de natureza elétrica, necessitando um circuito elétrico com transdutores para possibilitar a telemetria. Por outro lado, estão disponíveis comercialmente dispositivos capazes de medir a umidade do solo em grandezas elétricas, como a

sonda TDR¹¹ [Faria 1998], porém o custo destes instrumentos torna proibitiva a instalação permanente de uma rede de sensores para fins de supervisão ou controle, como proposto neste trabalho.

2.3.3 Controle Automático da Irrigação por Sulco

Quando controlada manualmente, a irrigação por sulco é caracterizada por uma baixa eficiência. Por outro lado, com gerenciamento adequado, apoiado por automação, a eficiência pode chegar a níveis comparáveis aqueles obtidos com outros métodos de irrigação. No Brasil, a grande maioria dos usuários da agricultura irrigada não utiliza qualquer estratégia de uso e manejo racional da água de irrigação, sendo a monitorização automática para manejo da irrigação ainda incipiente [Faria 1998].

Historicamente o manejo da irrigação por sulco tem demandado uma mão-de-obra considerável e se caracterizado por uma baixa eficiência. As primeiras tentativas para automatizá-la foram mal sucedidas por falta de flexibilidade dos controladores utilizados, para adaptar-se as variações das condições no campo e às várias técnicas e escalonamentos de aplicação da água [Lillevik 1979].

O controle deste tipo de irrigação tem como objetivos melhorar a distribuição da água no campo, fazer uso racional dos recursos disponíveis (água, solo, mão de obra) e aumentar a rentabilidade da terra irrigada [Bautista 1993a]. Estes objetivos podem ser traduzidos em: 1) controle da percolação profunda, que em excesso pode contaminar o lençol freático com agrotóxicos e resultar na salinização do solo, 2) controle do *runoff*, que em excesso pode contaminar a água superficial de rios e açudes com agrotóxicos além de causar erosão do solo e, 3) reposição eficiente de água na zona das raízes da cultura. A seguir são descritas, em termos gerais, as alternativas de sistemas de controle de irrigação por sulco.

Alternativas de sistemas de controle de Irrigação

- *Sistemas de controle manual* – dependem de mão de obra intensiva. O operador deve estar presente desde o início da irrigação, durante e até sua finalização.
- *Sistemas semi-automáticos* – O usuário coleta dados do campo manualmente e carrega-os no computador para determinar os parâmetros de controle. Em seguida vai ao campo e programa as válvulas e relógios, manualmente [Blair 1986]. Estes sistemas não provêm realimentação para o operador e demandam do operador a inicialização de cada ciclo de irrigação.
- *Sistemas totalmente automáticos*, também conhecidos como Sistemas de Irrigação Controlados por Computador - SICC. São sistemas totalmente automatizados, que incorporam um sistema de sensoriamento por telemetria para obtenção em tempo real de dados do campo e efetuam o controle remoto simultâneo de todas as válvulas de um sistema de irrigação [Blair 1986, Gelb 1994]. As válvulas são os elementos chave no controle dos sistemas de irrigação, distribuindo

¹¹ TDR – reflectometria no domínio do tempo – método de medida da umidade e condutividade elétrica do solo.

água para os sulcos irrigados. Estes dispositivos atuadores são discutidos no capítulo 4. O sensoramento e controle remoto é efetuado por **estações de campo**, que consistem de um computador instalado próximo ao campo irrigado. Também faz parte destes sistemas um computador central ou supervisor, instalado no ambiente de controle para prover: 1) informações em tempo real sobre a irrigação, 2) o controle remoto, e 3) o escalonamento da irrigação a partir da análise dos dados coletados no campo.

O computador central calcula os parâmetros da irrigação usando relações empíricas e teóricas de modo a maximizar a eficiência no uso da água através da determinação dos parâmetros ótimos da sessão de irrigação, que tipicamente consiste do escalonamento da redução de entrada de água e a marcação do final da sessão.

Além de seu potencial de cálculo, um SICC é capaz de otimizar, em tempo real, a eficiência de uma irrigação graças à sua capacidade de controle simultâneo, que aumenta bastante as opções disponíveis para otimização. Estes sistemas armazenam um histórico de dados e eventos e são mais precisos porque independem do controle humano. Por outro lado, apesar de sua maior precisão e redução de custos de mão de obra, comparados aos sistemas manuais e semi-automáticos, os SICC apresentam um custo alto de manutenção, baixos índices de robustez para operação no campo, além de exigir um alto investimento inicial na aquisição do sistema e no treinamento de pessoal.

O nível de automação dos sistemas descritos na literatura é bastante diverso, indo desde sistemas baseados em controladores programáveis [Deho 1991] até sistemas mais complexos baseados em computadores como o AISSUM [Singh 1995], e o ARFIS [Latimer 1990]. Segundo Blair em [Blair 1986], ainda não estão disponíveis sistemas completamente automáticos que levem a uma alta eficiência, pelas razões a seguir: 1) a operação ótima de uma irrigação é complexa, devido às relações complexas entre a infiltração e a hidrodinâmica da frente de água, 2) estes sistemas exigem hardware e software sofisticados e 3) devido à percepção econômica do mercado, a demanda por estes sistemas ainda é reduzida.

Vários métodos e modelos têm sido propostos para simular a hidrodinâmica da irrigação [Walker 1987, Blair, 1986] e determinar os parâmetros ótimos da irrigação, tais como o tempo de ciclo de *surge*, a taxa de fluxos de *surge*, o número de *surges*, as taxas de redução de entrada (*cutback flow rate*) e os tempos de aplicação.

A Interface com o usuário

A tarefa de supervisão e controle consiste em recolher informações sobre todas as variáveis configuradas do processo, processá-las, executar procedimentos automáticos de controle e apresentá-las ao operador do processo, em tempo real, através de uma interface homem-máquina, de forma clara e inteligível.

A busca pela otimização de sistemas tem resultado no aumento da produtividade e na qualidade da produção. No entanto, o sucesso desta iniciativa depende fortemente da qualidade da interação do sistema com o usuário. Tradicionalmente, uma parcela significativa do custo de desenvolvimento de

um *software* aplicativo deve-se ao desenvolvimento da interface com o usuário e em particular à disponibilização de recursos para a geração de gráficos. Em um sistema integrado, como proposto neste trabalho, estes recursos para interface com o usuário já estariam disponíveis como parte da plataforma de execução, enquanto a geração de diversos tipos de gráfico estaria disponível na forma de serviços comuns da plataforma. Além destes, outros serviços tais como o gerenciamento de eventos, a geração de relatórios e a visualização de gráficos históricos, eliminariam uma grande parte do esforço de implementação do componente interface com o usuário além de assegurar um padrão em estilo de interação comum a todos os aplicativos. Consequentemente, o desenvolvimento de um aplicativo para controle ou gerenciamento de processos distribuídos seria bastante simplificado comparado ao desenvolvimento de uma aplicação independente. Os esforços no desenvolvimento seriam concentrados na implementação de algoritmos de controle para aplicações específicas.

Modelos Matemáticos na Otimização da Irrigação

Um dos parâmetros básicos que afeta o desempenho da irrigação por sulco é a taxa de avanço da água no sulco. A taxa de avanço varia com a taxa de infiltração no solo, que por sua vez varia dentro de uma área e ao longo do tempo durante uma temporada de irrigação [Humpherys 1985].

Modelos matemáticos podem prever a taxa de avanço, contudo eles dependem do conhecimento da taxa de infiltração, que é difícil de medir com precisão. São necessários, portanto, dados sobre a taxa de avanço para complementar a predição realizada por modelos matemáticos e para calibrar os modelos.

Monitorar a taxa de avanço em um conjunto de sulcos requer um número elevado de pessoas, trabalhando por várias horas, particularmente se for necessário repetir as medidas para fluxos intermitentes (*surges*) [Humpherys 1985, Latimer 1990]. Para que esta prática seja viável, deve ser automatizada. Se forem usados sensores ao longo do sulco, possibilitando o registro de quando a água atinge um determinado ponto do sulco, o número de pessoas necessário para monitorar o avanço da água seria consideravelmente reduzido. Discussões sobre o número e a localização de sensores no sulco podem ser encontradas em [Myers 1970, Blair 1982, Izadi 1998]. Blair determinou que quando os sensores são localizados a distâncias de 50% e 90% do comprimento do sulco então haveria a otimização do valor estimado dos parâmetros obtidos com o método de dois pontos [Blair 1982].

Há várias referências na literatura sugerindo a incorporação de dados obtidos em tempo real a partir de sensores, sobre a taxa de avanço, em sistemas para automação da irrigação. Estes dados seriam enviados por telemetria para um sistema que definiria as características de infiltração do solo [Latimer 1990, Humpherys 1985]. Em um sistema de controle automático da irrigação, os dados enviados pelos sensores de avanço seriam realimentados no programa de controle de modo a permitir a tomada de decisão sobre a gerência da irrigação, tal como na elaboração do escalonamento.

O **escalonamento da irrigação**, ou seja, a decisão de quando irrigar e por quanto tempo a água deve ser aplicada nos sulcos [Singh 1995], depende da quantidade de água necessária para infiltrar no solo até uma profundidade desejada e do espaçamento entre os sulcos.

O uso de controle adaptativo foi proposto por Redell [Redell 1986] como alternativa para otimizar a irrigação. Em um sistema com controle adaptativo, estimativas da infiltração seriam obtidas, periódica e indiretamente, a partir de medidas tais como o tempo de avanço (*advance rate*), a profundidade da água no sulco (*depth of flow*) e a taxa de escoamento (*runoff rate*) [Walkerman 1990 e Bautista 1993b]. Com base em estimativas atualizadas de parâmetros tais como a infiltração, políticas de controle, visando atingir desempenhos predeterminados, podem ser definidas em tempo real, reduzindo as incertezas causadas pela sua variação espacial e temporal

2.3.4 Otimização do Controle Automático da Irrigação

'O uso extensivo de métodos de otimização pode nos ajudar a progredir para uma alocação mais racional dos recursos limitados deste planeta' [Gottfried 1973].

Modelos matemáticos podem ser entendidos como uma relação causa-efeito de um sistema. Tais modelos descrevem o comportamento de um sistema estudado, mas é importante compreender que a solução de um tal modelo, não importa o quão sofisticada, é tão boa quanto o modelo em si. Além do mais, é necessário modelar o sistema da forma mais completa possível, pois as condições ótimas para muitos subsistemas não resultam em condições ótimas para o sistema como um todo. Existe uma variedade de modelos matemáticos empregados na otimização da irrigação. Em sua maioria, estes modelos são empregados na análise das condições da irrigação, em simuladores, que apoiam a investigação de parâmetros e suportam a elaboração de escalonamentos das sessões. Destes modelos deve-se adotar aqueles cujos requisitos de processamento permitem soluções em tempo real.

A estratégia de otimização do controle da irrigação por sulco, baseada na análise do avanço, fundamenta-se no uso de um modelo matemático que descreve o deslocamento de água e sua infiltração no solo durante uma sessão de irrigação.

Modelo Onda-Cinemática

A classe de modelo Onda-Cinemática descreve o deslocamento e infiltração de água no solo durante a irrigação por sulco. Este modelo pode funcionar tanto com intervalos de tempo fixos quanto com intervalos de distância fixos. A implementação do modelo adotado no módulo FarmWeb de controle da irrigação é baseada no algoritmo apresentado em [Walker 1987]. Esta implementação utiliza intervalos de tempo fixos e tem as seguinte características:

- Este modelo trata as quatro fases da irrigação (avanço, aplicação, depressão e recessão);
- Seu tempo de computação nos microcomputadores atualmente disponíveis é da ordem de segundos, viabilizando sua aplicação no controle em tempo real;
- Este modelo com intervalos de tempo fixos demonstra estabilidade numérica quando o avanço é muito lento. Isso não acontece quando o modelo baseia-se em intervalos de distância fixos e o avanço é muito lento.

- Este modelo pode considerar alterações na declividade e nas condições do solo ao longo de um sulco.

O fundamento matemático do modelo Onda-Cinemática é detalhado em [Walker 1987]. Para a conveniência do leitor um resumo desta descrição é incluído como Apêndice A.

2.3.5 A Simulação como Estratégia de Otimização da Irrigação

A simulação evita o exercício dispendioso de testar múltiplas combinações de fluxo e de tempo de aplicação de água para determinar qual delas melhor atende aos requisitos de um plano de irrigação. O desafio nestas situações é a obtenção dos dados que serão alimentados nos modelos. A simulação pode ser baseada em modelos matemáticos dos processos envolvidos ou em regras ou relações mais pragmáticas. Modelos que simulam a irrigação por superfície são úteis para simular mudanças no desempenho em função do tempo de irrigação e do fluxo.

A importância da simulação como estratégia de otimização na gestão de processos é demonstrada pela existência de dezenas de programas de simulação para uma larga faixa de processos agrícolas. Exemplos de processos simulados são: lixiviação de adubos químicos, disseminação de pragas, erosão de solo por chuva, desenvolvimento de cultivos em função da aplicação de adubos, deslocamento de água na irrigação, relação água-planta-solo, ambiente de casa de vegetação, ganho de peso na pecuária em função de alimentação, transporte de água em canais, etc. Simulações para tomada de decisão, devem usar dados históricos. O usuário atualiza informações e compara com resultados esperados para tomada de decisão.

Em alguns sistemas de simulação da irrigação, a automação do controle é possível, adicionando-se equipamento e sensores para realizar o controle em malha fechada por computador. Quando o controle do processo incorpora técnicas de simulação, maiores ganhos em produtividade podem ser obtidos, particularmente na execução de algoritmos de controle mais complexos.

Além do aumento de produtividade, a simulação pode resultar em benefícios importantes para a preservação do meio ambiente e dos recursos naturais dos quais os processos agrícolas são altamente dependentes. A importância deste aspecto pode ser melhor apreciada através de exemplos de gerência de recursos naturais tais como aquele apresentado por Walker em [Walker 1987]. Segundo Walker, a região onde atualmente situa-se o Iraque apresenta em torno de 50% da população e 25 a 50% da produção agrícola que tinha na época bíblica. Atribuí-se este fato ao gerenciamento inadequado da irrigação que foi usada durante séculos, transformando o solo e reduzindo sua produtividade.

A seguir são descritas situações e sistemas nas quais a simulação vem sendo utilizada:

- *Sistemas independentes de apoio a decisão*, que operam de forma independente dos sistemas de controle. Sua entrada de dados é feita através de: 1) digitação manual, 2) transferência usando disquete ou 3) através de linhas de comunicação com coletores de dados no campo. As saídas são recomendações e análises para apoiar o processo de tomada de decisão [Faye 1998, Gonçalves 1998];

- *Módulos acoplados de apoio a decisão*, que fazem parte integrante de sistemas centralizados de controle. Os dados são obtidos através de telemetria e suas saídas são recomendações e análises apresentadas aos operadores do sistema para apoio à tomada de decisão, como em AISSUM [Singh 1995];
- *Componentes de algoritmos de controle*, em que os resultados da simulação são usados para determinar o perfil do controle. Quando o volume de processamento e a memória são limitados, o algoritmo de controle baseado na simulação pode ficar residente nas estações de campo, a exemplo do sistema de irrigação ARFIS [Latimer 1990].

Quando modelos são utilizados em aplicações em tempo real, tais como no escalonamento da irrigação, para que os resultados sejam satisfatórios os modelos devem ter sido previamente validados, e como estes são altamente dependentes das entradas, estas devem ser confiáveis. Nestas situações, a qualidade dos resultados depende fortemente do entendimento do usuário sobre as limitações do modelo [Martin 1992]. À medida que os modelos tornam-se mais realistas e a necessidade de interação com outros aplicativos cresce, os algoritmos de controle passam a ser executados nos computadores centrais. Os recursos disponíveis nestes computadores centrais desempenham um papel importante na representação gráfica do comportamento do processo controlado.

Atualmente, na grande maioria dos casos, a simulação é empregada na forma de sistemas independentes de apoio a decisão. Entretanto, acredita-se que pelas razões apresentadas, a tendência futura é a incorporação da simulação nos algoritmos de controle.

2.4 OPERAÇÃO DE HARDWARE NO CAMPO

O ambiente onde se desenvolvem processos agrícolas apresenta um conjunto de características que devem ser levadas em consideração em um projeto de automação agrícola. Estas características influenciam a escolha eventual entre alternativas de hardware e de suas características de operação. As condições para operação de equipamentos elétricos e eletrônicos no campo são extremamente adversas: grandes distâncias, topografia, variações da umidade do ar, grandes oscilações de temperatura, presença de orvalho, poeira, ventos, raios solares, fungos e insetos no interior de equipamentos, fortes chuvas e granizo, indução de altas tensões nos circuitos provocadas por raios, baixa qualidade da energia elétrica, ruído eletromagnético, qualidade da mão-de-obra, presença de vibração, tráfego de máquinas agrícolas, ataques por roedores e outros animais silvestres, etc.

2.4.1 Ruído

O ambiente agrícola está sujeito a diversos tipos de ruído eletromagnético que podem interferir nos enlaces por rádio usados na telemetria e pode corromper dados ou distorcer sinais analógicos:

- Relâmpagos, de acordo com [Wardle 1993], apresentam um sério risco aos sistemas automatizados de irrigação, devido às altas tensões que podem ser induzidas em trechos de fio no campo.

- Máquinas agrícolas, com motores a gasolina sem supressão adequada de ignição, são fontes do ruído eletromagnético de espectro amplo.
- Rádio transmissores, como aqueles portáteis usados na comunicação de voz. Estes transmissores têm saídas com potência suficiente para causar interferência em circuitos elétricos nas proximidades.

Como consequência, as redes de comunicação entre estações de campo e o computador central, e entre estações de campo e dispositivos sensores e atuadores, devem possuir circuitos para filtrar ruído e proteção contra altas tensões. A proteção ao ruído pode ser feita com capacitores de desacoplamento, tipo cerâmica de 100 nF, conforme recomendado em [Lowry 1978]. A proteção contra altas tensões pode ser feita com varistores ou centelhadores conforme recomendado em [Standler 1989].

2.4.2 Degradação de Condutores Elétricos

A automação de muitos processos agrícolas (inclusive a irrigação) depende da instalação de longos trechos de condutores elétricos no campo. Estes fios condutores são revestidos com material isolante, e este revestimento (polímero) está sujeito à degradação ao longo do tempo. Dentre as causas de degradação dos polímeros utilizados no revestimento de condutores [Paoli 1995], as mais importantes, do ponto de vista de sua utilização no campo, são:

- Degradação fotoquímica, processo auto-oxidativo iniciado por luz ultravioleta, provocando mudança de cor, enrijecimento e rachaduras no material;
- Degradação química, que pode ocorrer quando o polímero entra em contato com diversos produtos químicos utilizados no campo, a exemplo de óleo, inseticidas e fertilizantes. Um problema específico dos fios elétricos é a migração de óxido de cobre para a matriz de polietileno que provoca a degradação oxidativa.

Outras causas de degradação do material utilizado no revestimento de fios e que podem influenciar em seu desempenho ao longo do tempo são: umidade, ataque biológico, condições climáticas, estresse térmico e mecânico. O envelhecimento da superfície do revestimento inclui erosão pelas condições climáticas e por fungos [Mackevich 1997].

Como consequência, o hardware a ser instalado no campo, que necessite ser interligado por condutores elétricos, estará sujeito a falha após um certo período de uso, cuja duração (meses ou anos) depende da qualidade do material utilizado. No entanto, o problema de degradação pode ser consideravelmente reduzido a partir do uso de fios condutores projetados especificamente para uso em ambiente externo e, particularmente, para condições semelhantes àquelas do ambiente agrícola.

2.4.3 Facilidade de Manutenção

O campo é um ambiente onde a fiação e equipamentos estão sujeitos a danos freqüentes. Por conseguinte, o hardware ali instalado, deverá ser de fácil manutenção. Idealmente, o reparo de equipamentos e redes de energização e comunicação deve ser possível de ser realizado por um pessoal

com um treinamento mínimo e com infra-estrutura limitada. Recomenda-se o uso de equipamento modular, cuja manutenção consista na substituição de componentes, reduzindo o tempo de sistema inoperante e dispensando o conhecimento especializado [Blair 1986].

2.4.4 Energização

As estações de campo necessitam de uma fonte de energia, porém a rede elétrica 110/220V não está disponível em todas as localidades. Mesmo quando disponível, é tipicamente de baixa qualidade [Gomide 1998]. Como alternativa, as estações podem ser energizadas através de painéis solares e baterias, como no sistema ARFIS [Latimer 1990], GAL [Deho 1991] e GIL [Gil 1999]. Entretanto, o uso de painéis solares e baterias em estações de campo resulta em algumas desvantagens:

- Maior custo, dependendo do consumo de cada tipo de estação;
- Maior tamanho físico, uma estrutura metálica é normalmente utilizada para elevar os painéis solares acima do nível das plantas;
- Maior suscetibilidade a danos, devido à fragilidade dos painéis solares.

Para que as estações de campo possam vir a ser mais utilizadas é necessário reduzir seus custos, o que implica na busca por alternativas de energização. Uma solução interessante, que é explorada neste trabalho, é a energização através dos fios utilizados na rede de comunicação.

3 SISTEMA FARMWEB

Neste capítulo, apresenta-se o sistema FarmWeb [Turnell 1998], seus componentes e como utilizá-los na construção de um sistema de automação distribuído. Para construção deste sistema foram desenvolvidos algoritmos de controle, investigadas alternativas de hardware, adotado um modelo para a simulação da irrigação por sulco e pesquisada a automação distribuída e a integração de hardware e software. O sistema FarmWeb evoluiu do projeto RIOS [Turnell 1997b], um sistema centralizado dedicado exclusivamente ao controle otimizado da irrigação por sulco.

A primeira seção trata da arquitetura do sistema, da comunicação entre objetos distribuídos, da integração de aplicativos, do multiprocessamento e do conceito de dispositivos genéricos. Em seguida é apresentada a interface com o usuário, detalhando o estilo de interação adotado, que é comum a todos os aplicativos de controle do sistema FarmWeb. O estilo único de interação facilita a manipulação do sistema, dispensando o usuário do aprendizado de diferentes interfaces com os diversos sistemas de controle de processos agrícolas. Os serviços de apoio, são apresentados a seguir. Estes serviços facilitam a geração de gráficos, o gerenciamento de eventos e relatórios e a análise numérica, reduzindo o tempo necessário para desenvolver aplicativos de controle. Finalmente, são descritos os recursos que a ferramenta FarmWeb oferece para apoiar o desenvolvimento de aplicativos de controle para a automação agrícola. Estes recursos incluem bibliotecas para depuração de software, aplicativos que simulam processos agrícolas de modo a auxiliar na depuração dos aplicativos de controle e um projeto arcabouço.

3.1 ARQUITETURA

O software do sistema FarmWeb consiste de um programa de execução e de uma biblioteca de módulos de expansão. Os módulos contém aplicativos, ferramentas e gerentes de hardware. Estes elementos são ilustrados na Figura 3-1.

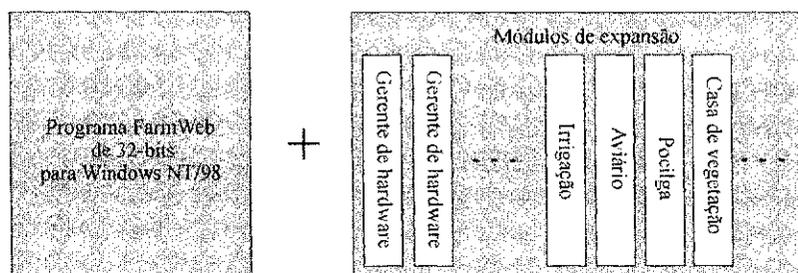


Figura 3-1: Componentes do software FarmWeb

O programa de execução e os módulos de expansão foram desenvolvidos segundo o paradigma da Orientação a Objeto. A linguagem adotada na implementação do software foi a linguagem C++ [Dewhurst 1989]. As razões para adoção desta linguagem, dentre outras linguagens e ambientes executáveis, que suportam o paradigma da orientação a objeto, foram:

- *Recursos da linguagem.* A linguagem oferece um amplo conjunto de características necessárias para o desenvolvimento de aplicações de automação em tempo real. Dentre estas características estão: a capacidade de manipular campos de bits, pontadores, estruturas de dados, facilidade de acesso à API¹² do Windows e recursos para multiprocessamento.
- *Eficiência do Código.* A geração do código é feita por compiladores otimizadores de código.
- *Ambientes avançados de desenvolvimento.* Estes ambientes integram editores de texto, compiladores, *link*-editores e depuradores. O ambiente adotado foi o Visual C++ da Microsoft [Yao 1995].

O programa de execução é um programa de 32-bits, executável nos ambientes Windows NT e Windows 98. Ele oferece um ambiente distribuído de execução para os aplicativos contidos nos módulos de expansão.

3.1.1 Grupos de Automação

No conceito de automação adotado, a automação distribuída é alcançada a partir de **grupos de automação**. Entende-se por grupo de automação um conjunto de sistemas FarmWeb interligados por uma rede que se baseia nos protocolos TCP/IP¹³. Esta rede pode ser uma combinação de redes locais, redes privadas de longa distância e a própria Internet [Comer 1988]. A Figura 3-2 ilustra um grupo de automação distribuído entre duas propriedades rurais e a sede na cidade.

Os computadores centrais em um grupo de automação podem ser interligados em rede através de qualquer tecnologia de rede compatível com o sistema operacional Windows e seus protocolos TCP/IP. Estas tecnologias incluem a conexão direta serial, os modems para linha telefônica e por enlace rádio/infravermelho, ISDN¹⁴ e as redes locais Ethernet.

¹² API - *Application Programming Interface*

¹³ TCP/IP - *Transmission control Protocol + Internet Protocol*

¹⁴ ISDN - *Integrated Services Digital Network*

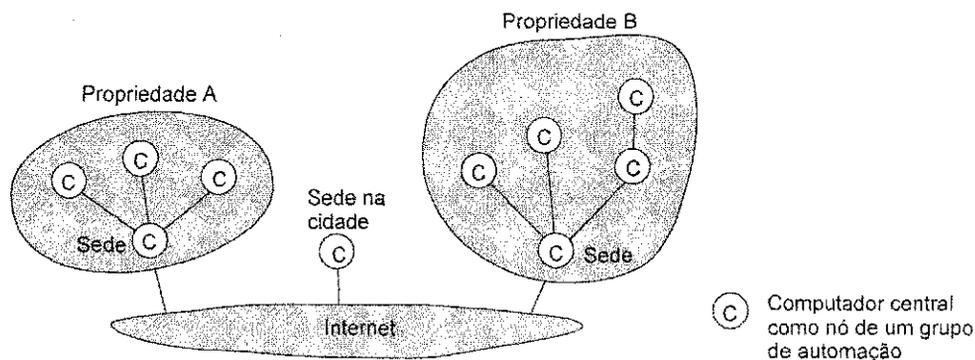


Figura 3-2: Grupo de automação

3.1.2 Arquitetura de um Sistema FarmWeb

Um sistema FarmWeb é composto de um computador, que executa o programa FarmWeb sob o sistema operacional Windows NT ou 98, e de um conjunto de módulos de expansão, de acordo com os processos agrícolas a serem automatizados. A Figura 3-3, ilustra a arquitetura de um sistema FarmWeb. Nela estão representados o sistema operacional, o programa FarmWeb, os módulos e os objetos.

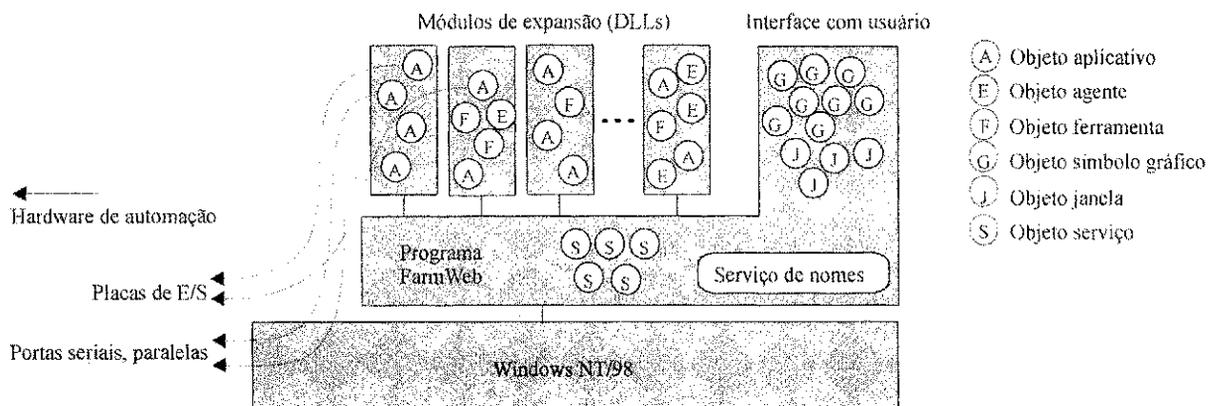


Figura 3-3: Arquitetura de um sistema FarmWeb

A configuração de um sistema FarmWeb é definida pelo usuário através da criação ou extensão de um arquivo **projeto de automação**, que implementa a persistência dos objetos FarmWeb e especifica: 1) os módulos de expansão que serão utilizados, 2) os objetos que serão instanciados das classes para cada módulo, 3) os dados relativos a estes objetos, e 4) a configuração das janelas e símbolos gráficos que constituem a interface gráfica com o usuário. O projeto de automação pode ser carregado na partida do sistema ou através de um comando de menu

Os **módulos de expansão** adicionam funcionalidade ao sistema FarmWeb. São implementados na forma de bibliotecas dinâmicas (DLL¹⁵) do Windows de 32-bits. Em geral, cada módulo de expansão é direcionado para o gerenciamento de *hardware* ou, para o controle de um processo agrícola específico.

No entanto, é possível desenvolver um módulo que exerça estas duas funções. Na sua versão atual, o sistema FarmWeb dispõe de seis módulos de expansão, ou seja, um módulo para gerência do hardware desenvolvido neste trabalho, quatro módulos para o controle de aviários, casas de vegetação, pocilgas e silos, e um módulo para o controle de irrigação por sulco (descrito no capítulo quatro).

Os objetos tipo *Aplicativo* executam os algoritmos de controle para a automação de processos agrícolas. Os objetos tipo *Agente* representam os servidores na comunicação estilo cliente/servidor adotada em FarmWeb. Os objetos tipo *Ferramenta* representam simuladores e outras ferramentas que fornecem funcionalidade além daquela estritamente relacionada com controle. *Gerentes de hardware* fornecem a interface para comunicação entre o computador e os dispositivos (estações de campo, sensores, atuadores, etc.); representando-os na forma de objetos que podem ser manipulados pelos aplicativos de controle.

O sistema FarmWeb conta com um serviço distribuído de nomes, que implementa a distribuição de objetos. Isto é, permite que um objeto localize e utilize os serviços de outros objetos, os quais podem estar residentes no mesmo computador ou em outro computador. Este serviço é detalhado adiante. Algumas das classes são derivadas da classe 'ObjetoCadastrado'. Esta classe faz com que os objetos das classes derivadas sejam cadastrados no serviço de nomes'. Estes objetos cadastrados ficam disponíveis para localização e acesso por outros objetos no sistema, independentemente de sua localização.

A estruturação do software FarmWeb é ilustrada pelo diagrama de pacotes da *Unified Modeling Language* (UML [Douglas 1998]) da Figura 3.4. O diagrama de pacotes ilustra os módulos que compõem o sistema. No diagrama cada pacote é identificado por seu nome, dentro de uma aba, e contém caixas que representam as principais classes de objetos que ele contém.

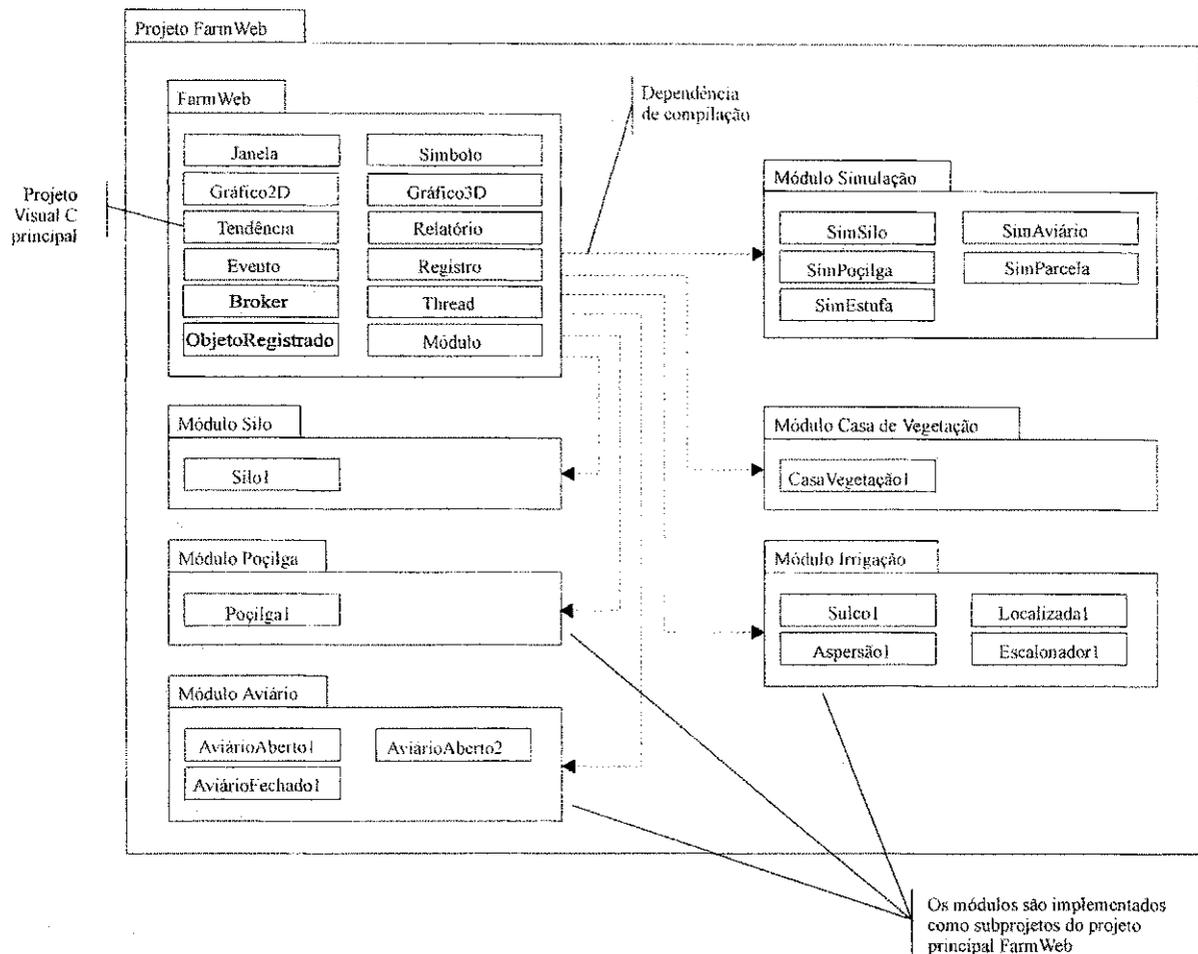


Figura 3-4 Diagrama UML de pacotes do software FarmWeb

Os pacotes foram implementados na forma de projetos do compilador Visual C, versão 5.0, da Microsoft. Há um projeto principal (o programa FarmWeb) que gera o programa 'Farmweb.exe'. Há também vários projetos secundários que correspondem aos módulos de expansão da biblioteca FarmWeb que geram arquivos DLL ('Dynamic Link Library'). As dependências de compilação anotadas na figura significam que quando o arquivo 'FarmWeb.h' é alterado o compilador automaticamente recompila tanto o projeto principal quanto os módulos dependentes.

3.1.3 Classes de Objetos

O software FarmWeb é constituído de uma família de classes de objetos definida na linguagem C++. A orientação a objeto possibilitou que módulos relativos a aplicações dedicadas a diferentes contextos de automação agrícola, tais como o controle da irrigação e o controle ambiental de um aviário, pudessem interagir sem que tivessem conhecimento da semântica um do outro e, portanto, pudessem ser integrados em um mesmo ambiente de automação.

A relação entre as classes principais é ilustrada pelo diagrama UML de classes, na Figura 3-5. Nesta figura, cada classe é representada na forma de uma caixa com o nome da classe e até duas subdivisões opcionais. Na primeira subdivisão é apresentada uma lista com os principais membros do

tipo variável da classe, e na segunda subdivisão é apresentada uma lista com os principais membros do tipo função da classe. No diagrama as linhas entre as caixas podem ser de dois tipos:

- **Sem orientação.** As linhas sem seta representam o uso de uma classe por outra, e os números associados indicam o número de instâncias envolvidas (o símbolo “*” representa de 0 a múltiplos).
- **Com orientação.** As linhas com seta representam a relação entre as classes, em termos de herança. Por exemplo, na Figura 3-5 a classe ‘LED’ é derivada da classe ‘Símbolo’.

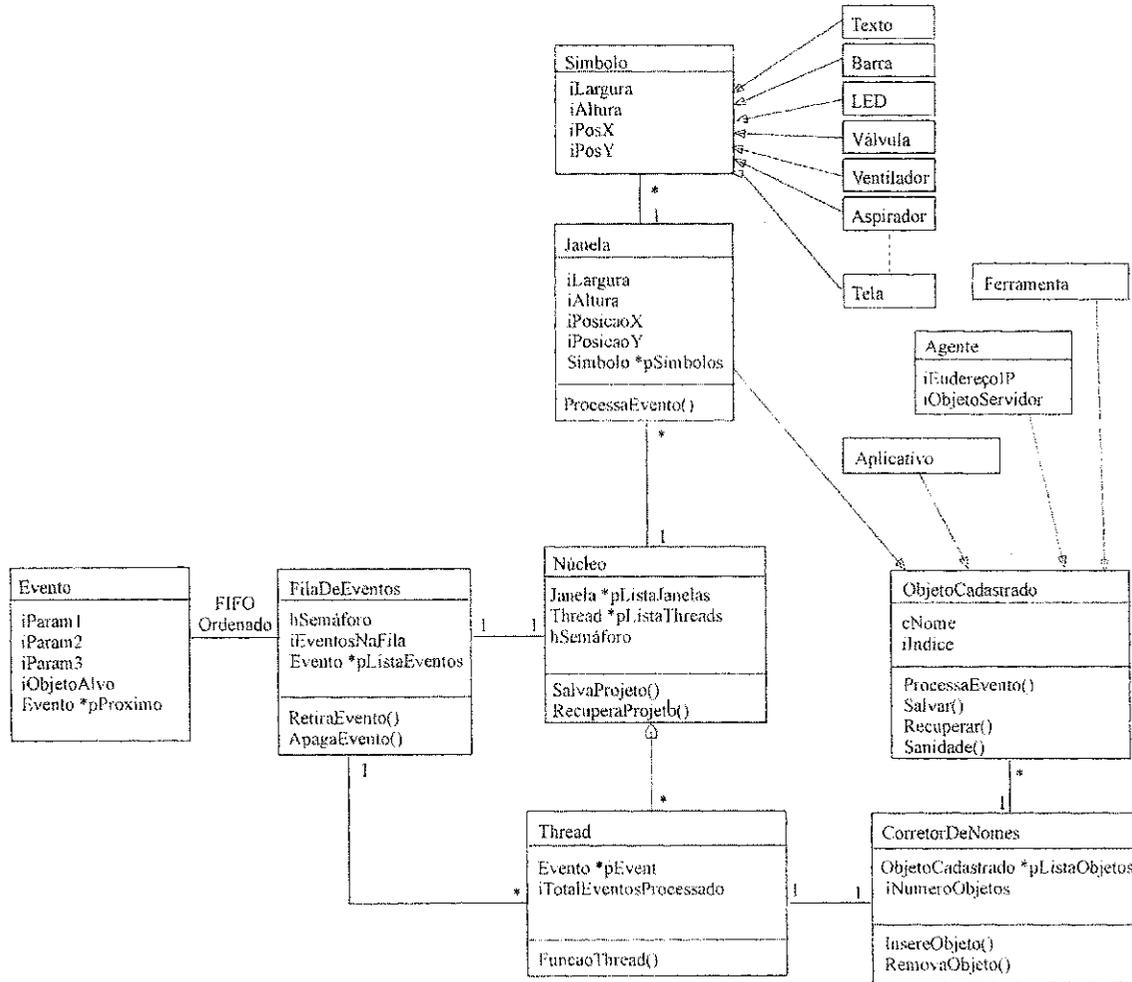


Figura 3-5 Diagrama UML de classes de objeto

Na Figura 3-5 a notação Húngara é usada para os nomes das variáveis, ou seja, a primeira letra do nome é um minúsculo que indica o tipo da variável. Esta notação é utilizada ao longo deste trabalho, tendo sido adotada a convenção a seguir:

Letra	Significado
b	booleano
c	char
i	inteiro
f	float
d	double
h	'handle' de Windows
e	enumerador

Quando não há uma primeira letra minúscula, a variável se refere a uma classe de objeto.

3.1.4 O Corretor de Nomes

No sistema FarmWeb, centenas de objetos interagem entre si. Em um sistema distribuído, é necessária uma entidade para localização de objetos. Através desta entidade, objetos podem ser compartilhados e podem interagir independentemente da sua localização no sistema. Tal mecanismo é a base da **transparência no acesso e localização**, conceito fundamental ao modelo de automação distribuída proposto neste trabalho.

No sistema FarmWeb, este mecanismo é implementado por um 'Corretor de Nomes'. Objetos cadastrados pelo corretor são identificados por um nome textual e um conjunto de atributos, tais como tipo e localização. Nomes típicos são 'Detetor 13', 'Válvula A-36', 'Aviário B', 'Mapa de Aviários', etc. Estes nomes são atribuídos pelo usuário durante a configuração de um projeto.

Para que objetos clientes acessem os serviços de objetos servidores é necessária uma classe de objeto denominada **agente**. Os objetos clientes acessam os serviços do servidor através da chamada dos membros tipo função do agente. Esta situação é ilustrada na Figura 3-6, sendo que neste caso o objeto cliente e o objeto servidor estão no mesmo computador.

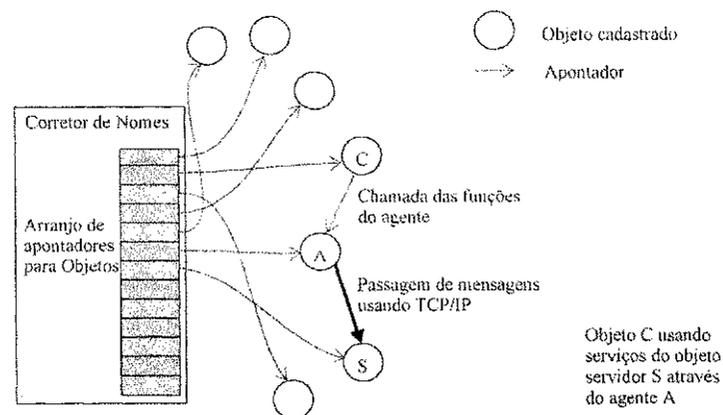


Figura 3-6: Comunicação entre objetos locais

A comunicação entre um agente e o objeto servidor que ele representa é feita através de mensagens enviadas usando o protocolo TCP/IP, mesmo quando os dois estão no mesmo computador. A situação quando os dois objetos residem em computadores diferentes é representada na Figura 3-7.

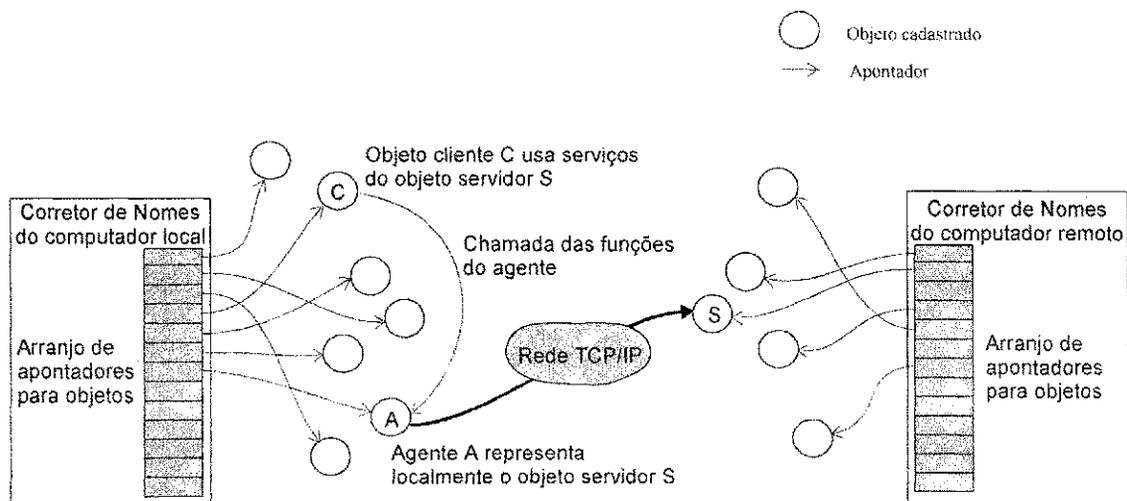


Figura 3-7: Comunicação entre objetos remotos

O corretor de nomes é implementado na forma de um aplicativo. Periodicamente, o corretor rastreia o registro a procura de agentes ‘órfãos’. A busca inicia no registro local do objeto servidor. Caso não seja encontrado localmente, o corretor envia mensagens de localização para os outros membros do grupo de automação. Quando o corretor finalmente encontra o objeto servidor, são anotados o endereço IP o índice de registro do objeto e os dados do agente.

Periodicamente, o corretor verifica todos os elos entre os objetos agentes e os objetos servidores que eles representam. Se o objeto servidor for destruído, ou se a comunicação com o computador remoto falhar, o agente é marcado como ‘offline’.

3.1.5 Acionamento a Base de Eventos

No sistema FarmWeb o acionamento dos aplicativos e outros objetos é feito através de mensagens de formato fixo denominadas Eventos, ou seja, o acionamento é *event-driven*. Cada objeto contém uma função membro ‘ProcessaEvento’ através da qual o sistema passa os eventos para ele:

```
class MeuObjeto : public Objeto {
public:
    ...
    virtual void ProcessaEventos(Evento *pEvento);
    ...
};
```

A função ‘ProcessaEventos’ implementada para a classe ‘Objeto’ fornece um tratamento genérico dos eventos. As classes derivadas de ‘Cadastrado’ (como ‘MeuObjeto’ acima) têm suas próprias funções ‘ProcessaEventos’ as quais fornecem um tratamento individualizado dos eventos. Os eventos definidos são apresentados na Tabela 3-1.

Tabela 3-1: Tipos de evento

Mensagem	Descrição
E_INICIAR	Iniciar atividades de controle/gerenciamento.
E_TEMPO	Enviado a intervalos regulares, especificados pelo aplicativo, através da função <i>FxTemporizador</i> .
E_MENU	Informa ao aplicativo que o usuário selecionou uma das opções de um menu dinâmico (ver seção 3.2.3).
E_RECUPERAR	Informa ao aplicativo da ocorrência de uma reinicialização imprevista. O aplicativo pode invocar a função <i>LerEstado</i> para recuperar seu estado anterior.
E_PEDIDO	Usada para entregar uma mensagem tipo pedido vindo de uma agente (seção 3.1.4).
E_TERMINAR	Terminar atividades de controle/gerenciamento.

No sistema FarmWeb diversos objetos aplicativos, ferramentas e gerentes de hardware funcionam em paralelo. O paralelismo é implementado através de multitarefas baseadas no conceito de trechos executáveis¹⁶, que são segmentos para execução dentro do contexto de um processo [Sinha 1997, Schildt 1996]. A cada trecho executável está associada uma pilha e um contexto de execução. A invocação de uma operação síncrona, faz o trecho executável migrar para o objeto que executa o método correspondente. Quando o método completa, o trecho executável migra de volta para o objeto que invocou a operação. A invocação de uma operação assíncrona, provoca a criação de um trecho executável, sem que qualquer relação de ordem seja atribuída entre os eventos do trecho executável original e aqueles do trecho executável criado [Martin 1994]. Um sistema operacional multitarefa que suporta a multitarefa baseada em trechos executáveis (a exemplo do Solaris ou do Windows 98/NT) contém no seu núcleo um escalonador que assegura para cada trecho um tempo de CPU de acordo com sua prioridade e estado de execução.

No processamento de eventos pelos aplicativos, um trecho executável poderia ser alocado por objeto cadastrado. Esta solução asseguraria um processamento rápido dos eventos de cada objeto, porém demandaria uma pilha de execução da ordem de 100000 octetos para cada trecho executável. No caso do sistema FarmWeb, devido ao grande número de objetos que podem coexistir no sistema, esta solução é inviável. Foi então adotada a solução na qual um conjunto de trechos executáveis é compartilhado pelos objetos. Estes trechos executáveis processam os eventos que são enviadas do sistema FarmWeb aos objetos, conforme ilustra a Figura 3-8.

¹⁶ Também conhecido pelo nome inglês *thread*.

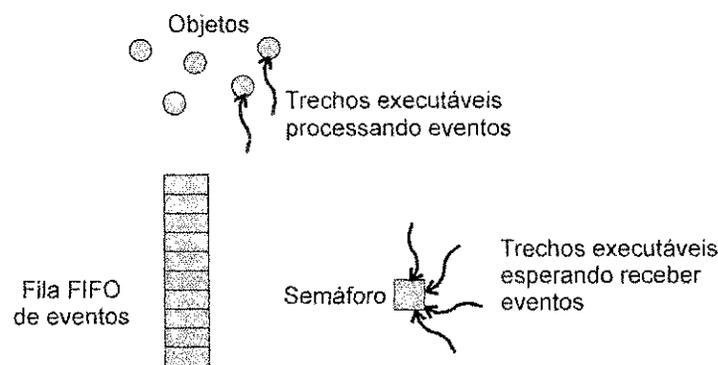


Figura 3-8: Multiprocessamento através de trechos executáveis e eventos

Um semáforo controla o acesso dos trechos executáveis à fila de eventos. Na Figura 3-8, quatro trechos executáveis estão suspensos no semáforo aguardando novos eventos. Durante a maior parte do tempo o núcleo do programa FarmWeb controla este semáforo. Porém, a cada pulso do relógio de tempo real, o núcleo examina a fila para ver se há eventos ou não. Se houver, o núcleo libera o semáforo, para acesso por um dos trechos executáveis e, conseqüentemente, à fila de eventos. Este trecho executável procura na fila para um evento cujo objeto alvo não esteja processando outro evento. Uma vez encontrado, o evento é retirado da fila e o trecho executável libera o semáforo, o qual é imediatamente recuperado pelo sistema devido à sua prioridade mais alta. Neste ponto, o trecho executável envia o evento ao objeto alvo através da função *ProcessaEvento*. Ao retornar da função, o trecho executável aguarda no semáforo a obtenção de um novo evento.

Durante a maior parte do tempo, a fila de eventos permanece vazia. Assim, os eventos que surgem são imediatamente processados pelos trechos executáveis. Durante períodos de atividade intensa no sistema, o número de eventos que entra na fila é maior que o número de trechos executáveis disponíveis para processá-las, levando ao crescimento da fila. Em circunstâncias extremas, a fila poderá ser completamente preenchida. Neste caso, o sistema descarta os eventos mais antigos criando espaço para os novos.

O mecanismo através de qual eventos são gerenciados é ilustrado através do diagrama UML de seqüência da Figura 3-9, no qual dois trechos executáveis disputam a entrega do eventos aos aplicativos. Os diagramas de seqüência UML indicam a interação entre objetos em função do tempo. Na figura 3-9, o tempo está representado no eixo vertical e os objetos envolvidos estão representados por caixas na borda horizontal superior.

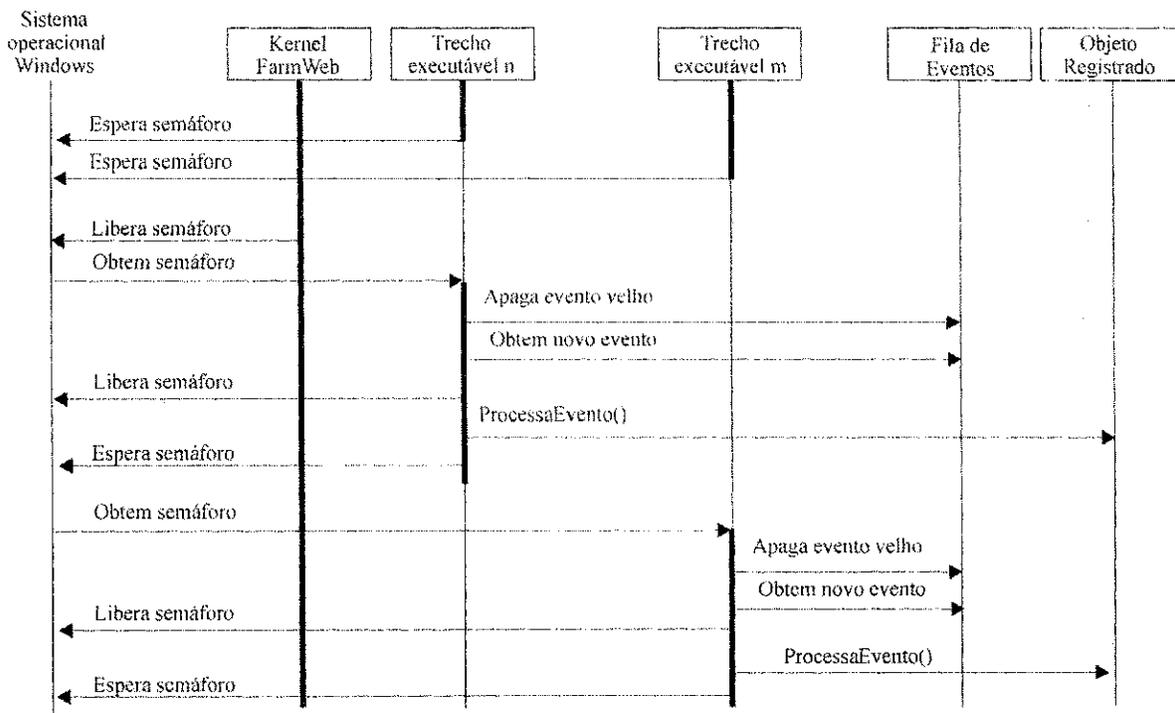


Figura 3-9 Processamento dos eventos pelos trechos executáveis

Enquanto a Figura 3-9 mostra apenas dois trechos, o número configurável pelo usuário num projeto real está na faixa de quatro a dezesseis.

3.1.6 Passagem de Mensagens entre Agentes e Servidores

Os objetos clientes se comunicam com os objetos servidores através de objetos agentes. O cliente invoca um serviço do servidor através da chamada de um dos membros tipo função do agente. Nesta chamada, uma mensagem de pedido é preparada pelo agente e enviada ao objeto servidor usando a função 'TrocaMensagem':

```
void TrocaMensagem(int EnderecoIP, int iObjetoAlvo, MsgPedido *pMsgTx, MsgResposta *pMsgRx);
```

Após esta chamada o trecho executável envolvido é suspenso. Na recepção, a mensagem é direcionada ao objeto servidor através do evento E_PEDIDO. O servidor prepara uma mensagem de resposta e a envia de volta ao objeto agente como um pacote TCP/IP. Na recepção, a mensagem é copiada para o 'buffer' de recepção (pMsgRx) e o trecho executável reiniciado.

Num sistema convencional as mensagens são definidas na forma de estruturas C. Em FarmWeb as mensagens agente/servidor são implementadas na forma de uma hierarquia de classes C++. Quatro destas mensagens são mostradas no diagrama UML de classes da Figura 3-10.

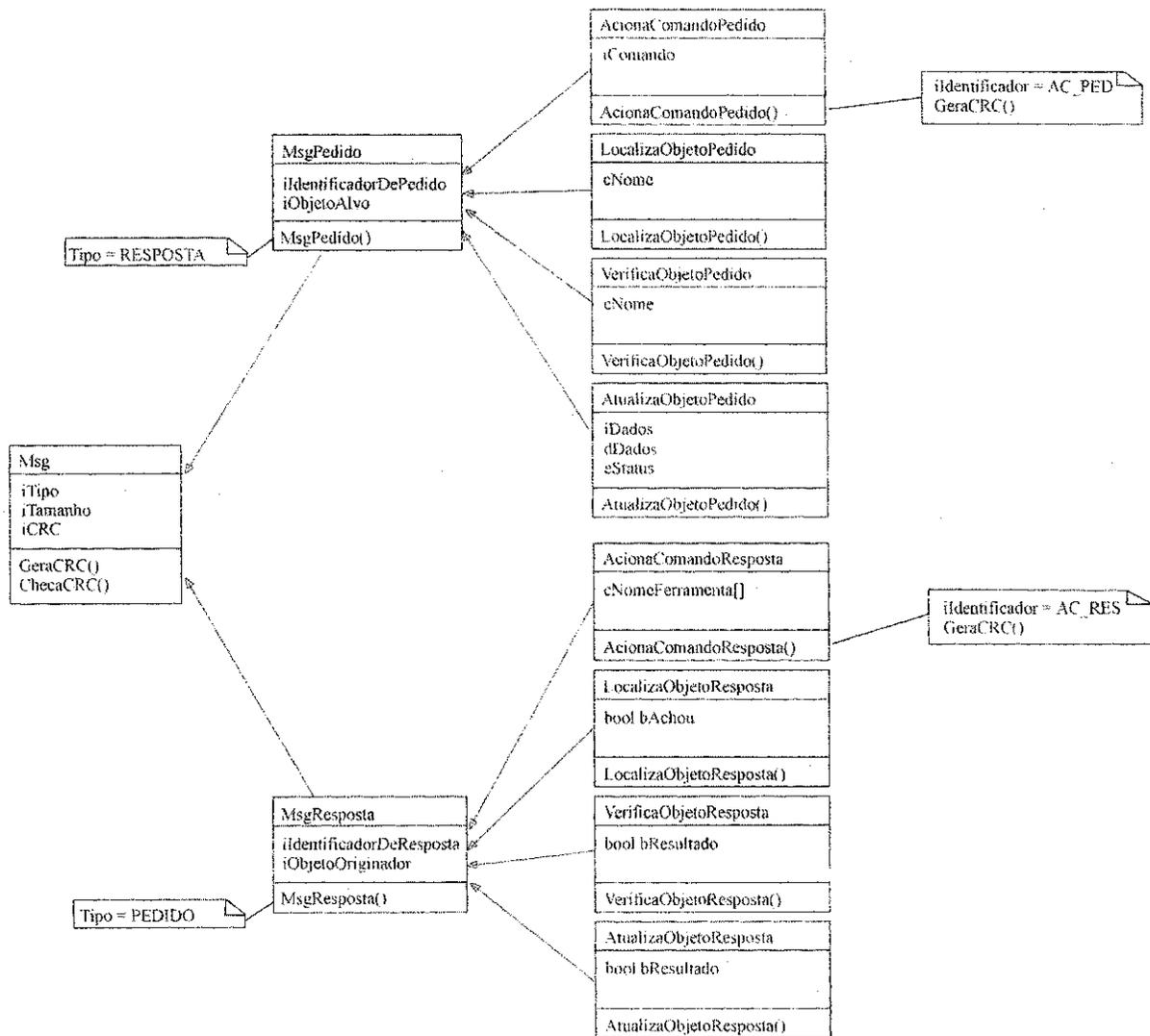


Figura 3-10 Diagrama UML de classes de mensagem agente/servidor

Na Figura 3-10 as quatro caixas com canto dobrado representam caixas de comentário. A classe base 'Msg' define o cabeçalho comum para todas as mensagens (seus membros tipo variável) e dois membros tipo função para a geração e checagem de CRC ('Cyclic Redundancy Check'). Esta checagem de CRC é necessária porque a transmissão de dados usando os protocolos de transporte no Windows não é 100% confiável.

A comunicação entre objetos é da forma pedido-resposta. As duas classes derivadas 'MsgPedido' e 'MsgResposta' distinguem entre estes dois tipos. De cada uma destas duas classes são derivados quatro exemplos de mensagem final, que são os quatro pares de mensagem usados pelo corretor de nomes. Cada aplicativo define seu próprio conjunto de mensagens que deve ser usado entre ele e seus agentes.

3.1.7 Estruturação dos Aplicativos

O primeiro passo no desenvolvimento de um aplicativo de controle é a elaboração do diagrama UML de classes. Na Figura 3-11 é dado um exemplo deste diagrama para três aplicativos de controle de aviários.

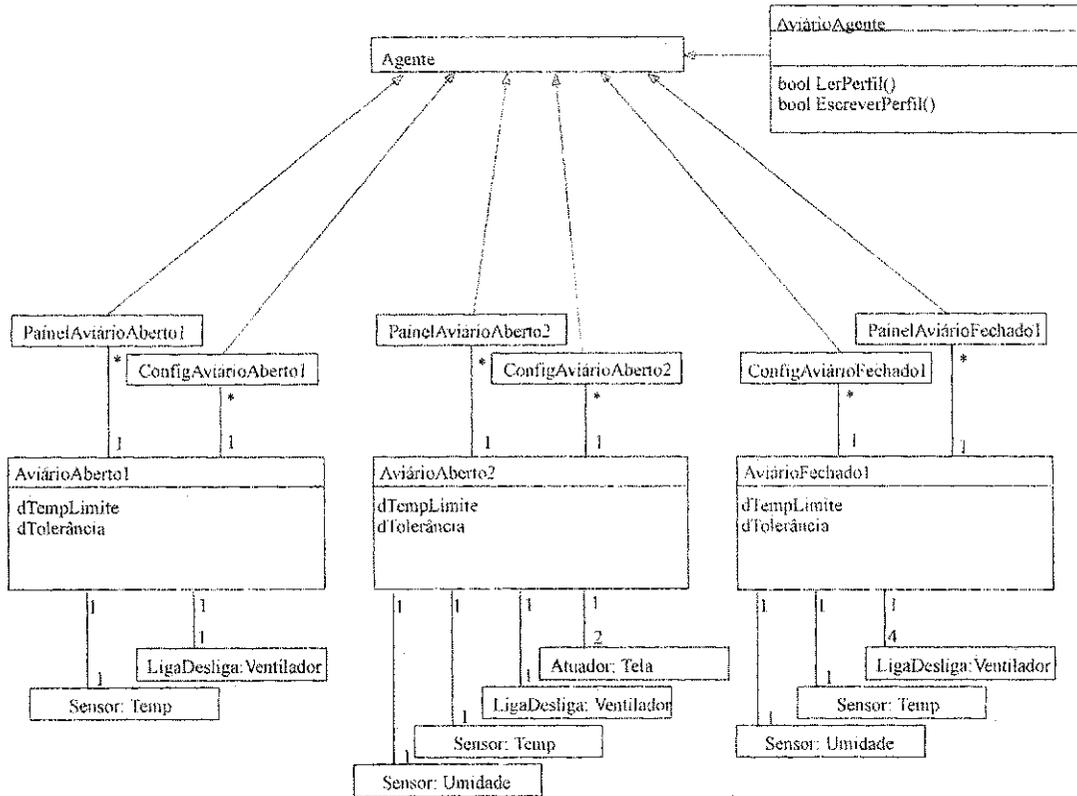


Figura 3-11 Definição das classes de um conjunto de aplicativos

O diagrama de classes define quais agentes o aplicativo necessita e quais agentes ele deve fornecer para que outros objetos tenham acesso aos seus serviços. Por exemplo, o aplicativo AviárioAberto2 necessita de dois agentes do tipo 'Sensor', um agente do tipo 'LigaDesliga' e dois agentes do tipo 'Atuador'. Este aplicativo também inclui dois agentes de interface homem-máquina: 'PainelAviárioAberto2' e 'ConfigAviárioAberto2'. Estes dois agentes permitem que o usuário configure o aplicativo e o monitore, tanto localmente quanto remotamente.

O segundo passo no desenvolvimento de um aplicativo é a elaboração do diagrama UML de estados. O mecanismo de eventos permite a estruturação dos aplicativos de controle na forma de Máquinas de Estado Finito (MEFs). Os aplicativos são implementados em torno de um laço de processamento de eventos, o qual pode ser incorporado a um mecanismo de manutenção de estado para implementar Máquinas de Estado Finito. As MEFs são intensamente utilizadas na definição e implementação de sistemas de controle, a exemplo de controladores de processo em tempo real. No caso do aplicativo AviárioFechado1 o diagrama UML de estados é ilustrado na Figura 3-12.

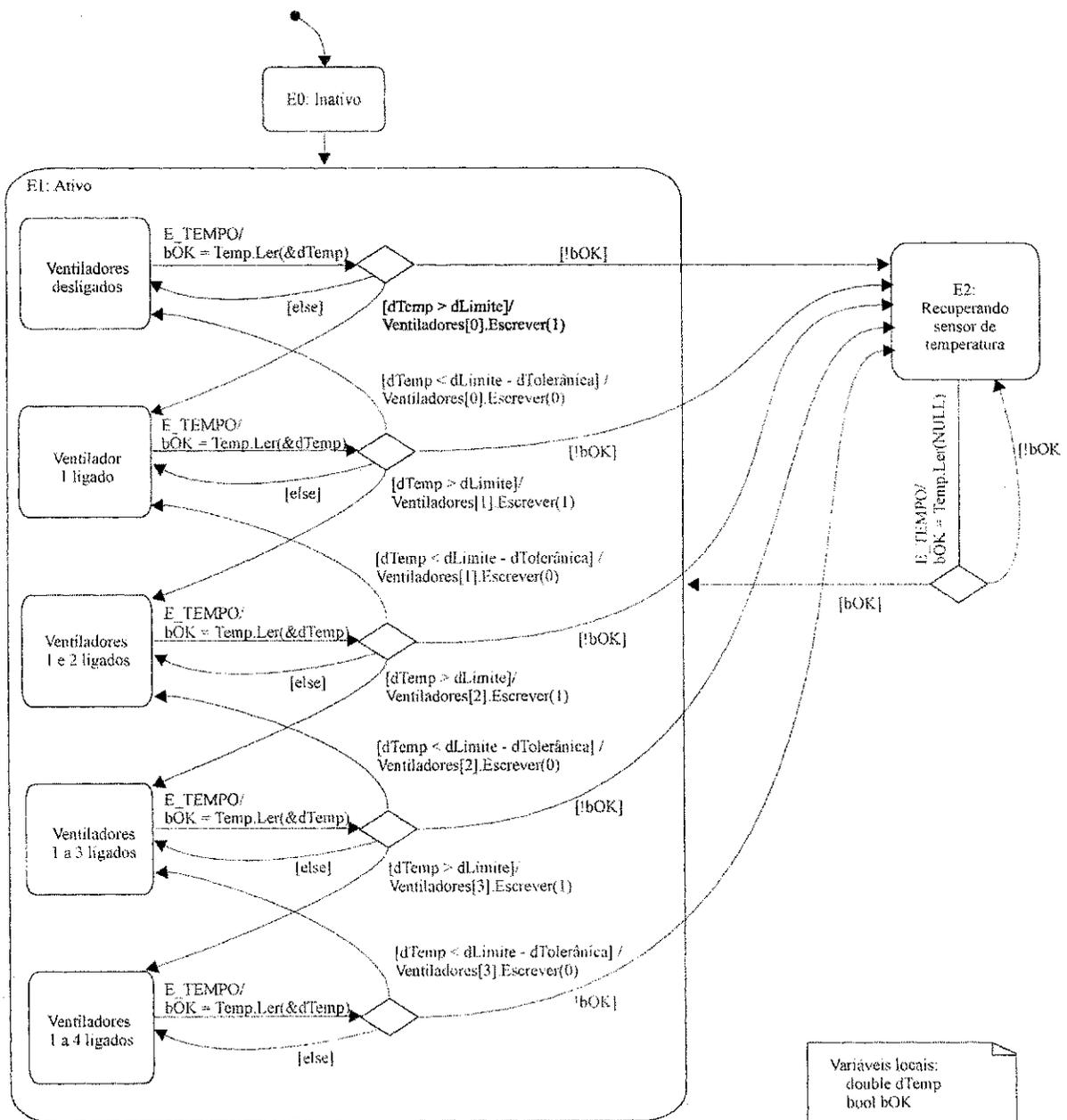


Figura 3-12: Diagrama UML de estados para o aplicativo de controle de avião

Neste diagrama, os estados podem ser aninhados. Na Figura 3-12, há três estados principais (ativo, inativo, recuperando sensor). O estado ‘ativo’ tem cinco estados internos que indicam o número de ventiladores ligados (zero a quatro). As setas saindo dos estados indicam os eventos, cada seta é rotulada com o evento e, opcionalmente, uma ou mais ações a serem tomadas (o evento é separado das ações pelo símbolo ‘/’). Por exemplo, do sub-estado ‘Ventiladores 1 a 4 ligados’ do estado ‘ativo’ há um evento rotulado E_TEMPO que tem como ação ‘bOK = Temp.Ler(&dTemp)’.

Os losângulos na Figura 3-12 representam testes. Cada seta que deles se origina representa um resultado positivo do teste indicado no seu rótulo. O teste é seguido opcionalmente pelo caracter ‘/’ e por uma ou mais ações. Se nenhum teste for positivo então a ação tomada é aquela indicada pela seta ‘[else]’.

No diagrama de estados, deve-se limitar o nível de detalhamento do modelo para evitar uma explosão de estados e a conseqüente introdução de redundância no código que implementa o modelo. Assim os estados modelados devem **encapsular** um conjunto de estados relativos a eventos de menor importância. Por exemplo, se um sensor não crítico entra no estado *off-line*, o fato é registrado por um operador booleano, sem a necessidade de definir um estado dedicado a esta condição.

3.1.8 Dispositivos Genéricos

Os conceitos de dispositivos genéricos e de transparência no acesso e localização são fundamentais para o modelo de automação distribuída proposto neste trabalho. A transparência na localização é baseada no Corretor de Nomes, como já foi discutido anteriormente. Nesta seção discute-se o conceito de objetos dispositivos de hardware e, em particular, o conceito de dispositivos genéricos. A partir de objetos dispositivos, os aplicativos de controle podem acessar os dispositivos de hardware, instalados no campo, sem conhecer seus detalhes de implementação ou a forma como se comunicam.

Nos sistemas convencionais de automação agrícola, os aplicativos de controle são dedicados ao *hardware* de controle e aos métodos de aquisição de dados. Considere o caso de um aplicativo de controle de irrigação que utiliza dados de um sensor de umidade. Tipicamente este aplicativo teria que incorporar um código específico para aquisição, por telemetria, dos dados do sensor, e um código para traduzir estes dados em valores de umidade. O aplicativo fica então dedicado a uma configuração específica de hardware, caracterizando assim um **sistema fechado**.

A representação de *hardware* através de objetos do tipo dispositivo genérico, simplifica o desenvolvimento dos aplicativos de controle. O conceito de dispositivos genéricos pode ser melhor compreendido através do seguinte exemplo: 'uma válvula pneumática, pode ser controlada por uma válvula piloto, cujo solenóide é acionado por 24 V ca obtidos de um relê. Este, por sua vez, é acionado por uma saída digital do microcontrolador da estação de campo. Esta cadeia de dispositivos pode ser representada por um dispositivo genérico do tipo 'AtuadorLigaDesliga'. Os dispositivos genéricos implementados neste trabalho são:

- *Sensor*, representa sensores e detetores que retornam valores inteiros e, quando caracterizados e calibrados, também retornam valores de ponto flutuante;
- *LigaDesliga*, representa válvulas, comportas, aquecedores, bombas, etc.; que têm atuadores do tipo liga/desliga;
- *AtuadorCíclico*, representa válvulas, comportas aquecedores, etc.; que tem atuadores do tipo liga/desliga mas, que são acionados com a variação do ciclo de trabalho. Embora seja possível que um computador central envie freqüentemente, comandos para ligar/desligar o dispositivo, é mais sensato que esta função seja efetuada pela estação de campo à qual o dispositivo está associado. Desta forma, o tráfego de dados nas redes é reduzido, e é assegurada maior precisão na temporização, eliminando os atrasos no recebimento dos comandos;

- *Atuador*, representa *hardware* como válvulas e comportas, que são equipados com atuadores variáveis;
- *ControladorPID*, representa uma entidade ‘inteligente’, localizada remotamente (no campo), que implementa a função de controle proporcional, integral e derivativa. Esta entidade manipula a variável de um processo (um dispositivo do tipo ‘Sensor’) através de um elemento final de controle (um dispositivo do tipo ‘AtuadorLinear’); e
- *ControladorCiclado*, semelhante ao ‘ControladorPIDr’, exceto que o elemento final de controle é representado por um dispositivo ‘AtuadorCíclico’.

A maioria dos dispositivos de hardware, localizados no campo, pode ser representada por objetos genéricos dentre os que foram descritos acima. Espera-se, com a continuidade deste trabalho de pesquisa, que novos dispositivos genéricos sejam adicionados a esta relação. Entretanto, sempre haverá máquinas e equipamentos agrícolas que não poderão ser enquadrados na categoria de dispositivos genéricos. Nestes casos serão necessários classes especiais para representa-los. Na criação de uma nova classe de dispositivo especial deve-se assegurar uma padronização na sua interface, de modo a fomentar a reutilização das classes, na medida que dispositivos de outras origens também possam ser representados por elas.

Tomando como exemplo o caso de um sensor, o trecho de código a seguir mostra como este dispositivo é localizado e lido por um aplicativo de controle:

```

class MeuAplicativo : public Aplicativo {
    AgenteSensor *pSensor;
    char cSensorNome[32];
...
public:
    void Online(void);
    ProcessaEvento(int, int, int, int);
    void Offline(void);
    ...
};

// ativar objeto e todos seus recursos
void MeuAplicativo :: Online(void)
{
    pSensor = CriaAgent(cSensorNone, "Sensor");
}

// desativar objeto e seus recursos
void MeuAplicativo :: Offline(void)
{
    pSensor->Offline();
}

// processamento de eventos
void MeuAplicativo :: ProcessaEvento(int iEvento, int iParam1, int iParam2, int iParam3)
{
    double dDados;
    switch(iEvento) {
        case E_INICIAR:
            Temporizador(10);
            break;
        case E_TEMPO:
            pSensor->Ler(&dDados);
            break;
        case E_TERMINAR:
            Temporizador(0);
    }
}

```

O aplicativo tem um apontador tipo 'Sensor', através de qual ele acessa o agente. Na função 'Online' do aplicativo o serviço CriaAgente é invocado para criar um agente do tipo 'Sensor'. Na função ProcessaEvento, o aplicativo inicializa um temporizador para 10 s e fica lendo o estado do sensor a cada evento E_TEMPO.

A Figura 3-13 ilustra a janela usada para configurar um sensor genérico. Neste exemplo a conversão entre valor binário e valor real para o sensor é feita linearmente. Para o caso de uma conversão não linear o usuário desativa o controle 'Conversão Linear' e modifica a curva de conversão utilizando cliques do mouse.

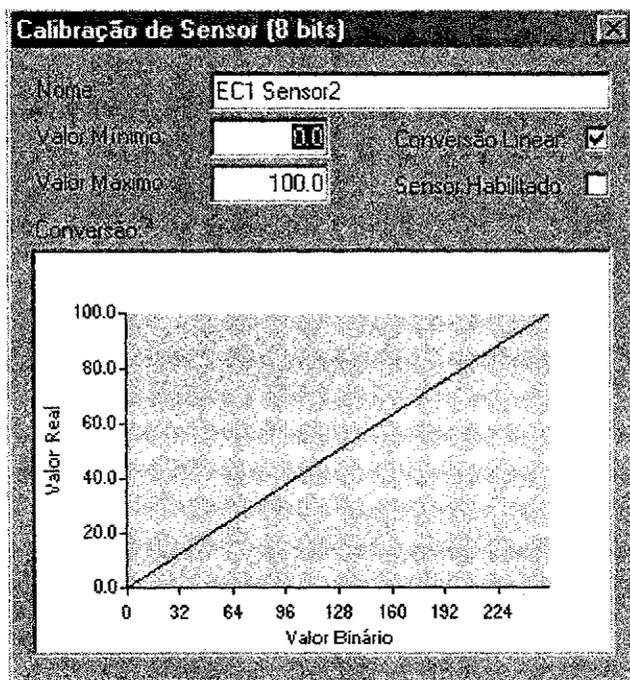


Figura 3-13 - Janela de configuração de sensor

3.1.9 Recuperação de Falhas

Falhas que possam levar a uma reinicialização do sistema de controle (queda de energia, 'travamento' do sistema operacional) deverão disparar um **mecanismo de recuperação** do estado dos aplicativos. O mecanismo de recuperação adotado no sistema FarmWeb está limitado à capacidade de cada aplicativo salvar seu estado e disponibilizar esta informação durante o processo de recuperação. Aplicativos que lidam com processos contínuos (a exemplo do controle de uma casa de vegetação), dispõem deste mecanismo, uma vez que podem recuperar seu estado através da leitura dos sensores e atuadores do processo como parte de uma inicialização. Por outro lado, algumas categorias de aplicativo controlam processos que ocorrem em etapas distintas, a exemplo da irrigação por sulco com as fases de avanço, aplicação, recessão, etc. Para estas categorias são necessárias informações sobre o estado anterior à falha. Assim, no controle da irrigação, os dados relativos ao estado anterior deverão

incluir informações sobre a quantidade de água aplicada originalmente, sobre o tempo de início da irrigação e a fase atual do processo de irrigação.

Uma vez que a informação sobre o estado de um processo difere entre os aplicativos, o mecanismo de recuperação de estado deve ser flexível. Assim, no sistema FarmWeb, cada aplicativo mantém dados de estado sobre o respectivo processo em uma estrutura própria. A cada mudança de estado interno a função *FxSalvaEstado* é invocada, e o sistema salva esta estrutura em disco. Após uma reinicialização imprevista, o aplicativo recebe o evento *E_RECUPERAR* ao invés do evento *E_INICIAR*. Uma vez recebendo *E_INICIAR*, o aplicativo chama a função *FxLerEstado* para recuperar os dados de estado e gerenciar uma recuperação do controle do processo.

3.1.10 Segurança no Acesso

A questão de segurança é fundamental para um sistema distribuído de automação, especialmente para sistemas nos quais se pretende utilizar a Internet como meio de interligação. Sem mecanismos eficazes de segurança, pessoas não autorizadas (*hackers*) podem configurar seus computadores como nós FarmWeb e tornarem-se intrusos em grupos de automação. Uma vez em um grupo de automação, um intruso pode monitorizar os processos nele controlados e interferir nos seus perfis de controle.

Para obter um grau de proteção contra este tipo de intrusão, o sistema FarmWeb implementa um mecanismo de segurança baseado em listas de endereços clientes autorizados. Cada nó de um grupo de automação é configurado com uma lista de endereços numéricos IP¹⁷. Estes endereços indicam quais computadores são autorizados a ter acesso aos recursos através do Serviço de Nomes. Quaisquer mensagens vindas de nós que não estão na lista são descartados e o usuário autorizado é alertado através do gerenciador de eventos de sistema.

3.1.11 Persistência de Objetos

Na orientação a objeto, a persistência de um objeto diz respeito à capacidade do objeto manter seu estado, independentemente de um trecho executável no sistema. Na prática, isso traduz-se na capacidade de um objeto salvar e recuperar, em disco rígido, uma seleção das suas variáveis. Em um sistema distribuído, a persistência dos objetos deve ser transparente, ou seja, a ativação/ desativação de recursos não deve ser percebida.

Deste ponto de vista, um sistema FarmWeb é basicamente uma coleção de objetos instanciados de classes C++. Todas as classe derivadas de 'Cadastrado' incluem os métodos 'Salvar' e 'Recuperar', os quais implementam a persistência destes objetos através da escrita das variáveis em arquivo. O código a seguir ilustra estas duas funções:

```
// classe usado para exemplificar usa de persistencia
class Teste : public Cadastrado {
    int iVar1, iVar2;
    char cVar3[256];
};
```

¹⁷ IP - Endereço que consiste de quatro números, usado nas redes TCP/IP (exemplo: 150.165.93.254)

```

MenuObjeto Obj;
...
public:
    void Salvar(Projeto);
    void Recuperar(Projeto);
...
};

// salvar estado
void Teste :: Salvar(Projeto P)
{
    P << iVar1 << dVar2 << cVar3 << Obj;
}

// recuperar estado
void Teste :: Recuperar(Projeto P)
{
    P >> iVar1 >> dVar2 >> dVar3 >> Obj;
}

```

A classe 'Arquivo' encapsula a funcionalidade de um arquivo de projeto. Os objetos cadastrados podem salvar e recuperar suas variáveis neste arquivo de projeto através do 'overloading' dos operadores '<<' e '>>'.

3.1.12 Ferramentas

Além de aplicativos de controle e gerenciamento, cada módulo FarmWeb também pode conter objetos do tipo ferramenta. A funcionalidade das ferramentas depende do módulo, mas em geral estas ferramentas permitem realizar análises e simulações relacionadas a um processo específico, de forma independente dos aplicativos de controle. Por exemplo, um módulo que contém uma seleção de aplicativos para o controle de aviário pode também conter uma ferramenta que simula este ambiente. Esta ferramenta poderia ser usada para investigar o efeito de alterações físicas nos aviários sobre as condições ambientais, sobre as aves ou sobre os custos de operação. Duas ferramentas foram implementadas no módulo de controle da irrigação. Estas ferramentas estão descritas na seção 4.7.

3.2 INTERFACE COM O USUÁRIO

A interface gráfica do sistema FarmWeb adota o modelo de interação do ambiente *Windows* e consequentemente baseia-se no seu guia de estilo [Petzold 1990]. O guia de estilo, explica o paradigma da interação (ex. manipulação direta, interface multi-janelas), descreve quais dispositivos de interação (mouse, teclado, monitor, ..) serão utilizados e como serão utilizados; descreve os mecanismos de ajuda (mensagens, recuperação de erros) e detalha a apresentação da informação (janelas, ícones, gráficos, leiaute de telas, etc). O guia de estilo do sistema FarmWeb foi proposto com base no contexto das aplicações FarmWeb e de acordo com seus objetivos de usabilidade¹⁸. O guia de estilo do sistema FarmWeb oferece um arcabouço concreto para o projeto da interface dos componentes deste sistema e de suas aplicações.

¹⁸ Usabilidade – Facilidade de uso da funcionalidade de um sistema interativo.

A Figura 3-14 ilustra o diagrama UML 'Use Cases' da interface. Este diagrama mostra, de forma geral, as interações entre os vários componentes do sistema e entidades externas ao sistema, as quais neste caso são o engenheiro e o operador. O engenheiro é responsável pela configuração do sistema e seu gerenciamento, enquanto o operador se limita ao manuseio dos aplicativos executados no sistema.

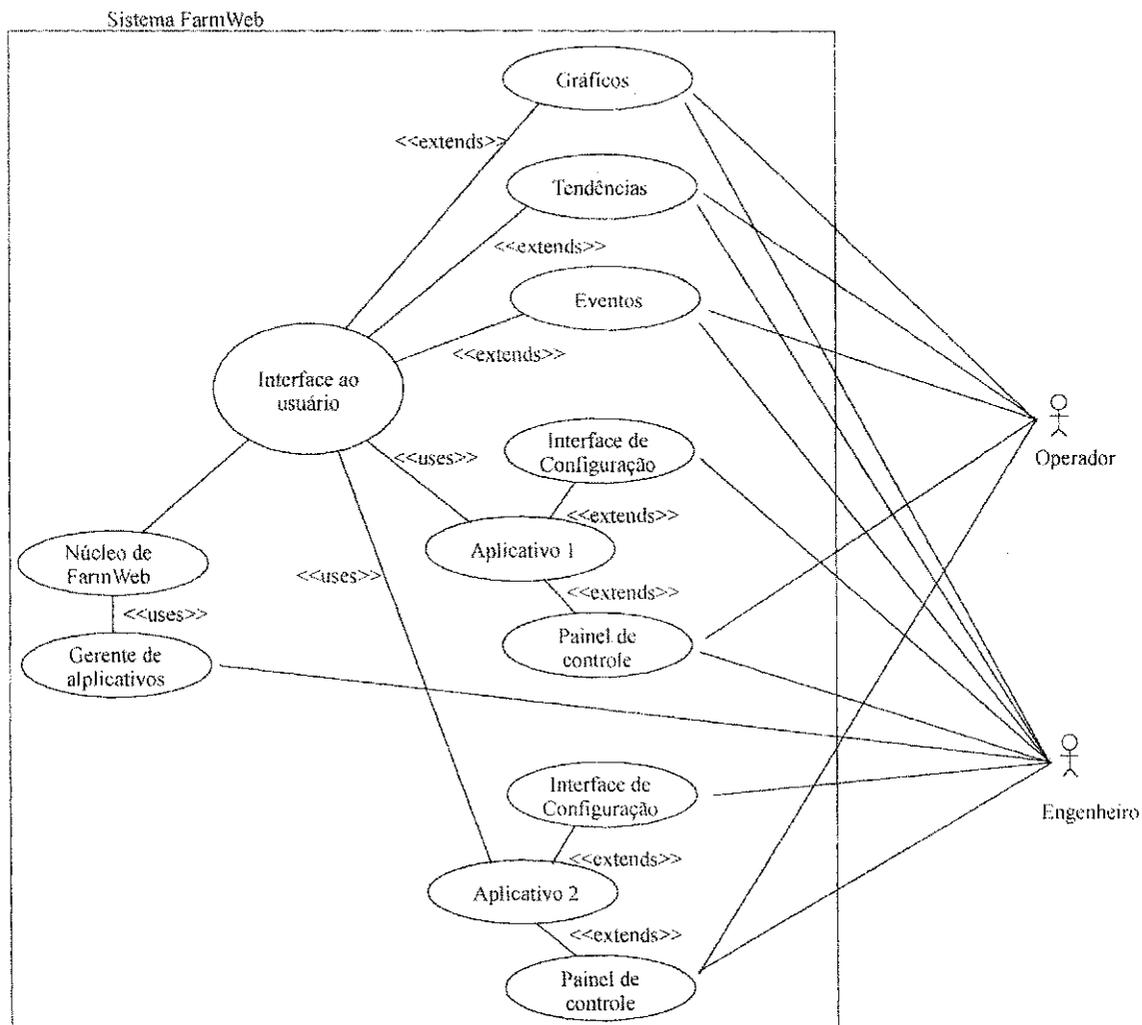


Figura 3-14 Diagrama UML 'Use cases'

Na interface FarmWeb foram utilizados objetos típicos do ambiente Windows tais como janelas, menus, controles, caixas de diálogo. Foram também definidos novos objetos gráficos, tais como representações icônicas dos equipamentos agrícolas, para os quais foram especificados tanto a aparência quanto seu comportamento. No projeto da interface foram adotados os dispositivos de interação: teclado, mouse e monitor; foi definido um conjunto de mensagens (erro, informativas, de aviso) e de mecanismos de ajuda e o formato e a disposição dos componentes de uma tela (*template*) para diferentes situações.

A escolha do padrão *Windows* de interação fundamentou-se em critérios tais como: interface gráfica, suporte para rede e suporte para processamento multitarefa. Alternativas ao padrão Windows teriam sido UNIX com X Windows e o OS/2. As decisões relativas ao projeto da interface do sistema

FarmWeb foram tomadas sob a perspectiva dos objetivos de usabilidade: facilidade de aprendizado e baixa taxa de erros, levando em consideração o perfil dos usuários do sistema FarmWeb, a seguir.

Dentre as classes de usuários do sistema FarmWeb estão profissionais da área de Engenharia Agrícola, tais como engenheiros, pesquisadores, alunos e professores de áreas relacionadas à automação de processos agrícolas. Estes usuários caracterizam-se por apresentar experiência limitada no uso de computadores, não dispõem de tempo para treinamento no uso de sistemas e os resultados de sua atividade de projeto ou análise são sensíveis a erros de interação, e podem resultar em prejuízos financeiros.

3.2.1 Interface Baseada em Janelas

A interface do sistema FarmWeb baseia-se na interação com janelas gráficas. Estas janelas podem ser configuradas pelos usuários de modo a oferecer representações sinópticas dos processos agrícolas. A representação gráfica facilita a visualização do estado dos processos e do seu controle. A Figura 3-15 apresenta a interface com o usuário de um projeto de automação. Nesta figura, uma janela sinóptica principal (quadrante superior esquerdo) apresenta uma visão geral das instalações agrícolas, enquanto janelas sinópticas secundárias detalham os processos individuais. Janelas auxiliares oferecem informação na forma de relatórios, gráficos e eventos. Um exemplo de janela de eventos é apresentado na parte inferior da figura. Apesar da aparente sobrecarga visual das janelas, a familiaridade com suas informações é rapidamente alcançada uma vez que estas informações representam de forma gráfica uma visão sinóptica do processo. A representação gráfica dos objetos envolvidos no processo é auto-explicativa. Para diminuir a sobrecarga visual, o usuário pode reduzir o número de janelas em exibição, invocando janelas auxiliares à medida que forem necessárias.

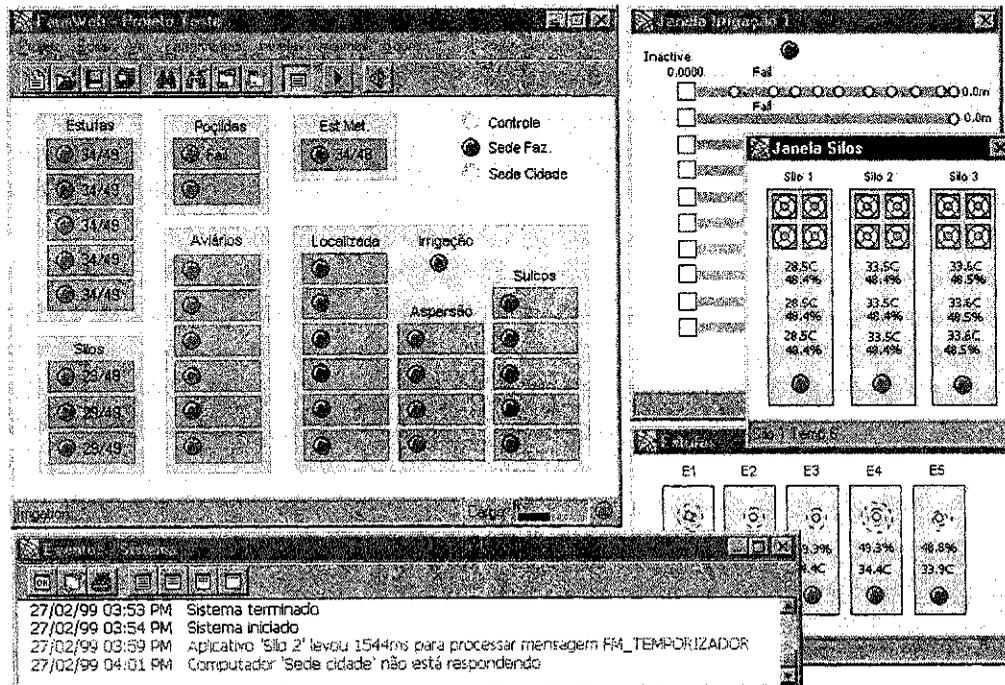


Figura 3-15: Interface multi-janela

Janela Sinóptica Principal

A Figura 3-16 ilustra um exemplo de janela sinóptica principal. Os objetos representados e sua localização na janela são configurado pelo usuário, de modo a representar os processos controlados e o estado em que encontram-se (inativos, ativos, com erro, etc.). O fundo da figura pode ser configurado com o aplicativo *Paintbrush*. Sobre o fundo são dispostos símbolos gráficos, que foram selecionados para representar os objetos cadastrados no Serviço de Nomes.

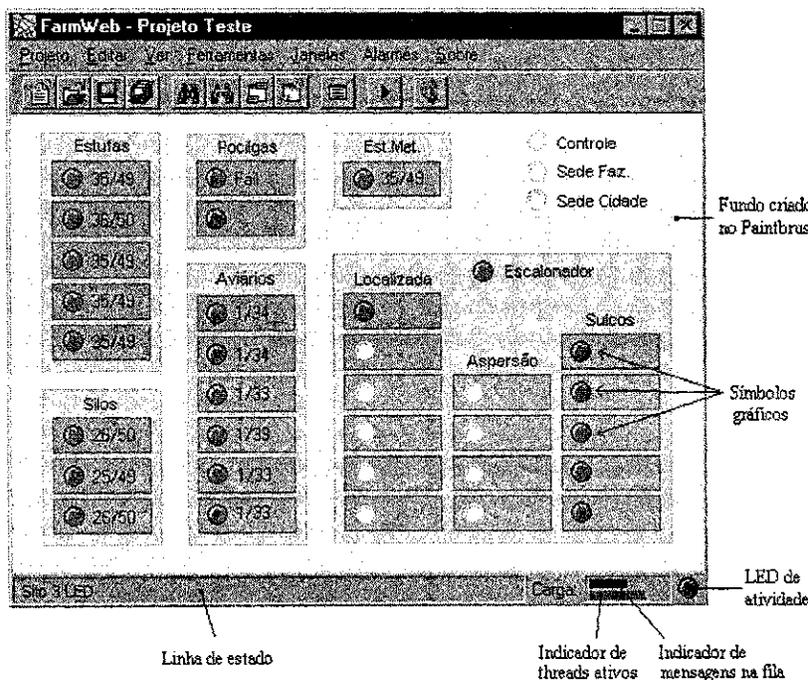


Figura 3-16: Exemplo de janela sinóptica principal

A janela principal apresenta uma barra de estado na parte inferior, com três itens de informação:

- *Área de estado*, dependendo da atividade sendo executada pelo operador, esta área pode apresentar mensagens de eventos, coordenadas do cursor, ou nomes dos símbolos.
- *Indicador tipo LED de atividade*, indica o estado do sistema como um todo. Quando este indicador LED está apagado, todos os aplicativos estão inativos. Quando está verde e piscando a cada segundo, há aplicativos ativos e o relógio de tempo real está em operação. Finalmente, quando este indicador LED está vermelho, ocorreu um erro grave no sistema, que está prejudicando seu funcionamento.
- *Barra de atividade*, mostra a capacidade do sistema lidar com eventos processados em tempo real. A barra superior apresenta o número de mensagens na fila e a barra inferior mostra o número de trechos executáveis que estão processando mensagens. Quando estas duas barras permanecem preenchidas o sistema está com problemas para manter seus compromissos em tempo real.

A janela principal disponibiliza diversos comandos, através de menus. (Ver Tabela 3-2).

Tabela 3-2: Sumário dos comandos de menu

Menu	Comando	Descrição
Projeto	Novo	Criar um novo projeto de automação
	Abrir	Abrir um projeto de automação
	Salvar	Salvar um projeto de automação
	Salvar Como	Salvar um projeto de automação com nome especificado
Editar	Projeto	Editar propriedades de um projeto
	Aplicativo	Editar propriedades de um aplicativo de controle ou gerente de hardware
	Janela	Editar propriedades de uma janela
	Localizar Substituir	Localizar objetos com nome especificado Substituir nomes de objetos por outro especificado
Ver	Serviço de Nomes	Mostrar janela dos objetos cadastrados
	Aplicativos	Mostrar janela de aplicativos
	Eventos	Mostrar janela especificada de eventos
Janelas	Mostrar	Mostrar janela secundária especificada
	Mostrar Todos	Mostrar todas as janelas
	Esconder Todos	Mostrar apenas janela principal
Sobre	Sobre FarmWeb	Mostra versão atual e informação de direitos autorais

Janelas Sinópticas Secundárias

Janelas sinópticas secundárias apresentam detalhes sobre processos representados na janela principal. De forma semelhante a uma janela principal, uma janela secundária tem o fundo criado no aplicativo *Paintbrush* sobre o qual é disposta uma coleção de símbolos gráficos. Um exemplo de janela sinóptica secundária é apresentado na Figura 3-17. Nesta janela são apresentados os estados de seis aviários. Para cada aviário há símbolos que representam a umidade, a temperatura e o estado de ventiladores e de telas de esfriamento.

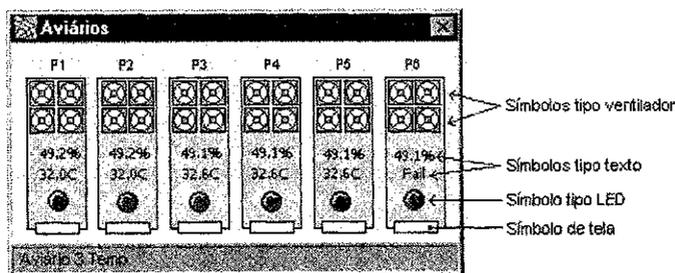


Figura 3-17: Exemplo de janela sinóptica secundária

Na interface do sistema FarmWeb, símbolos gráficos utilizam cores e animação para representar os estados dos objetos que representam. Os símbolos gráficos do tipo LED mudam de cor (cinza, verde, vermelha) de acordo com o estado dos objetos (Figura 3-17). Ao invés de cor, os símbolos tipo ventilador, representados nesta figura utilizam animação para indicar o estado. As pás de cada ventilador, giram uma vez por segundo.

3.2.2 Criação de Janelas Sinópticas

A criação de uma janela sinóptica é um processo simples, que pode ser feito por usuários finais durante a criação e extensão de um projeto de automação. O processo de criação de janelas consiste de três etapas:

- *Definição do fundo* da janela na forma de um arquivo tipo *bitmap*, utilizando o aplicativo *Paintbrush*. Sugere-se que o fundo deve representar uma visão estática do processo, ou processos envolvidos.
- *Criação de um objeto tipo 'janela sinóptica'*. Isto dá-se através da manipulação de menus, na janela principal, especificando o nome da janela e o nome do arquivo de fundo.
- *Adição de símbolos gráficos* à janela recém-criada. Os símbolos são selecionados de uma biblioteca de símbolos, na qual estão representados ventiladores, bombas, pulverizadores, LEDs, textos, barras, etc.

Os símbolos gráficos podem ser configurados no que diz respeito ao tamanho, orientação, cor, etc. A configuração é feita através de caixas de diálogo. Um exemplo de configuração é apresentado na Figura 3-18. O campo *Associação*, na caixa de diálogo, indica o objeto cadastrado ao qual este símbolo deve ser associado. A representação visual do símbolo depende do estado do objeto associado. Por exemplo, o símbolo de um ventilador dispõe de animação (giro das pás) para representar o estado ativo do objeto cadastrado associado.

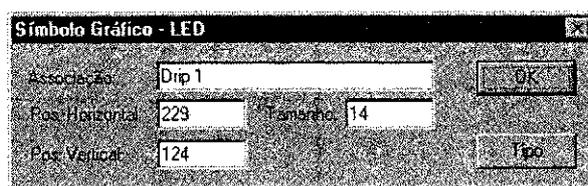


Figura 3-18: Janela de configuração de símbolo gráfico

O botão 'Tipo' desta caixa de diálogo permite ao operador mudar o tipo do símbolo, mantendo os demais atributos do símbolo original, tais como: tamanho, posição, orientação, cor, etc. Este recurso facilita a escolha entre diversos símbolos que representem o mesmo tipo de dispositivo.

3.2.3 Estilo de Interação

Os aplicativos oferecem uma interface baseada em janelas para sua configuração e para visualização do estado do processo sob controle. A padronização do estilo de interação entre diversos aplicativos de um sistema de controle facilita sua integração. A padronização aumenta a usabilidade do sistema, uma vez que dispensa o usuário de memorizar detalhes da interface de cada aplicativo. O estilo de interação adotado no sistema FarmWeb, inclui o uso de menus associados a símbolos gráficos, como ilustra a Figura 3-19. Quando o usuário seleciona um símbolo com o mouse, é apresentada uma lista dos comandos associados ao símbolo, na forma de um menu dinâmico. O conteúdo do menu dinâmico depende do objeto que o símbolo representa e do estado atual daquele objeto. Ou seja, o conteúdo do menu é sensível ao contexto atual do objeto.

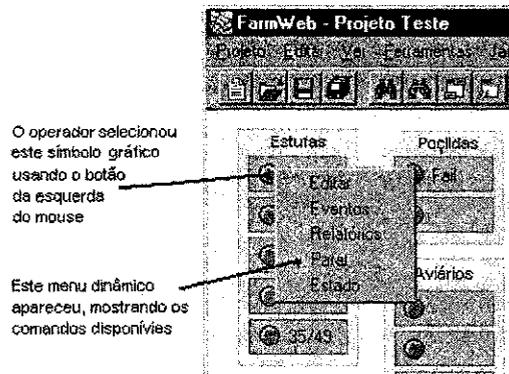


Figura 3-19: Menu dinâmico e comandos disponíveis

Cada objeto cadastrado é responsável pela manutenção de uma estrutura de dados que informa ao sistema FarmWeb os comandos permitidos em um certo ponto da interação. Esta estrutura armazena os textos associados aos comandos (por exemplo 'Editar', 'Relatório', 'Eventos') e, uma máscara que indica quais os comandos disponíveis. O mecanismo de menus dinâmicos não restringe-se aos objetos do tipo aplicativo, podendo ser utilizado para qualquer objeto cadastrado, desde que seja mantida uma estrutura de dados, como aquela descrita. O mecanismo de invocação de menus dinâmicos é ilustrado na Figura 3-20.

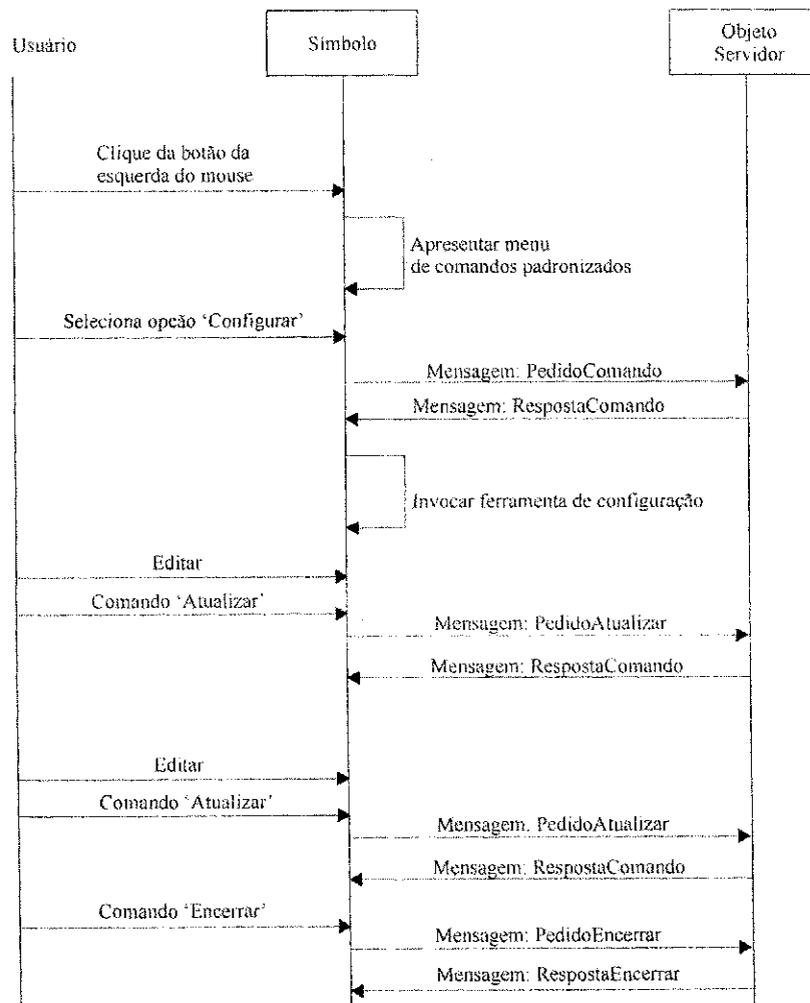


Figura 3-20 Uso de menus dinâmicos para invocar ferramenta de configuração

O detalhamento dos mecanismos de ajuda (mensagens, recuperação de erros) e da apresentação da informação é apresentado ao longo deste texto à medida que os recursos do sistema FarmWeb são apresentados.

3.3 SERVIÇOS DE APOIO

Uma característica de um sistema integrado é o oferecimento de um conjunto de serviços comuns para facilitar o desenvolvimento de aplicativos. A utilização destes serviços reduz o esforço de desenvolvimento necessário para criar aplicativos de controle e incentiva um *look and feel* comum entre os aplicativos.

Os serviços de apoio no sistema FarmWeb são implementados como classes da linguagem C++. Objetos destas classes podem ser instanciados nos aplicativos através da sua inclusão como membros tipo variável. A seguir são descritos os serviços atualmente disponíveis: Tratamento de Eventos, Gerador de Gráficos, Gerador de Relatórios e Análise Numérica.

3.3.1 Serviço para Tratamento de Eventos

O tratamento adequado de eventos é fundamental em qualquer sistema de automação. Os eventos de menor importância devem ser tratados de forma transparente, a menos que o operador queira vê-los, explicitamente. Os eventos de maior importância, tais como os alarmes, têm que ser trazidos à atenção imediata do operador. No sistema FarmWeb são atribuídas prioridades aos eventos na faixa de zero (mais baixa) a três (mais alta). Os eventos com prioridade 2 e 3 são tratados como alarmes. A Tabela 3-3 ilustra a atribuição das prioridades aos eventos, no aplicativo de controle da irrigação.

Tabela 3-3: Classificação de eventos no controle da irrigação

Prioridade	Classificação	Exemplos de evento
0	Eventos de rotina	Acionamento de válvulas de entrada de água, alteração do estado de detetores de água.
1	Eventos de destaque	Início e término de sessões, progressão de uma fase para outra.
2	Alarmes que prejudicam (mas não impossibilitam) o controle do processo	Falha de um detetor de água.
3	Alarmes que inviabilizam o controle do processo	Falha da válvula de entrada de água

A Figura 3-21 apresenta um exemplo de janela de eventos. Na barra de ferramentas estão disponíveis sete botões. Os primeiros três botões, permitem ao usuário reconhecer um alarme (eventos de nível 2 e 3), apagar todos os eventos, e imprimir os eventos, nesta ordem respectivamente. Os quatro botões à direita permitem escolher o nível de visualização de eventos. Ou seja, o primeiro botão causa a apresentação de todos os eventos e o último botão causa a apresentação apenas dos eventos de nível 3.

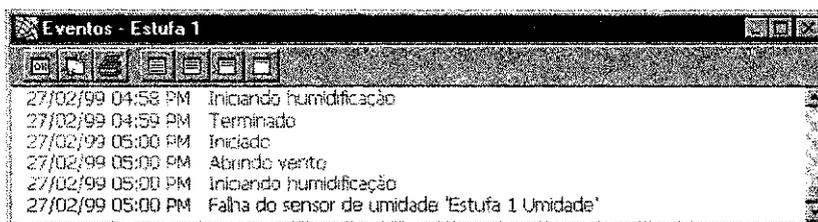


Figura 3-21: Janela de eventos

Um aplicativo pode realizar o gerenciamento de eventos através da instanciação da classe *GerenciadorEventos*. O registro de um evento é feito através da função *CriarEvento* desta classe, conforme demonstra o exemplo a seguir:

```
MeusEventos.CriarEvento(0, "Falha de sensor de temperatura: '%s'", pSensor->cNome);
```

O primeiro parâmetro é a prioridade do evento (0 a 3). O segundo parâmetro é o texto do evento. O sistema FarmWeb possui um objeto do tipo *Eventos* que trata de eventos relacionados com o sistema como um todo. Dentre os eventos gerenciados por este objeto estão: o início e finalização do sistema, perda e recuperação de contato com outro computador do grupo de automação e excesso de entradas na fila de mensagens. Um exemplo de uma janela de eventos de sistema foi apresentado na Figura 3-21.

3.3.2 Serviço de Relatórios

A geração e gerenciamento de relatórios, é uma função importante em um sistema de controle. Para os processos controlados de forma contínua, os relatórios poderão ser gerados a intervalos regulares: diariamente, semanalmente ou mensalmente. Para o controle de processos iniciados sob demanda (como a irrigação, por exemplo) os relatórios poderão ser gerados ao final de cada sessão. O serviço de relatórios disponível no sistema FarmWeb permite a geração de relatórios 'hierárquicos'. Isto é, relatórios nos quais o usuário pode aumentar ou reduzir o nível de detalhamento, obtendo uma visão geral do relatório ou concentrando-se em aspectos específicos. A Figura 3-22 apresenta uma janela de relatórios. Nesta figura, o nível de detalhamento foi elevado ao nível máximo para apresentar detalhes sobre o avanço da água nos sulcos em um processo de irrigação.

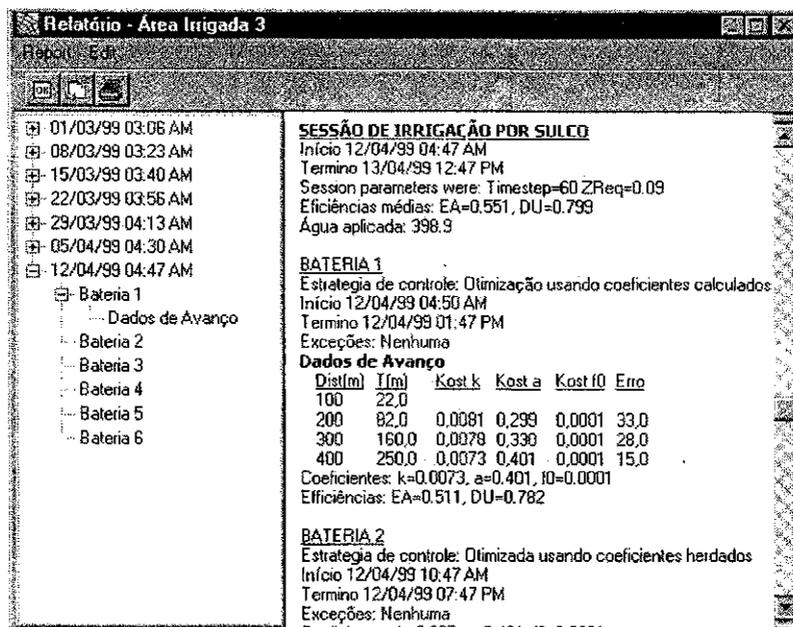


Figura 3-22: Janela de relatório

Na elaboração dos relatórios, o implementador do aplicativo (o programador) dispõe de opções para destacar a informação, tais como: negrito, itálico e sublinhado. Também é possível utilizar comandos de tabulação, permitindo a criação de tabelas de dados. O serviço de relatórios hierárquicos é incluído em um aplicativo, ou gerente de hardware, através da instanciação da classe *GerenciadorRelatórios*, pelo aplicativo. A geração de um relatório é demonstrada no trecho de código a seguir:

```
// crie novo relatório
MeusRelatorios.NovoRelatorio( "Meu Relatório");

// adiciona cabeçalho, o índice da primeira sessão é 0
MeusRelatorios.AdicionaTexto(0, "Text de cabeçalho");
MeusRelatorios.AdicionaTexto(0, "Text de cabeçalho");

// crie nova sessão e adiciona texto
iIndice = MeusRelatorios.CriaScao(0, "Sessão %i", 1);
MeusRelatorios.AdicionaTexto(iIndice, "Texto de sessão 1");
MeusRelatorios.AdicionaTexto(iIndice, "Texto de sessão 1");

// adiciona texto de finalização
MeusRelatorios.AdicionaTexto(0, "Text final");
```

Os relatórios podem ser compostos de seções com até 16 níveis de profundidade de detalhamento. Não foi estabelecido um limite para o número total das seções nem para o número das linhas de texto nas seções.

3.3.3 Serviços Gráficos

A representação gráfica da informação facilita o estudo e a compreensão do comportamento dos processos agrícolas controlados. Nos sistemas de automação mais antigos, a visualização gráfica só era possível através da exportação de dados para pacotes externos como planilhas e aplicativos para geração de gráficos (como por exemplo Excel). Por outro lado, em sistemas integrados é viável

investir no desenvolvimento destes serviços para geração de diversos tipos de gráfico, uma vez que é possível compartilhar sua oferta entre diversos aplicativos de controle.

FarmWeb disponibiliza suporte para geração de três tipos de gráficos: bidimensionais, tridimensionais e de tendências. Os três são implementados como classes C++, e sua utilização consiste na instanciação destas classes nos objetos 'aplicativos de controle'. Cada objeto gráfico é inicializado com um identificador da janela Windows, que é utilizada para plotar o gráfico na tela. Esta janela pode ser uma janela Windows, independente, ou uma janela 'filha' derivada de uma caixa de diálogo. Esta segunda opção é mais conveniente porque permite que o gráfico seja incorporado a uma interface completa com caixas de edição, botões, barras de rolagem, etc. Mais de um objeto gráfico pode compartilhar a mesma janela Windows. Neste caso, controles do tipo rádio, podem acompanhar a janela para permitir ao usuário selecionar o tipo de gráfico que deverá ser apresentado.

Gráficos Bidimensionais

Os gráficos bidimensionais podem ter de dois a quatro eixos. A Figura 3-23 apresenta um exemplo de gráfico bidimensional, sobre dados relativos a uma sessão de irrigação por sulco.

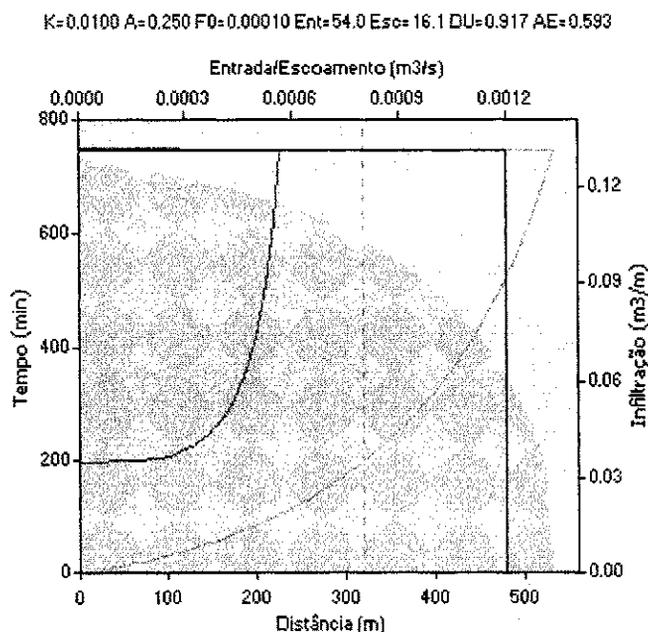


Figura 3-23: Gráfico bidimensional

Gráficos Tridimensionais

A Figura 3-24 apresenta um exemplo de gráfico tridimensional, que faz parte da interface do aplicativo de controle da casa de vegetação. Este gráfico apresenta a variação de temperatura ao longo do dia, durante os últimos 30 dias. Este gráfico compartilha a janela Windows da caixa de diálogo com mais dois objetos gráficos: tendências e temperatura mensal. A seleção entre eles é feita utilizando os botões de rádio representados à esquerda da janela.

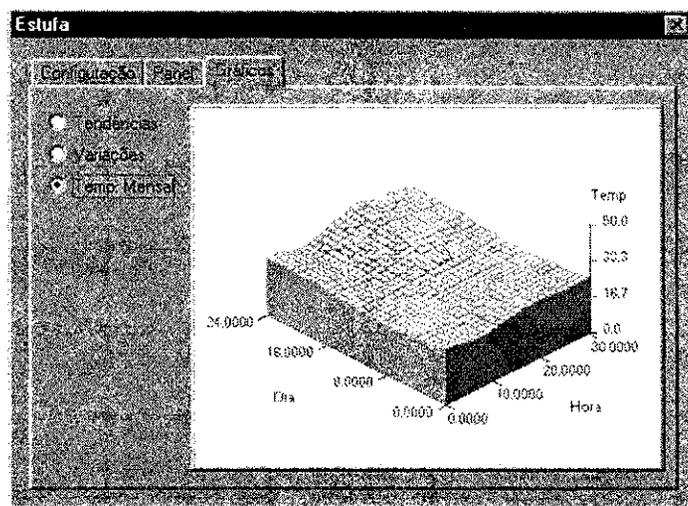


Figura 3-24: Gráfico tridimensional

Os atributos do gráfico podem ser modificados através de um menu, que surge quando o usuário ativa o *mouse* sobre a janela. Através deste menu, o usuário pode: 1) alterar a fonte de texto utilizada, 2) copiar o gráfico para a área de transferência do Windows (tornando-o disponível para outros aplicativos), 3) girar o gráfico para esquerda ou direita em passos de 90 graus, ou 4) destacar o gráfico para uma janela separada, a qual pode ser alterada em tamanho.

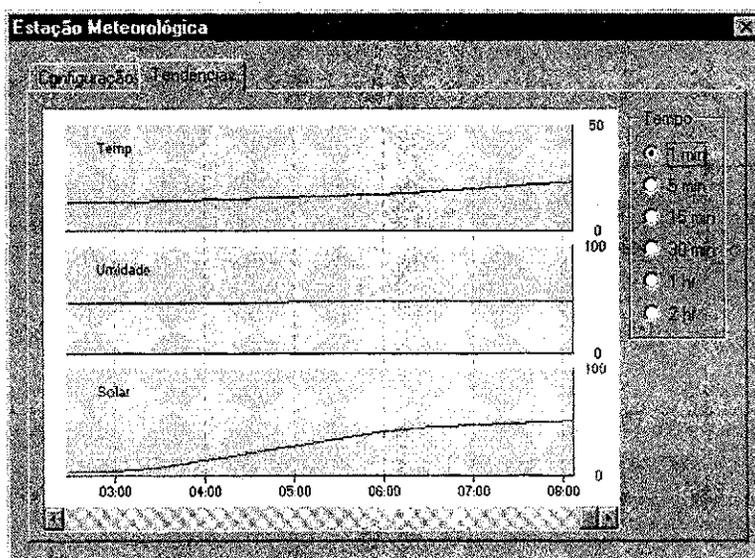


Figura 3-25: Gráfico de tendências

Gráficos de Tendência

O gráfico de tendências é utilizado para monitorar um sistema, a fim de observar-se ao longo do tempo a existência de alterações no comportamento esperado [Brassard 1991]. Para tanto, apresenta a progressão dos dados de um processo ao longo de um intervalo de tempo recente. A Figura 3-25 apresenta um gráfico de tendências que faz parte da janela de monitorização de uma estação meteorológica. Cores diferentes são associadas a variáveis distintas para facilitar a representação de

tendências de diferentes variáveis. Os atributos deste gráfico podem ser configurados pelo usuário, utilizando um menu de comandos.

3.3.4 Serviço de Análise Numérica

O serviço de análise numérica oferece suporte para a análise numérica e é oferecido na forma de classes C++. Um exemplo destas classes é a classe 'NelderMead', que implementa este conhecido método de minimização de função. Esta classe é usada pelo aplicativo controlador da irrigação por sulco a ser descrito no capítulo a seguir. Neste aplicativo, a técnica Nelder Mead identifica os coeficientes de infiltração de água no solo através de dados de avanço ou de escoamento. A classe NelderMead é virtual, ou seja, para que um aplicativo possa usá-la é necessário definir uma classe derivada contendo uma função membro que implemente uma função de erro apropriada para a aplicação.

À medida que o número de aplicativos cresce, as classes de análise numérica podem ser transferidas para a biblioteca de classes FarmWeb, tornando-as disponíveis para uso por outros aplicativos.

3.4 SUPORTE PARA O DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVOS

Esta seção ilustra como o sistema FarmWeb apoia o desenvolvimento de aplicativos para a automação agrícola.

3.4.1 Biblioteca de Apoio a Depuração

A interface de programação (API) do Windows contém centenas de funções [Petzold 1990]. A conferência rigorosa de parâmetros e valores de retorno, de todas as chamadas a estas funções, é inviável devido ao aumento significativo de código a ser escrito e à diminuição da inteligibilidade do código. A prática adotada por programadores é verificar valores de retorno apenas para aquelas funções conhecidas como potencialmente problemáticas (por exemplo funções relacionadas à abertura, leitura e escrita de arquivos). Entretanto, sem uma verificação rigorosa, erros ocasionais na invocação destas funções podem causar instabilidade na execução do programa ou até no sistema operacional Windows.

Para enfrentar este problema, foi introduzida uma biblioteca de funções API paralelas, de modo a auxiliar no processo de depuração de aplicativos em desenvolvimento. Cada função nesta biblioteca possui os mesmos parâmetros que as funções originais, sendo diferenciada pela adição da letra 'X' ao começo do seu nome. Cada função paralela faz a verificação rigorosa dos parâmetros passados e, invoca a função API original, em seguida verifica o valor de retorno. Para ilustrar este mecanismo de verificação, considere a chamada à função *DrawText* da API Windows. Sua função paralela é definida como:

```

// funcao paralela DrawText de depuracao
int XDrawText(HDC hDC, char *pTexto, int iContagem, RECT *pRetangulo, int iFormato)
{
    int iResultado;

    // verifica os dois apontadores
    if (!VerificaApontador((void *) || !VerificaApontador(pRetangulo))
        Erro();

    // verifica coordenados do retangulo
    if (!VerificaRetangulo(pRetangulo))
        Erro();

    // invoca funcao original e retorna resultado
    if ((iResultado = DrawText(hDC, pTexto, iContagem, pRetangulo, iFormato)) == 0)
        Erro();
    return iResultado;
}

```

Esta função paralela verifica a validade do apontador *pTexto*, das coordenadas do retângulo *pRetangulo*, e do valor de retorno *iResultado*. A detecção de qualquer problema resulta na chamada da função *Erro*. Desta forma, qualquer irregularidade nas chamadas das funções API é automaticamente detectada.

O sistema FarmWeb e o conjunto de aplicativos protótipos foram adaptados durante seu desenvolvimento para usar esta biblioteca de depuração. Inicialmente, foi detectado um número elevado de parâmetros errados que FarmWeb usava nas chamadas das funções API do Windows. Uma vez corrigidas os parâmetros, houve uma melhoria substancial na estabilidade do sistema FarmWeb, sendo eliminadas as 'travadas' misteriosas que praguejavam o início do seu desenvolvimento. Em termos formais, a biblioteca de depuração foi responsável pelo aumento da disponibilidade do sistema FarmWeb, que é a fração de tempo que o sistema está operando corretamente [Sinha 1997].

3.4.2 Biblioteca de Processos Simulados

Um dos módulos FarmWeb contém uma seleção de aplicativos que simulam diversos processos agrícolas: aviário, casa de vegetação, pocilga e área irrigada por sulcos. Estes aplicativos contém instâncias de classes *hardware* genérico, do tipo detetor, sensor, atuador e controlador, conforme ilustra a Figura 3-26. Este módulo permite que outros aplicativos sejam testados em um ambiente controlado, utilizando simuladores que emulam o comportamento dos processos a serem controlados.

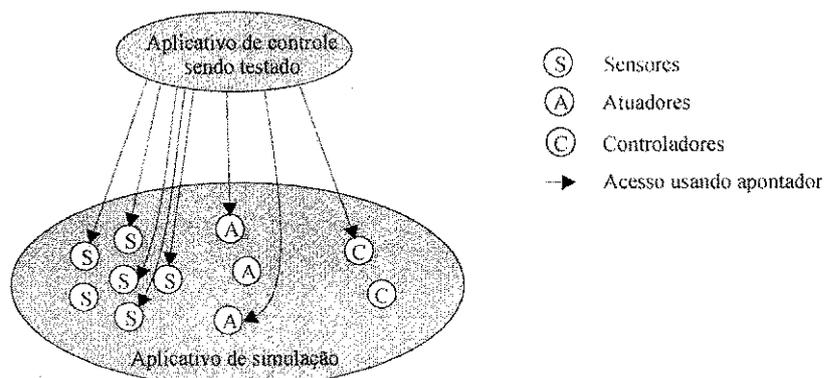


Figura 3-26: Aplicativo de simulação de processo agrícola

3.4.3 Projeto Arcabouço

Para facilitar o desenvolvimento de um aplicativo foi criado um projeto arcabouço. Este projeto contém arquivos de definição, recursos e código para gerar um módulo FarmWeb contendo um aplicativo arcabouço. A estratégia de desenvolver um projeto que servisse de base para o desenvolvimento de novos módulos mostrou-se vantajosa porque assegurou que as opções de compilação e *link*-edição para o novo projeto fossem compatíveis com o sistema FarmWeb e com os demais módulos de aplicativos. A compatibilidade entre módulos é uma característica imprescindível para a integridade de um sistema integrado como o FarmWeb, pois problemas com um dos aplicativos podem comprometer a integridade do sistema como um todo.

4 AUTOMAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA IRRIGAÇÃO POR SULCO

Apresenta-se neste capítulo o trabalho realizado nos aspectos relativos ao controle da irrigação por sulco. O objetivo foi investigar como a aplicação de controle poderia se beneficiar dos recursos oferecidos por um sistema integrado como o sistema FarmWeb. Os aplicativos de controle que serão descritos neste capítulo foram desenvolvidos de acordo com a abordagem proposta para o sistema FarmWeb, ou seja, o algoritmo de controle foi desenvolvido com base em dispositivos genéricos de hardware, objetivando a transparência no acesso e na localização, e possibilitando a integração em uma estrutura hierárquica de controle.

Descreve-se inicialmente o módulo de controle da irrigação de uma forma geral, a estrutura de aplicativos e a comunicação entre eles, de modo a viabilizar o controle integrado da irrigação.

Em seguida são discutidas diversas estratégias de controle e a configuração de dispositivos necessária para realizá-la. Uma destas estratégias implementa uma técnica de otimização do uso de água chamada 'Análise de avanço'. Esta técnica utiliza dados de avanço para identificar os coeficientes de infiltração de água no solo [Azevedo 1992, Bautista 1993a] e gerar uma tabela otimizada de entrada de água para reduzir perdas de água. Outra destas estratégias de controle implementa a técnica 'escoamento zero', proposta neste trabalho, que utiliza dados sobre a fase de aplicação para identificar os coeficientes de infiltração e minimizar as perdas de água por escoamento e infiltração profunda.

A terceira seção apresenta uma análise da sensibilidade do controle aos erros e atrasos no sensoriamento e nos parâmetros de entrada. Para cada fonte de erro é analisado seu efeito sobre a eficiência e a uniformidade da irrigação.

A quarta seção descreve o aplicativo de controle da irrigação por sulco, que busca otimizar a irrigação utilizando parâmetros obtidos a partir da simulação de modelos. Ao descrever este aplicativo, também é detalhada sua interface com o usuário.

A quinta seção descreve duas ferramentas de apoio a decisão que complementam o módulo FarmWeb de irrigação e que dão suporte à análise e à simulação da irrigação, independentemente do contexto de controle.

Finalmente, a última seção descreve o aplicativo 'Gerente de Irrigação', através de qual um usuário pode escalonar sessões de irrigação em diversas áreas. O escalonamento pode ser à base de datas/horas

fixas e repetidas, seqüências de áreas irrigadas, ou sob demanda usando o sensoramento das condições no campo.

4.1 MÓDULO DE CONTROLE DA IRRIGAÇÃO

O módulo para o controle da irrigação faz parte da biblioteca de módulos de expansão para o sistema FarmWeb. Ele pode ser adicionado a um projeto de automação para possibilitar o controle da irrigação como parte de uma solução integrada para a automação agrícola. Este módulo inclui seis classes de aplicativo: o gerente de irrigação, três classes aplicativo para o controle da irrigação por sulco, uma classe aplicativo para o controle da irrigação localizada, e uma classe aplicativo para o controle de irrigação por aspersão. Objetos instanciados destas classes podem ser incluídos num projeto de automação, um exemplo de qual é apresentado na Figura 4-1.

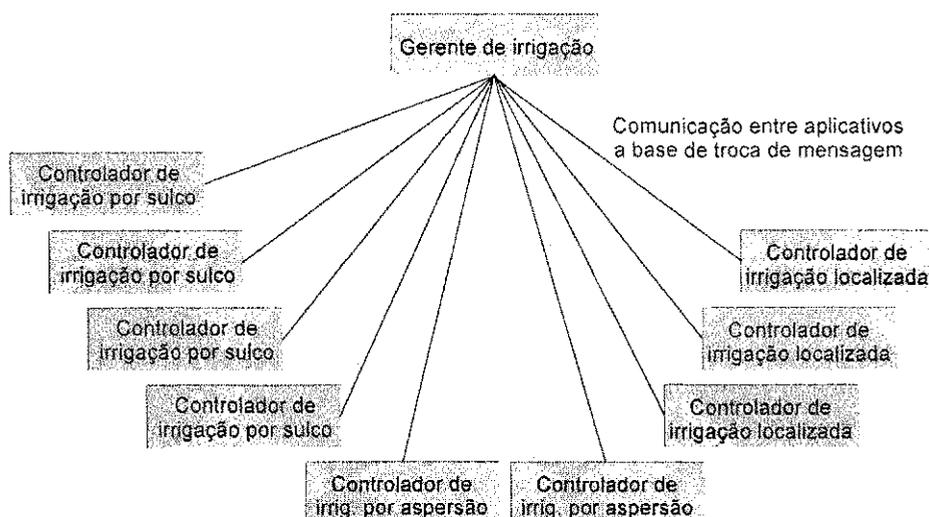


Figura 4-1: Integração de aplicativos do módulo de controle da irrigação

Neste exemplo, nove áreas irrigadas são controladas por nove objetos aplicativo de controle. Estes aplicativos iniciam sessões de irrigação sob o comando do aplicativo gerente de irrigação. O gerente pode escalonar os aplicativos para iniciar sessões de irrigação, de várias maneiras: 1) em dias e horários especificados pelo usuário, 2) a intervalos regulares de tempo, 3) de acordo com as condições do campo, obtidas através de sensoramento, e 4) em seqüência. O gerente de irrigação será discutido em mais detalhe no final deste capítulo.

Os três aplicativos de controle de irrigação por sulco diferem entre si em relação ao tipo de dispositivo usado para controlar a entrada de água nos sulcos. Os dispositivos usados são o 'AtuadorLinear', o 'AtuadorPID', e o 'AtuadorCíclico'. Este trabalho tem se concentrado no desenvolvimento do aplicativo que utiliza um 'AtuadorCíclico', e é este aplicativo que será descrito neste capítulo.

4.2 APLICATIVO DE CONTROLE DA IRRIGAÇÃO POR SULCO

A configuração de dispositivos usada pelo aplicativo de controle da irrigação por sulco, apresentada na Figura 4-2, baseia-se no dispositivo 'AtuadorCíclico' para controlar a entrada de água e um conjunto de sensores. O número de sensores utilizados depende da estratégia de controle de água que venha a ser adotada (ver seção 4.3). Por exemplo, se for adotada a estratégia 'Entrada constante' é necessário apenas um sensor no final do sulco, enquanto que para a estratégia 'Análise de avanço' idealmente são necessários, entre seis e dez sensores. Assim, o número de opções de estratégias de controle, cresce com o aumento do número de sensores. Para assegurar a escalabilidade do sistema de controle da entrada de água, do ponto de vista da adoção de novas estratégias, deve-se adotar uma política de expansão na qual esteja prevista a instalação inicial de um grupo de sensores o qual pode ser expandido sob demanda.

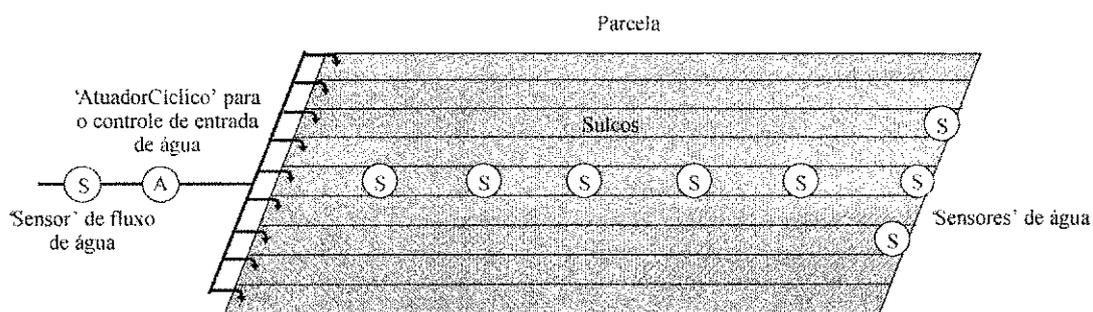


Figura 4-2: Configuração de dispositivos no controle da irrigação por sulco

A entrada de água é medida por um sensor de vazão instalado antes do atuador. Este sensor pode ser dispensado se a coluna, ou pressão operacional, de água na entrada da válvula for relativamente constante. Neste caso o aplicativo permite o uso de uma tabela que relacione a vazão de água com o ciclo de trabalho da válvula. Até dez dispositivos sensores de água podem ser instalados ao longo de um dos sulcos na parcela irrigada. Dois sensores adicionais de água são instalados nos finais de outros sulcos, com o objetivo de detectar desigualdades de avanço entre os sulcos da parcela.

4.2.1 Estruturação do Aplicativo de Controle

O aplicativo para o controle da irrigação por sulco tem o diagrama de classes ilustrado na Figura 4-3. O aplicativo dispõe de uma classe auxiliar 'Parcela' que encapsula as características das parcelas irrigadas. O número de parcelas por aplicativo é configurável de acordo com o projeto de irrigação. Como parte do aplicativo são incluídos dos agentes: 'PainelSulco' e 'ConfigSulco' que permitem a interação do aplicativo com o usuário.

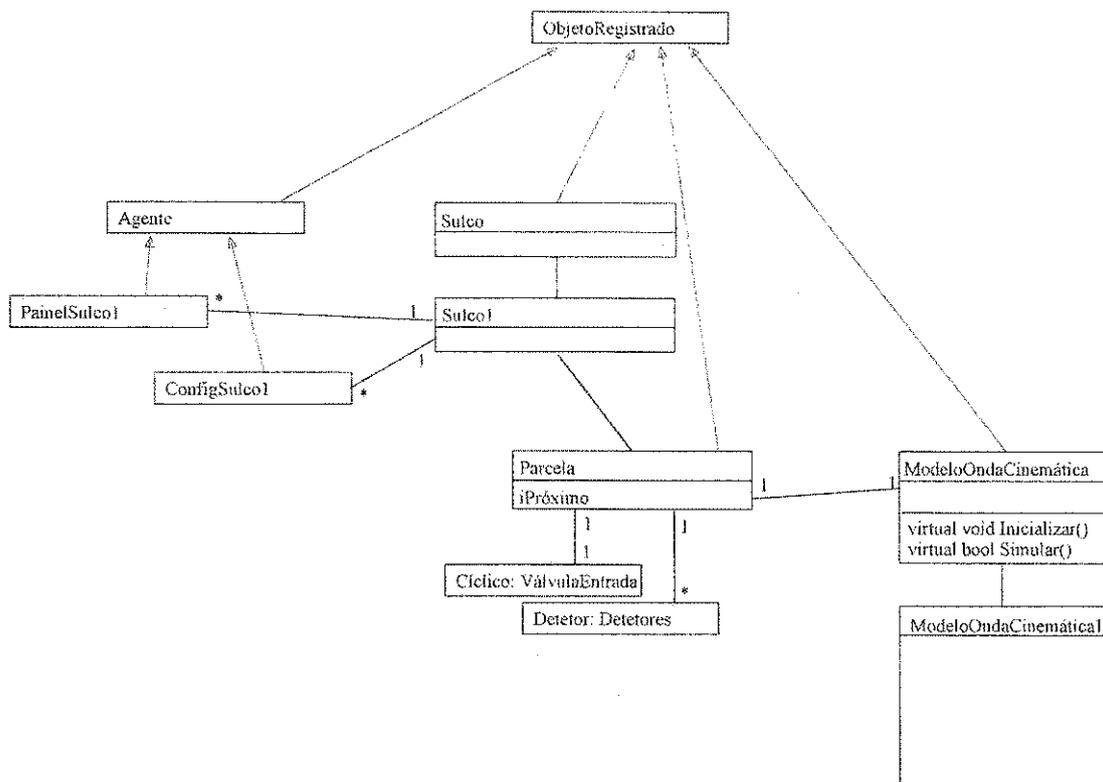


Figura 4-3 Classes que compõem o aplicativo de controle

A classe 'ModeloOndaCinematica' encapsula a funcionalidade do modelo Onda Cinemática. A classe base é virtual e define a interface genérica desta classe. A classe 'ModeloOndaCinematicaI' é a implementação do modelo incluído neste aplicativo. Sendo na forma de um objeto ferramenta, este modelo pode ser substituído posteriormente por outros modelos incluídos em módulos adicionais. A Figura 4-4 ilustra o diagrama de estados para o aplicativo.

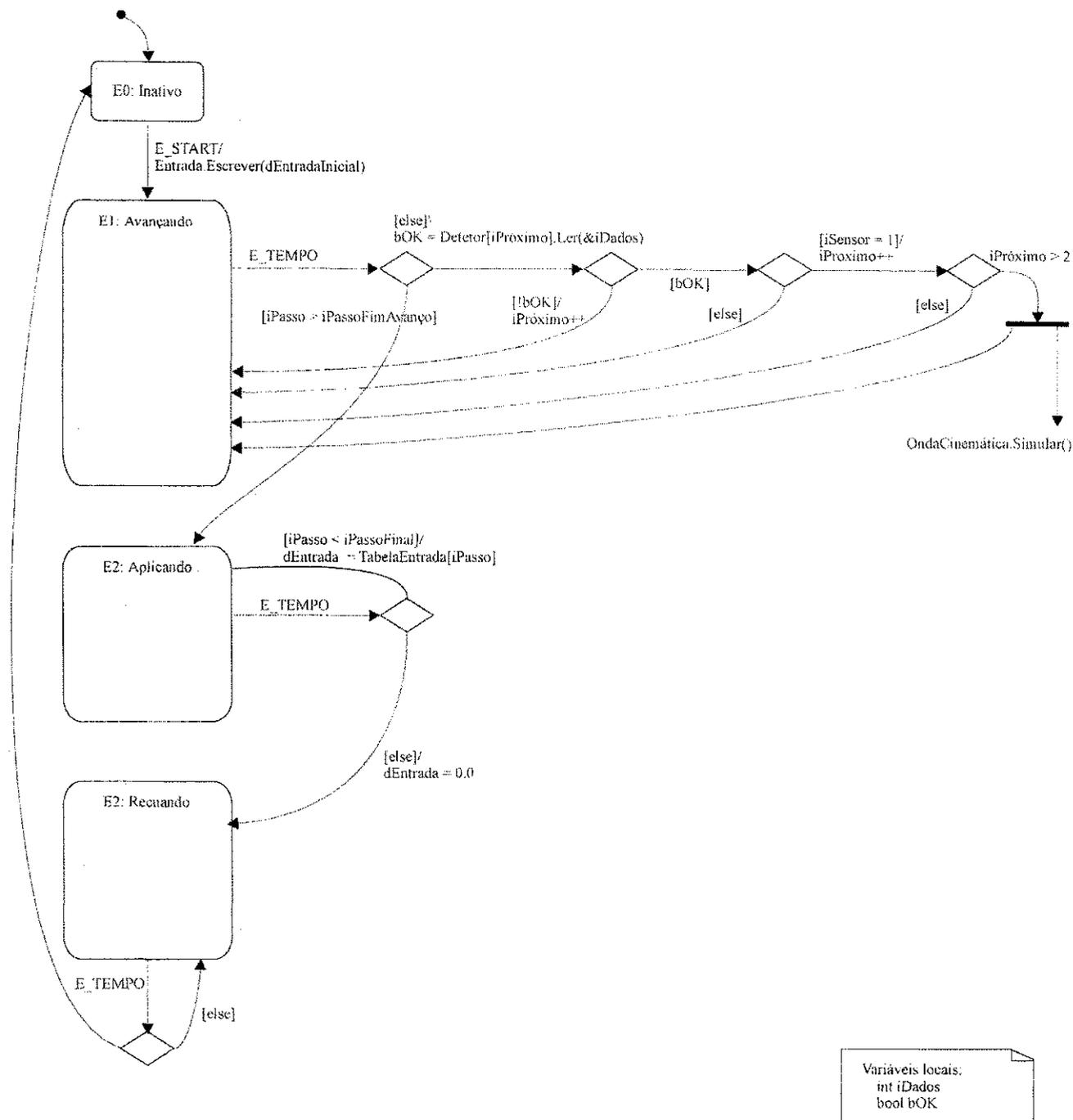


Figura 4-4 Diagrama de estado do aplicativo de controle da irrigação por sulco

4.2.2 Implementação do Modelo Onda-Cinemática

No módulo FarmWeb de irrigação, o modelo Onda Cinemática foi implementado na forma de duas classes C++. A primeira destas classes é baseada no algoritmo proposto por Walker, em [Walker 1987], descrito no Apêndice A. A segunda classe C++ é uma modificação do algoritmo proposto por Walker, de modo a torná-lo mais eficiente objetivando utilizá-lo na técnica ‘redução com regressão’, descrita na seção 4.3.3.

Aplicativos que utilizem o modelo Onda Cinemática, devem instanciar um objeto de uma destas duas classes. Para executar este modelo, e simular uma irrigação por sulco, é necessário repassar ao

objeto várias informações, tais como: o comprimento do sulco; a declividade do sulco, os coeficientes Kostiakov de infiltração, e uma tabela de entrada de água. A partir destas informações, o modelo gera dados de avanço, recessão e escoamento da água no sulco. A partir destes dados são calculadas a infiltração acumulada ao longo do sulco e as medidas de eficiência/uniformidade, como ilustrada a Figura 4-5.

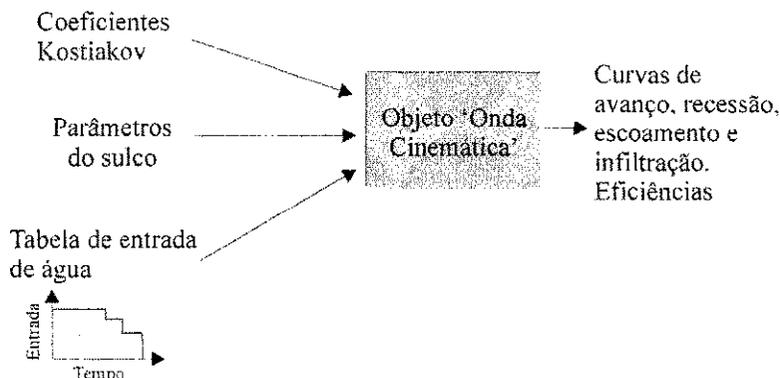


Figura 4-5: Simulação usando o modelo Onda-Cinématica

A tabela de entrada de água consiste em uma estrutura de dados do tipo *array* contendo variáveis de ponto-flutuante. Cada item da tabela corresponde a um valor de entrada de água durante um intervalo de tempo de execução do modelo. A otimização da irrigação por sulco, utilizando as técnicas descritas neste capítulo, resultam na modificação da tabela de entrada de água.

4.2.3 Representação Gráfica Compósita de uma Irrigação

Tradicionalmente, a representação gráfica de uma sessão de irrigação por sulco tem consistido em gráficos individuais do tipo curvas de avanço e recessão da água, infiltração acumulada de água ao longo do sulco, entrada de água no sulco, e o escoamento de água no final do sulco. Uma representação gráfica que combina a infiltração acumulada com a curva de avanço é encontrada em [Benami 1984]. Com o propósito de ampliar a capacidade de análise fundamentada nestas curvas, este trabalho propõe uma representação gráfica compósita, que combina as informações citadas acima em uma única figura. Esta representação, apresentada na Figura 4-6, é composta das quatro curvas citadas acrescidas de informações textuais. As curvas foram rotuladas para facilitar sua identificação neste documento. Apesar da aparente sobrecarga visual, o conhecimento que o usuário detém do contexto de automação da irrigação resulta na rápida assimilação das informações. Os dados textuais incluídos na figura (em ordem de aparecimento) são: os coeficientes Kostiakov de infiltração de água no solo (k , a e f_0), a entrada total de água no sulco, o escoamento total de água nos finais dos sulcos, a uniformidade de distribuição de infiltração ao longo dos sulcos, e a eficiência de aplicação de água.

K=0.0100 A=0.250 F0=0.00010 Ent=51.7 Esc=1.1 DU=0.903 AE=0.832

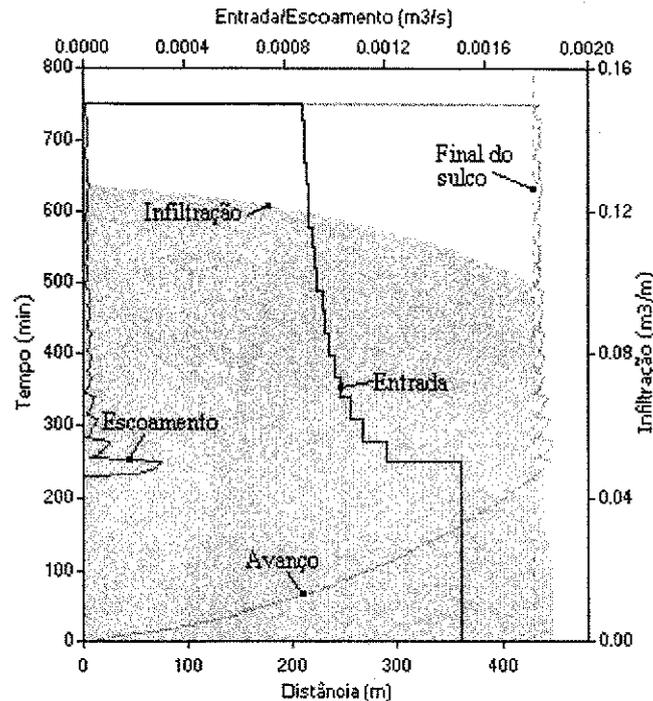


Figura 4-6: Representação gráfica de uma irrigação

Deve-se observar que os gráficos convencionais apresentam as curvas avanço/recessão e infiltração apenas até o final do sulco. A representação composta pode (opcionalmente) apresentar estas curvas além do final do sulco, considerando o sulco com um comprimento estendido. Esta consideração facilita a compreensão do comportamento da irrigação, do ponto de vista do usuário.

Os gráficos desta representação são baseados na classe 'Gráficos Bidimensionais' fornecida como suporte no sistema FarmWeb. Em consequência, estes gráficos podem ser alterados em tamanho para melhorar a visualização de detalhes finos.

4.3 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

O número de estratégias de controle oferecido por este aplicativo depende do número de sensores (de água) instalados e de quantos deles estão em boas condições de funcionamento. O usuário especifica a estratégia de controle a ser usada por ocasião do escalonamento de uma irrigação. Durante uma sessão, o aplicativo pode abandonar a estratégia escolhida e adotar uma outra, como consequência da ocorrência de situações imprevistas tais como falha de dispositivo ou, da incapacidade de produzir uma solução de otimização.

Na discussão das estratégias a seguir referência é feita a eficiência de aplicação (EA). O cálculo desta eficiência foi dado na Equação 2.3, sendo que ela é basicamente a proporção da água aplicada a uma parcela que permanece disponível às plantas (subtraindo perdas por percolação profunda e escoamento). No controle manual da irrigação por sulco eficiência de aplicação tipicamente varia na

faixa de 40 a 50%, dependendo principalmente da experiência e cuidado do responsável. No controle automatizado (não otimizado) a eficiência tipicamente varia na faixa de 50 a 70%, também dependendo principalmente da experiência e cuidado do responsável.

4.3.1 Estratégia 'Entrada Constante'

Nesta estratégia de controle, a entrada de água nos sulcos é mantida constante durante toda a sessão da irrigação. O aplicativo utiliza os sensores de água nos finais dos sulcos para determinar o fim da fase de avanço. A duração da fase de aplicação é especificada pelo usuário no escalonamento da irrigação. Um alarme é acionado se os sensores nos finais dos sulcos não indicam a presença de água dentro de um prazo limite. A Figura 4-7 ilustra o perfil de uma irrigação usando esta estratégia.

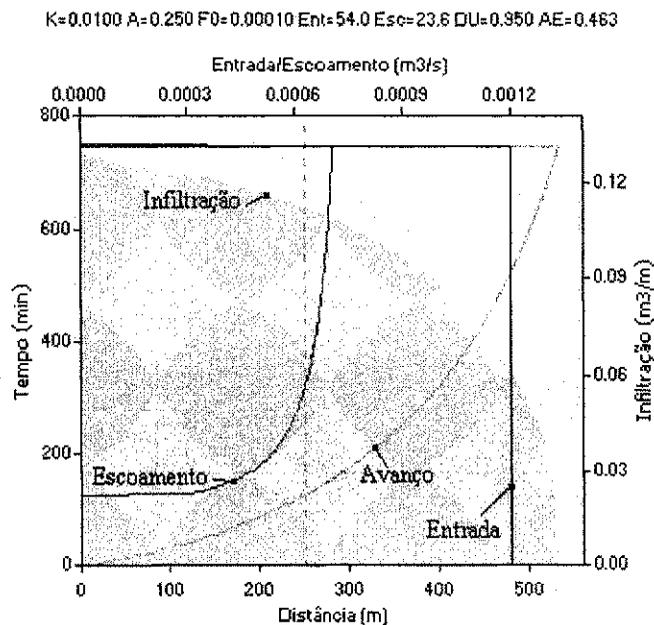


Figura 4-7: Irrigação com entrada de água constante

É possível observar através desta figura a baixa eficiência de aplicação obtida (46,3%). Este é o valor típico de eficiência, obtido nas simulações realizadas utilizando esta estratégia de controle da entrada de água.

4.3.2 Estratégia 'Redução Programada de Entrada'

Esta estratégia de controle utiliza os sensores de água no final dos sulcos para detectar o fim da fase de avanço e o início da fase de aplicação. Durante a aplicação, a entrada de água é reduzida de acordo com uma programação especificada pelo usuário. A Figura 4-8 ilustra um exemplo de irrigação controlada com esta estratégia.

K=0.0100 A=0.250 F0=0.00010 Ent=41.1 Esc=10.6 DU=0.950 AE=0.609

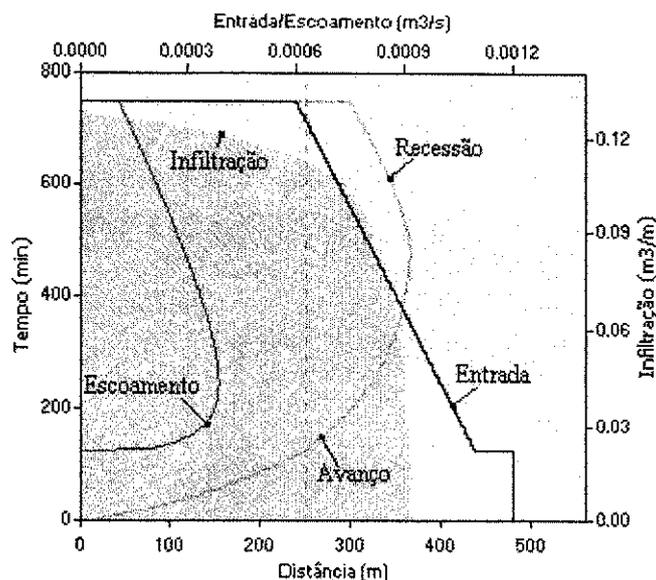


Figura 4-8: Irrigação com redução programada de entrada

Como esperava-se, esta estratégia leva a valores de eficiência típica mais altos em relação à estratégia anterior, embora a eficiência de aplicação obtida no exemplo seja considerada apenas razoável (60,9%). Melhores resultados podem ser obtidos em função da experiência do usuário e do nível de acompanhamento do processo.

4.3.3 Estratégia de Otimização 'Análise de Avanço'

Esta estratégia de controle utiliza a simulação para maximizar a eficiência da irrigação do ponto de vista do uso da água. Os sensores de água ao longo do sulco fornecem 'dados de avanço', isto é, pares de valores distância/tempo. Durante a fase de avanço, o aplicativo 'rastrea' os sensores, e a cada sensor que dispara, o tempo e a distância obtidos são adicionados aos dados de avanço. A partir do segundo dado de avanço, o aplicativo usa o método proposto em [Azevedo 1992, Bautista 1993b] para identificar os coeficientes de infiltração. Quanto maior o número de sensores ao longo do sulco, mais precisa será a determinação dos coeficientes de infiltração e portanto, melhores os resultados da otimização. Dois sensores de água, em sulcos laterais, são usados para ajustar os dados de avanço a fim de compensar avanços desiguais no sulcos.

A cada novo par de dados de avanço, o aplicativo recalcula os coeficientes de infiltração, conforme ilustra a Figura 4-9. Em seguida, o aplicativo utiliza um modelo (objeto da classe 'Onda-Cinemática') para simular o avanço até o final do sulco, obtendo assim o tempo estimado do final da fase de avanço. Conhecido o tempo de chegada da água, e conhecendo os coeficientes de infiltração, o aplicativo calcula o tempo de oportunidade necessário no final do sulco para obter a aplicação de água desejada¹⁹ (solucionando a Equação 2-1, usando a técnica Newton-Raphson [Mathews 1992]).

¹⁹ Aplicação desejada - Normalmente expresso em termos equivalentes a um lençol uniforme de uma certa profundidade expressa em centímetros.

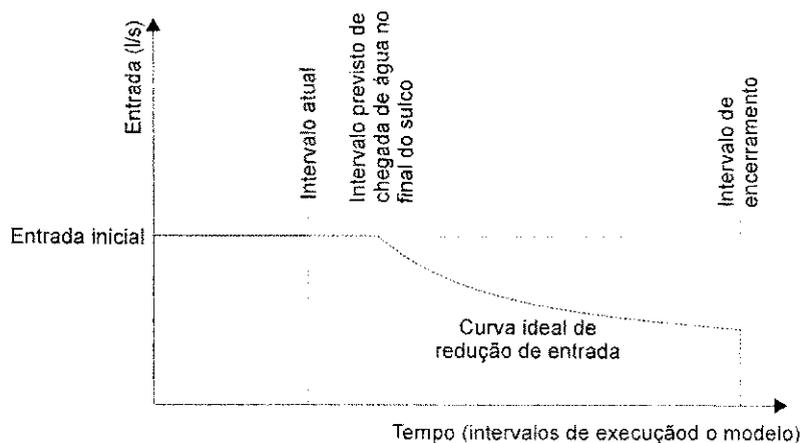


Figura 4-9: Otimização da tabela de entrada de água

Para calcular a redução da entrada da água ao longo da fase de aplicação, o aplicativo FarmWeb utiliza a técnica ‘redução com regressão’ proposta neste trabalho e descrita na seção seguinte. Esta técnica consiste na programação da entrada de água de tal modo que o escoamento seja mantido próximo a zero durante a fase de aplicação. Um exemplo de irrigação otimizada com esta estratégia é apresentado na Figura 4-10 (observe a inversão dos eixos tempo/entrada entre as Figuras 4-9 e 4-10).

$K=0.0100$ $A=0.250$ $F0=0.00010$ $Ent=31.7$ $Esc=1.3$ $DU=0.950$ $AE=0.788$

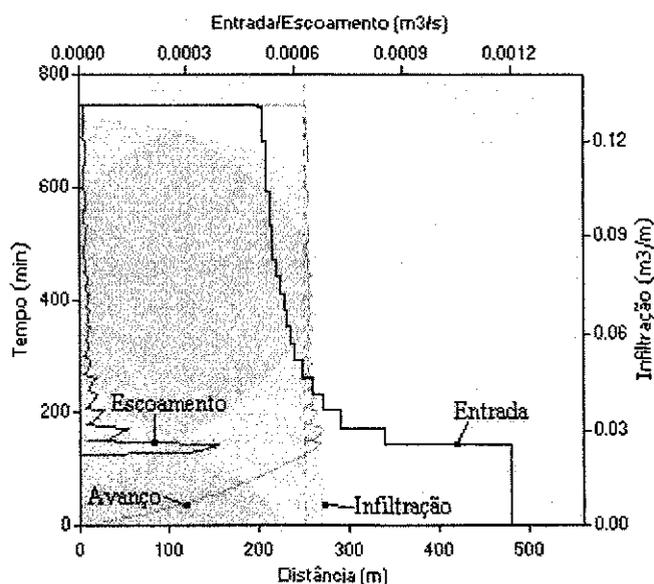


Figura 4-10: Exemplo de uma irrigação otimizada

Técnica de programação de entrada de água - ‘Redução Com Regressão’

A técnica ‘Redução com regressão’ consiste na determinação da curva ideal de redução da entrada de água durante a fase de aplicação. Esta curva ideal de redução mantém os valores de escoamento próximos a zero. Conforme discutido na seção 4.2.1, a execução do modelo Onda-Cinemática requer uma tabela de entrada de água. O primeiro passo nesta técnica consiste na inicialização da tabela de entrada de água atribuindo o valor inicial de entrada de água a todos os itens da tabela. Em seguida, a

otimização inicia N intervalos de tempo do modelo, antes do final da fase de avanço e continua a otimização até o fim da fase da aplicação. A otimização processa-se em um laço de programação, durante o qual, a irrigação é simulada do ponto onde encontra-se até o final. Se, para algum intervalo simulado, o escoamento atingir valores significativos ($> 2,0\%$) haverá uma regressão de N intervalos de tempo e a conseqüente redução de todos os valores de entrada de água, a partir daquele intervalo, de cerca de $F = 0,5\% F$. Este processo continua até o fim da fase de aplicação. O resultado da aplicação desta técnica é representado por uma curva de redução de entrada que mantém o escoamento em valores insignificantes ($< 2,0\%$).

Os valores adotados para a regressão no tempo N, e a redução de entrada de água F, dependem da resolução desejada para a otimização. Uma otimização de baixa resolução, adotaria os valores: $N = 8$ e $F = 0,001$. Para obter uma resolução maior poderiam ser adotados valores: $N = 1$ e $F = 0.00005$. A resolução adotada na Figura 4-10 é baixa, o que resultou em um efeito 'zigzag' registrado no avanço/recessão no final do sulco e, no escoamento. A partir deste ponto, será adotada uma resolução mais fina para a otimização o, que repercutirá sobre as próximas curvas que serão apresentadas.

Implementação do Modelo Onda-Cinemática com Regressão

A aplicação da técnica de programação de entrada de água com redução, pode adotar o modelo Onda-Cinemática com ou sem suporte à regressão. No entanto, a 'Redução com regressão', torna-se mais eficiente com a adoção do modelo Onda-Cinemática, com suporte à regressão no tempo.

A implementação da classe modelo Onda-Cinemática sem suporte à regressão, como utilizado em [Azevedo 1992] demanda a simulação do modelo repetidamente, a partir do intervalo zero, para cada iteração da técnica de programação da entrada de água. Nesta situação são utilizadas duas estruturas de dados do tipo *array*, para armazenar a área de fluxo para cada célula (ver Apêndice A). Uma das estruturas, para o intervalo atual, e a outra para o intervalo anterior. Um objeto desta classe pode ocupar de 5 a 10 kbytes em função do número máximo de células adotado.

A implementação do modelo Onda-Cinemática que suporta regressão corresponde à classe 'Onda-Cinemática' com regressão. Nela, é necessário apenas uma estrutura de dados que é dividida em segmentos. Cada segmento armazena áreas de fluxo para cada célula. O tamanho de cada segmento é igual a $T + 1$ entradas, onde T é o intervalo do modelo. Nesta implementação, a simulação pode passar por uma regressão no tempo para qualquer intervalo, uma vez que os dados de fluxo de área são armazenados na estrutura.

Na execução desta técnica de programação de entrada de água, dependendo do número de intervalos de tempo utilizados no modelo e, do número de regressões realizadas no tempo, o modelo que suporta regressão é tipicamente 100 a 200% mais rápido que o modelo que não utiliza regressão.

4.3.4 Estratégia de Otimização 'Controle de Escoamento'

Estratégia de controle, desenvolvida neste trabalho, que utiliza a simulação para otimizar a eficiência no uso da água. Esta estratégia foi proposta como uma alternativa à estratégia "Análise de

Avanço', que também utiliza simulação para otimização da eficiência. Ao propor esta estratégia pretende-se alcançar valores de eficiência no uso da água comparáveis àqueles da estratégia anterior, porém eliminando os problemas decorrentes da instalação e manutenção de uma rede com vários sensores distribuídos ao longo da extensão de um dos sulcos da parcela irrigada.

Esta estratégia, demanda apenas um sensor de água instalado no final de um dos sulcos para indicar a presença, ou não, de água. Esta estratégia consiste dos passos a seguir. Inicialmente, o aplicativo de controle aguarda a informação sobre a presença de água no final dos sulcos, o que significa o início da fase de aplicação. Em seguida, o aplicativo mantém o escoamento em zero através da variação da entrada de água. Se houver indicação da presença de água, a entrada de água é reduzida. Por outro lado, se não houver registro da presença de água, a entrada de água é aumentada. O efeito destes ajustes traduz-se em avanço/recessão, na forma de 'zigzague' no entorno do final do sulco. Quando a duração da fase de aplicação ultrapassa a duração da fase de avanço então o aplicativo inicia a identificação dos coeficientes de infiltração utilizando a técnica descrita na próxima seção. Uma vez identificados os coeficientes, o aplicativo de controle calcula o tempo de oportunidade no final do sulco, e determina o tempo de finalização da irrigação. A Figura 4-11 ilustra uma irrigação otimizada com esta estratégia. Observam-se nesta figura 'zigzagues' nas curvas de entrada e de avanço/recessão da água durante a fase de aplicação.

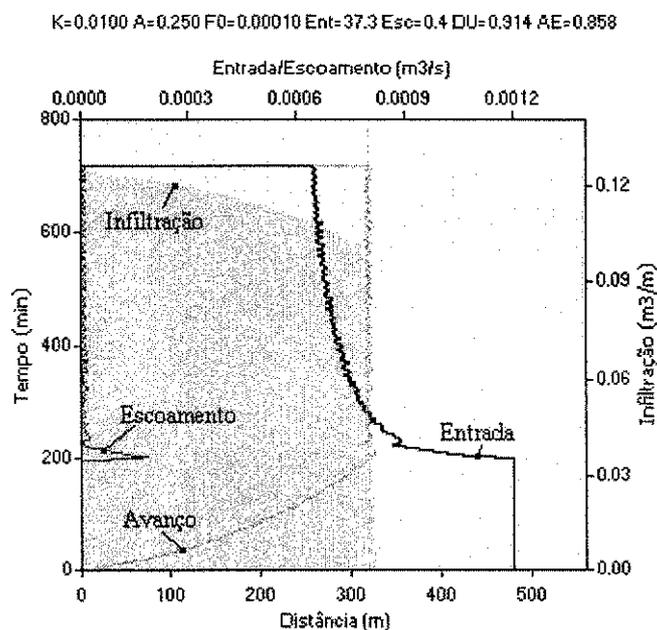


Figura 4-11: Irrigação otimizada usando técnica 'Escoamento zero'

4.3.5 Estratégia de Otimização 'Reutilização de Coeficientes'

Esta estratégia utiliza um ou mais sensores nos finais dos sulcos para indicar o fim da fase de avanço. A tabela de redução de entrada é calculada a partir da reutilização dos coeficientes de infiltração de uma parcela vizinha, irrigada anteriormente. Para obter resultados satisfatórios, esta estratégia só deve ser usada em áreas que apresentem pequenas variações no tipo e condições do solo.

4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Nesta seção avalia-se a estratégia de controle 'análise de avanço' em termos da sensibilidade a erros e aos parâmetros usados no modelo Onda Cinemática. Esta avaliação baseia-se em uma irrigação de referência, ilustrada na Figura 4-12. Esta irrigação foi simulada usando a ferramenta 'Simulador de irrigação por sulco', incluída no módulo de irrigação e descrita na seção 4.7.1

$K=0.0100$ $A=0.250$ $F0=0.00010$ $Ent=54.0$ $Esc=16.1$ $DU=0.917$ $AE=0.593$

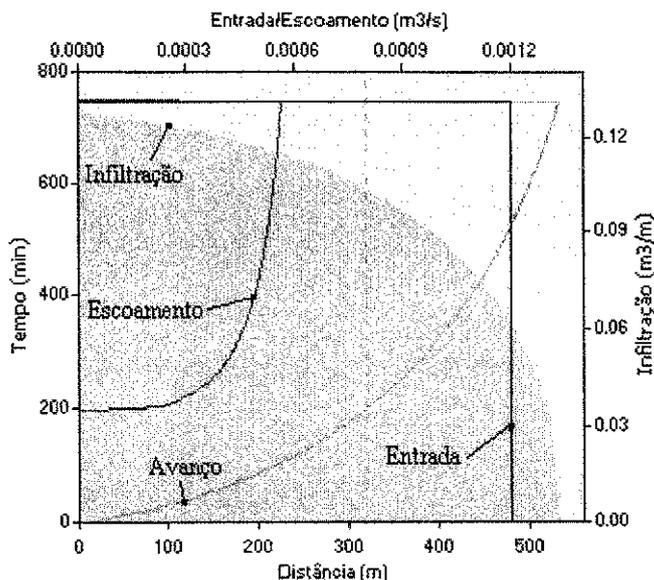


Figura 4-12: Irrigação não otimizada de referência

A otimização desta irrigação de referência, usando a estratégia de análise de avanço, é ilustrada na Figura 4-13. Esta figura pode ser usada para visualmente avaliar os efeitos de alterações em parâmetros e em erros de sensoreamento sobre o resultado final da otimização.

$K=0.0100$ $A=0.250$ $F0=0.00010$ $Ent=38.2$ $Esc=0.3$ $DU=0.917$ $AE=0.839$

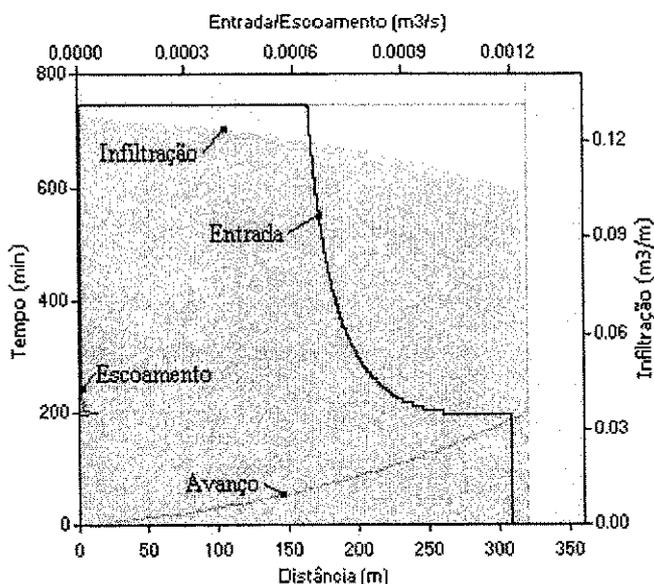


Figura 4-13: Irrigação otimizada de referência

4.4.1 Intervalo de Tempo

De acordo com [Walker 1987], quando o intervalo de tempo usado no modelo Onda-Cinemática é de no mínimo 60 s, então é válido que a área de fluxo A_L na primeira célula do sulco seja reduzida para zero, imediatamente após o fechamento da entrada de água. Diante desta afirmação, o intervalo mínimo que pode ser especificado pelo usuário, na configuração do modelo em FarmWeb, é de 60 s.

A sensibilidade da estratégia de otimização será avaliada a partir de duas irrigações comparativas. A primeira delas usa um tempo base de 90 s e é ilustrada na Figura 4-14.

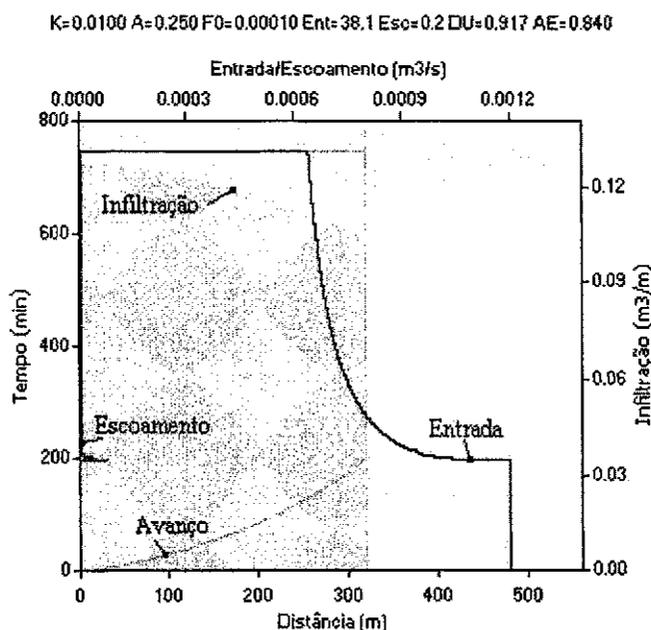


Figura 4-14: Irrigação de comparação com tempo base de 90 s

A segunda irrigação de referência usa um tempo base de 320 s, e é ilustrada na Figura 4-15.

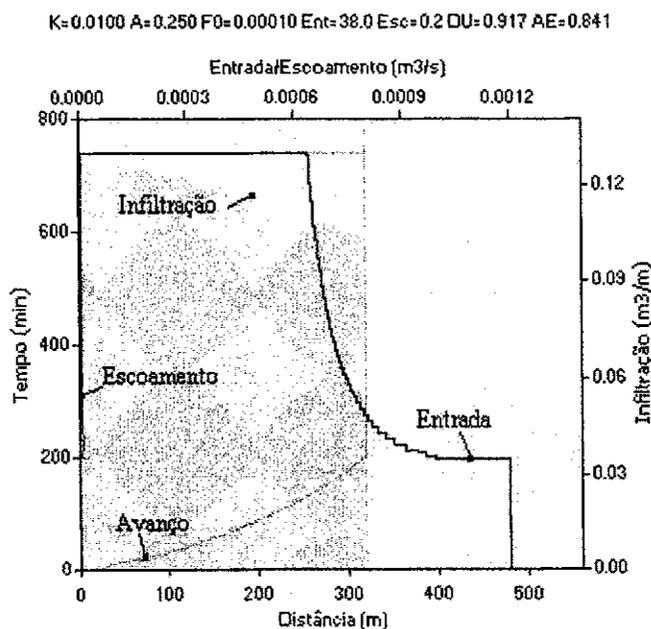


Figura 4-15: Irrigação de comparação com tempo base de 320 s

As duas figuras são quase idênticas, as únicas diferenças sendo 1) um pequeno pico de escoamento inicial no caso da primeira e 2) ligeiras diferenças na entrada total de água e na eficiência de aplicação. Isso mostra que a escolha do intervalo de tempo exerce pouca influência sobre a otimização da irrigação, na faixa de 90 a 320 s. O tempo de 180 s, usado na irrigação de referência, parece uma escolha razoável no intervalo de tempo. Este tempo assegura um nível adequado de precisão e evita o ônus em termos de tempo de execução e capacidade de memória elevados que resultam de intervalos mais curtos.

4.4.2 Erro de Declividade

Tipicamente, a declividade de um sulco varia de 0,2 a 2,0% [Benami 1984]. Apesar da precisão com que pode ser determinada, a declividade atribuída a uma área irrigada por sulco pode apresentar erros, uma vez que pequenas alterações de declividade nesta área podem existir. A irrigação de referência dá-se em uma declividade de 0.02. A Figura 4-16 ilustra uma irrigação de comparação que incorpora um erro de -50% no valor de declividade, ou seja, a simulação emprega o valor 0,01 mas o algoritmo de identificação de coeficientes de infiltração assume um valor de 0,005.

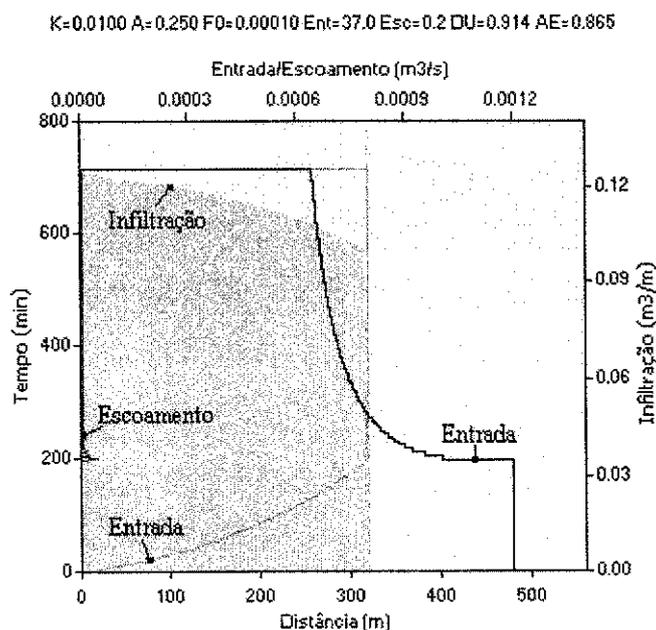


Figura 4-16: Irrigação de comparação com erro de declividade de -50%

A Figura 4-17 ilustra uma irrigação de comparação, que incorpora um erro de declividade de +100%, ou seja, a simulação se baseia no valor 0,01 enquanto que o algoritmo de identificação de coeficientes de infiltração utiliza 0,02.

K=0.0100 A=0.250 F0=0.00010 Ent=36.9 Esc=0.2 DU=0.913 AE=0.868

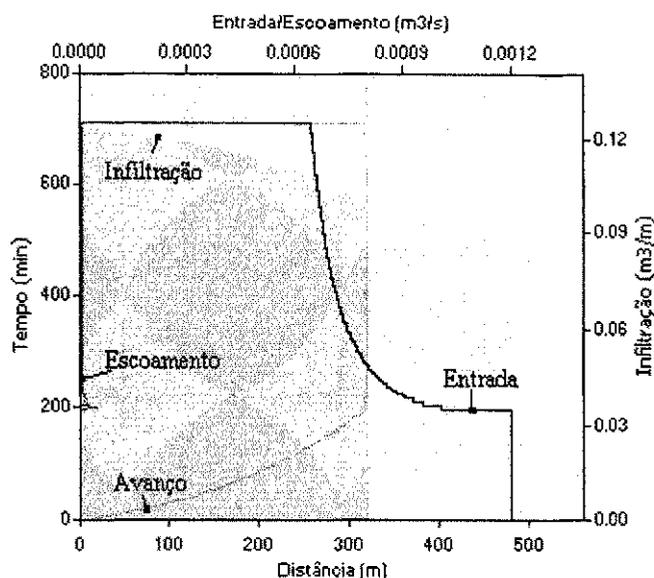


Figura 4-17: Irrigação de comparação com erro de declividade de +100%

Uma comparação das Figuras 4-13, 4-16 e 4-17 mostra que erros consideráveis (-50% a +100%) na declividade não alteram significativamente a uniformidade ou eficiência de uma irrigação otimizada. Conclui-se, portanto, que pequenas variações de declividade ao longo de uma área irrigada podem ser ignoradas para fins de controle. Esta descoberta eliminou uma proposta inicial do trabalho que previa a necessidade de modificar a implementação do modelo Onda-Cinemática para lidar com variações de declividade ao longo do sulco.

4.4.3 Coeficiente de Rugosidade Manning

O coeficiente Manning [Walker 1987] representa a rugosidade de um sulco. Atribuir um valor a este coeficiente faz parte da configuração de cada área irrigada. Seu valor varia de 0,02 para sulcos previamente irrigados até 0,15 para sulcos contendo ervas daninhas ou culturas. A Figura 4-18 ilustra uma irrigação de comparação na qual a otimização foi feita com a introdução de um erro de 100% no coeficiente Manning, ou seja, a simulação baseou-se no valor de 0,02 enquanto a otimização se baseou no valor 0,04.

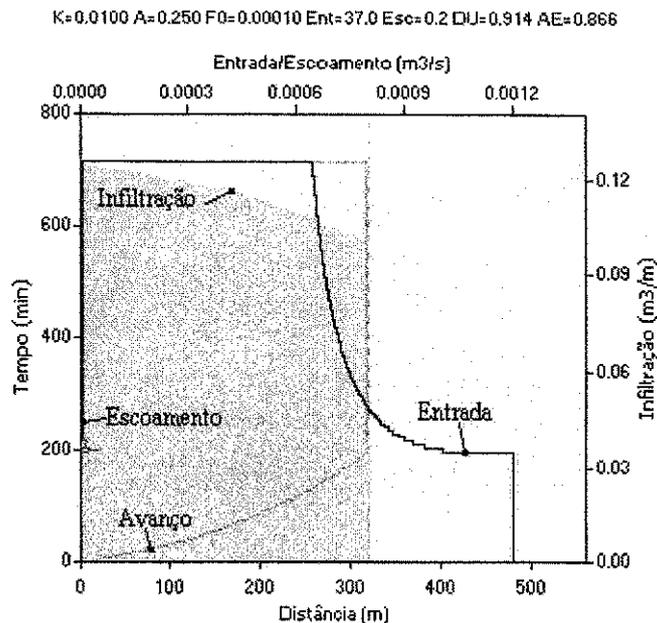


Figura 4-18: Irrigação de comparação com erro de coeficiente Manning de +100%

A comparação das Figuras 4-13 e 4-18 mostra que um erro de +100% no coeficiente de rugosidade Manning não prejudicou a otimização da irrigação. O efeito deste erro é uma irrigação deficiente na qual o tempo de oportunidade no final do sulco foi reduzindo em cerca de 30 minutos. Como consequência houve uma redução na uniformidade de distribuição em 0,3% e um aumento na eficiência de aplicação em 2,7%. Conclui-se, portanto, que o valor a ser adotado para o coeficiente de rugosidade Manning deve ser extraído de tabelas disponíveis na literatura, a exemplo de [Walker 1987], de modo a garantir a otimização desejada da irrigação.

4.4.4 Atraso nos Dados de Avanço

Os sensores utilizados na coleta de dados de avanço são interrogados a intervalos fixos de tempo, tipicamente de 30 s ou 60 s. Como consequência há um deslocamento médio nos dados de avanço que corresponde à metade deste intervalo. A Figura 4-19 ilustra uma irrigação de comparação na qual os dados de avanço apresentam um atraso de 120 s.

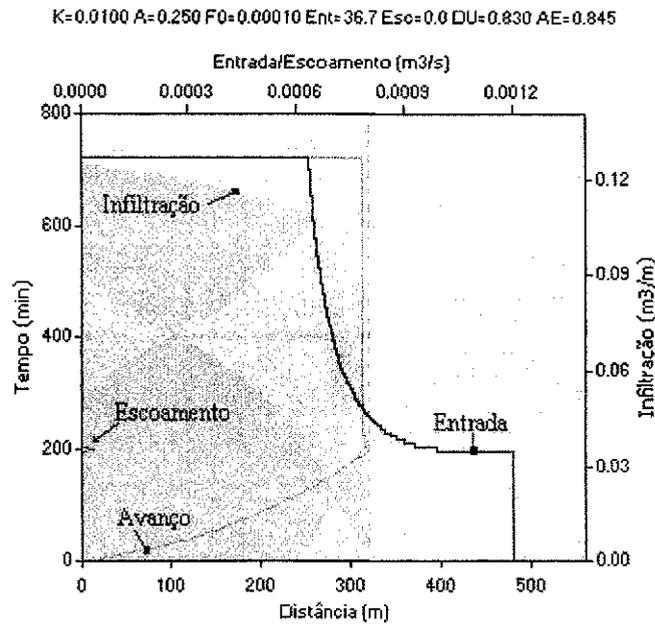


Figura 4-19: Irrigação de comparação com atraso de 120 s nos dados de avanço

Um atraso de 120 s resulta no cálculo de um conjunto de coeficientes de infiltração incorretos. Por sua vez, os valores incorretos dos coeficientes resultam na geração de uma tabela de redução de entrada que leva a uma irrigação deficiente, na qual a eficiência de aplicação é a mesma que na irrigação de referência, mas com uma queda de 8,7% na uniformidade de distribuição.

A Figura 4-20 ilustra uma irrigação de comparação na qual os dados de avanço apresentam um atraso de 240 s.

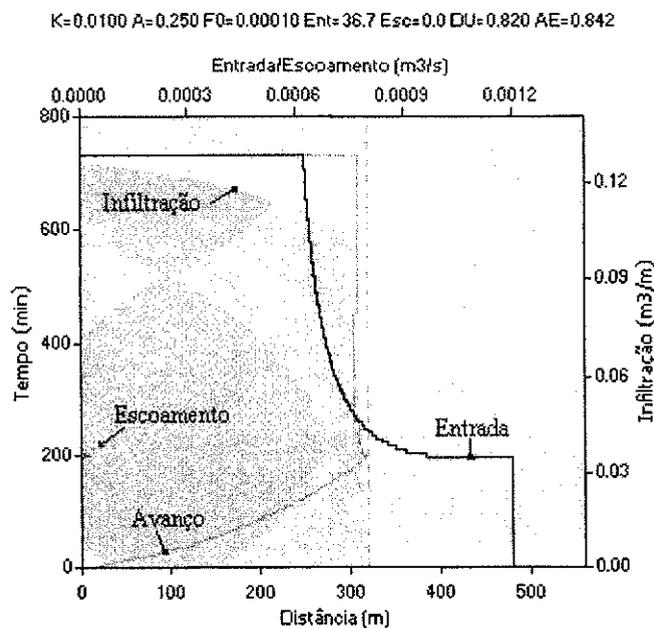


Figura 4-20: Irrigação de comparação com atraso de 240 s nos dados de avanço

Embora a eficiência de aplicação continue a mesma, a uniformidade de distribuição é reduzida em 9,7%, em relação à irrigação de referência. Conclui-se, portanto, que atrasos nos dados de avanço da

ordem de 120 s já são prejudiciais na otimização da irrigação. Estes resultados indicam que um intervalo de rastreamento de 15 a 30 s seria apropriado para garantir níveis adequados de otimização.

4.4.5 Entrada de Água

A entrada de água no sulco durante a fase de avanço, deve ser tal que resulte no avanço mais rápido possível, sem no entanto provocar uma ação erosiva (tipicamente na faixa de 1 a 2 l/s). Dentre as informações necessárias à execução do modelo, a tabela de entrada de água é de grande importância. Na maioria das configurações, a medição da entrada de água é feita por um sensor. Infelizmente, os sensores de fluxo e de vazão estão sujeitos a erros máximos na faixa de 1 a 7% [Hoffman 1990]. Necessita-se portanto avaliar o efeito de erros nesta faixa de valores sobre a otimização proposta neste trabalho. A Figura 4-21 ilustra uma irrigação simulada, com erro de +10% na medição da entrada de água.

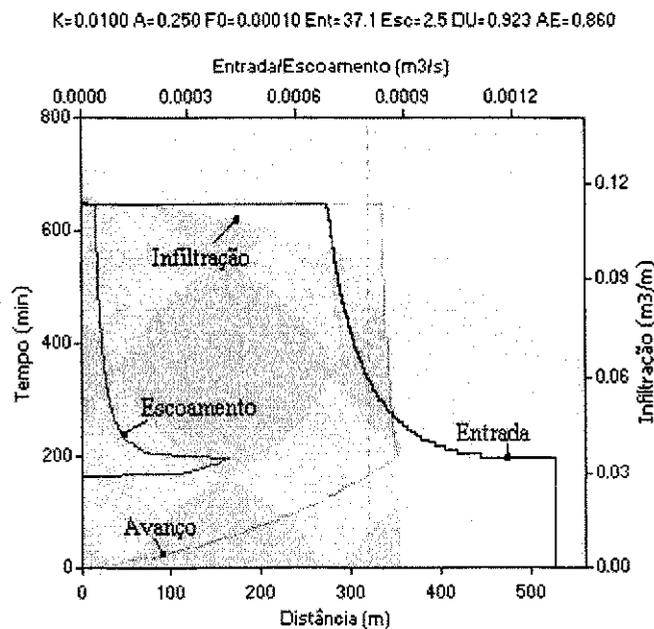


Figura 4-21: Irrigação de comparação com erro de entrada de +10%

Como pode ser observado na Figura 4-21, um erro de +10% na entrada de água não prejudicou a uniformidade de distribuição mas resultou em um escoamento significativo (2,5 m³ por sulco). Conseqüentemente, houve uma queda na eficiência da aplicação de água de 2,1% em relação à irrigação ideal apresentada na Figura 4-13. A Figura 4-22 apresenta o efeito de um erro de -10% na entrada de água.

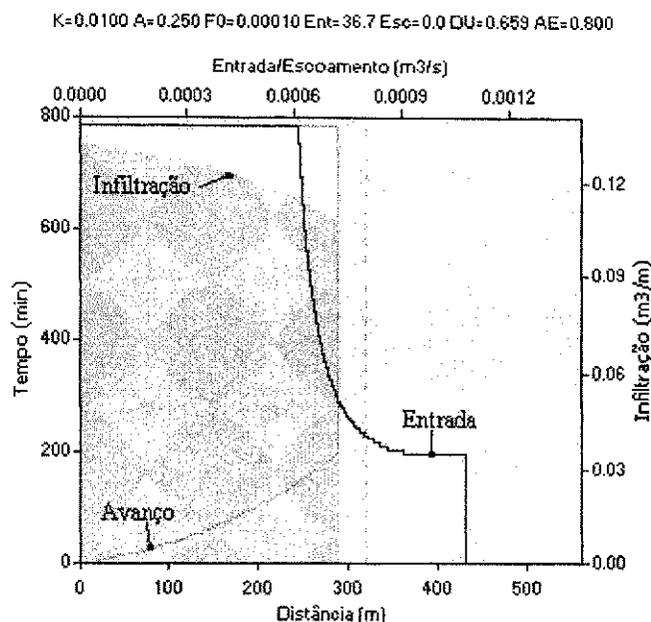


Figura 4-22: Irrigação de comparação com erro de entrada de -10%

O efeito deste erro na otimização da irrigação foi considerável, com queda de 3,9% na eficiência de aplicação e de 25,8% na uniformidade de distribuição. Devido a este erro, a redução de entrada foi excessiva e o avanço da água não progrediu além do último sensor. Em outras palavras, a água não chegou ao final do sulco, explicando assim a ausência total de escoamento.

Das Figuras 4-21 e 4-22 conclui-se que a precisão na determinação da entrada é crucial na otimização da irrigação, tendo sido observado que erros da ordem de $\pm 10\%$ já tornam a otimização insatisfatória. Para maximizar a otimização, a precisão do sensor de fluxo deve ser da ordem de 1 ou 2%, assunto que será discutido no capítulo cinco.

4.5 INTERFACE COM O USUÁRIO DO APLICATIVO DE CONTROLE DA IRRIGAÇÃO POR SULCO

O aplicativo de controle da irrigação por sulco faz parte do sistema FarmWeb, compartilhando seus serviços comuns e seguindo seu estilo comum de interação com o usuário. A interface com o usuário se baseia numa combinação de janelas sinópticas criadas pelos usuários e janelas de configuração e estado criados pelo programador do aplicativo.

4.5.1 Janelas Sinópticas

A Figura 4-23 ilustra uma janela sinóptica, configurada pelo usuário, para monitorizar uma área irrigada por sulco. Esta janela permite que o usuário avalie rapidamente o estado da irrigação. A área ilustrada é composta de seis parcelas, cada uma com um dispositivo 'AtuadorCíclico' para o controle da entrada de água.

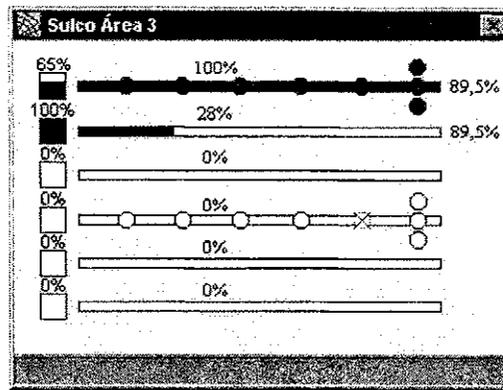


Figura 4-23: Janela sinóptica de uma área irrigada

As seis parcelas da área são agrupadas em dois grupos de três. Cada grupo é formado por uma parcela mestre (que usa a estratégia ‘análise de avanço’) e duas parcelas escravas (que são otimizadas a partir de coeficientes ‘herdados’ da parcela mestre). Símbolos gráficos ilustram o ciclo de trabalho do atuador, o estado dos sensores, o avanço de água nos sulcos e a eficiência de aplicação obtida, ou prevista. Se um dos sensores da quarta parcela apresenta uma falha, esta falha é indicada pela mudança de cor do símbolo e pelo ‘X’ sobre o símbolo.

4.5.2 Janela de Configuração

O aplicativo de controle da irrigação oferece uma interface com o usuário baseada em caixas de diálogo. Estas caixas permitem que o usuário configure o aplicativo e monitore seu estado. A Figura 4-24 apresenta a caixa de dialogo de configuração deste aplicativo. Esta caixa tem associado um conjunto de subjanelas que são invocadas através de ‘abas’ ou etiquetas, do tipo Geral ou Parcela.

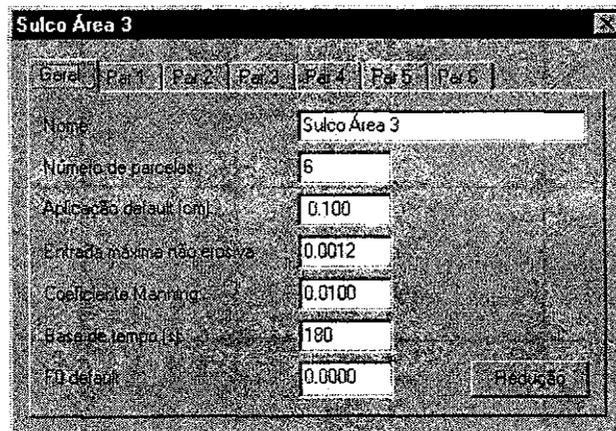


Figura 4-24: Janela de configuração de uma área irrigada (por sulco)

A janela de configuração de parcela, com ‘abas’, é ilustrada na figura 4-25. O botão ‘Dispositivos’ invoca uma janela auxiliar para a configuração dos dispositivos empregados no controle da parcela.

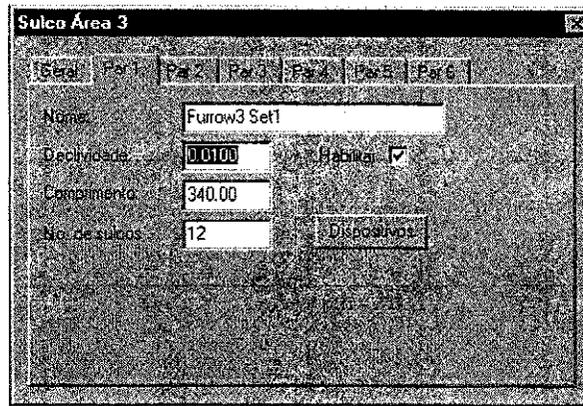


Figura 4-25: Janela de configuração de uma parcela de área irrigada (por sulco)

A Figura 4-26 ilustra a janela de configuração de dispositivos de parcela. Estes dispositivos incluem o atuador cíclico e o sensor de fluxo para o controle e determinação de entrada, os sensores de água no sulco principal onde acontece a análise de avanço, e até cinco sensores em sulcos laterais para compensar o avanço não uniforme entre os sulcos e, auxiliar na estratégia de controle 'Escoamento Zero'. Note que os sensores podem ser desabilitados para acompanhar eventuais falhas nas redes de sensores.

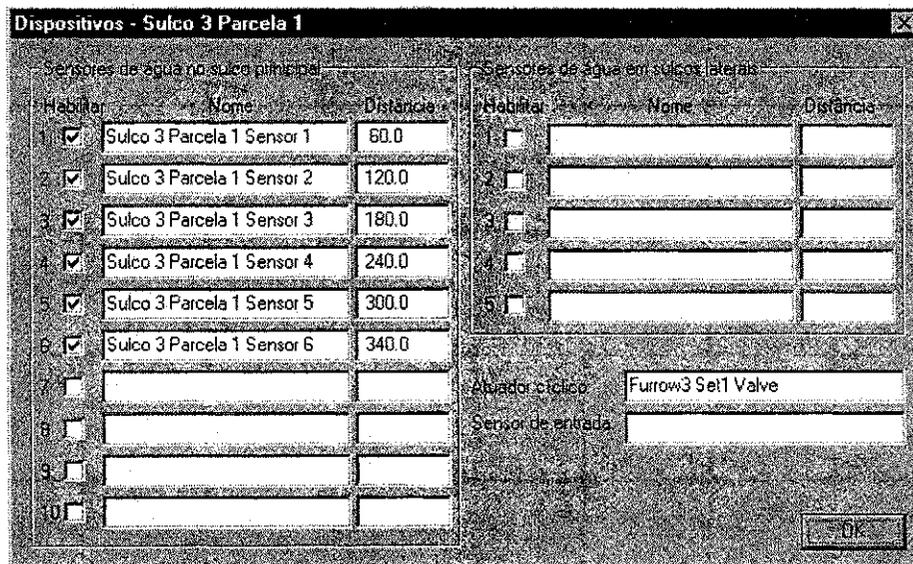


Figura 4-26: Janela de configuração de dispositivos de parcela de área irrigada

A Figura 4-27 ilustra a janela de programação da entrada de água. O usuário faz o ajuste da curva de entrada, em pontos individuais, através da ativação do *mouse* sobre o gráfico. Os dois controles do tipo *up-down* permitem aumentar e diminuir toda a extensão da entrada.

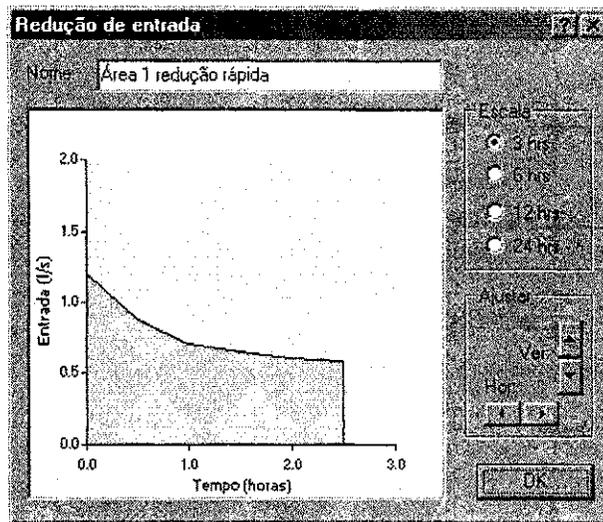


Figura 4-27: Janela de programação de entrada de água

Janela de Configuração de Sessão

Ao iniciar ou programar a irrigação de uma ou mais parcelas, surge a janela apresentada na Figura 4-28

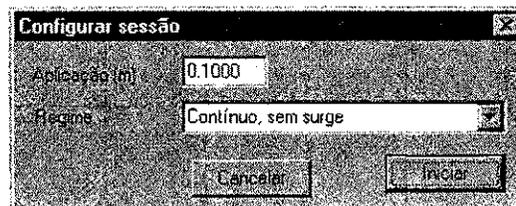


Figura 4-28: Janela de configuração de sessão

4.5.3 Janela 'Painel de Controle'

A janela de estado permite ao usuário acompanhar detalhadamente o progresso da irrigação por sulco, numa área. Esta janela contém janelas auxiliares com abas, para selecionar entre informações gerais ou informações pertinentes a uma das parcelas da área. A Figura 4-29 ilustra esta janela com informações gerais.

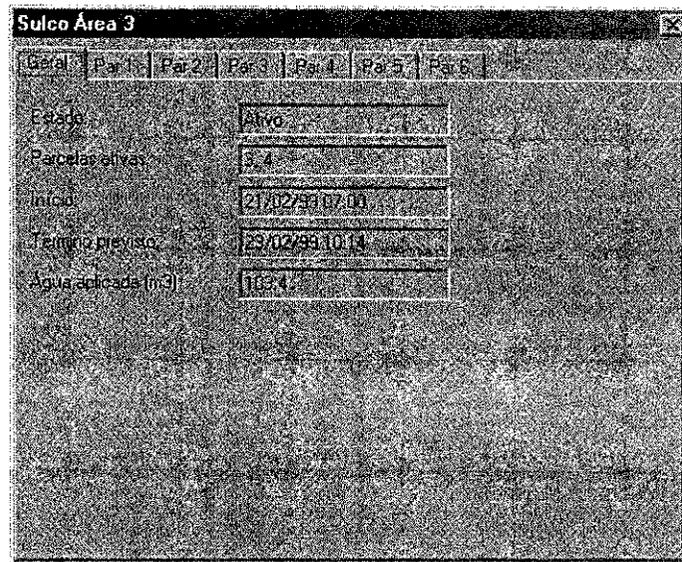


Figura 4-29: Janela de estado da irrigação - informação global

A Figura 4-30 ilustra a janela de estado contendo informações sobre uma parcela específica. O gráfico mostra o estado da irrigação e os controles permitem que o usuário selecione as informações que deverão estar visíveis. Por ser baseado no gráfico bidimensional de FarmWeb (seção 3.3.3), este gráfico pode ser destacado para uma janela auxiliar, onde pode ser ajustado em tamanho.

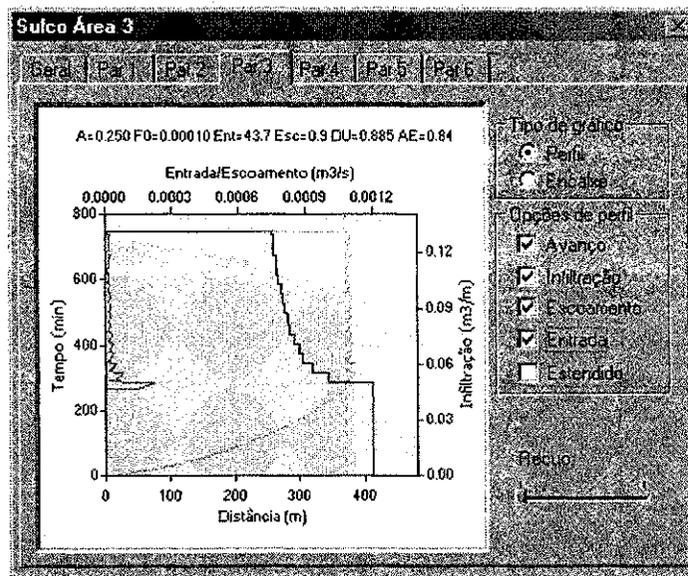


Figura 4-30: Janela de estado da irrigação - informação de parcela

4.6 FERRAMENTAS DE APOIO A DECISÃO

O módulo de expansão para o controle da irrigação inclui duas ferramentas de apoio a decisão. Estas ferramentas permitem que os usuários estudem o comportamento da irrigação por sulco e analisem dados coletados manualmente no campo, usando o modelo Onda-Cinemática, as técnicas de otimização e os recursos gráficos que são utilizados pelo aplicativo de controle da irrigação por sulco.

Uma das propostas de utilização do sistema FarmWeb é a utilização para fins didáticos, na qual o comportamento de processos agrícolas pode ser estudado e avaliado em um ambiente gráfico e interativo. As ferramentas apresentadas nesta seção permitem que os usuários alterem parâmetros de operação e visualizem os resultados desta mudança, em tempo real. A interação gráfica facilita a compreensão do processo e a passagem de parâmetros.

4.6.1 Ferramenta 1: 'Simulador da Irrigação por Sulco'

Esta ferramenta permite simular uma sessão por irrigação por sulco, fornecendo informações sobre: a duração da irrigação, a eficiência de aplicação, a uniformidade da distribuição, a entrada de água no sulco, o escoamento de água no final do sulco, etc. Usando uma interface gráfica, o usuário pode modificar facilmente os parâmetros da simulação e imediatamente visualizar os resultados, conforme ilustra a Figura 4-31.

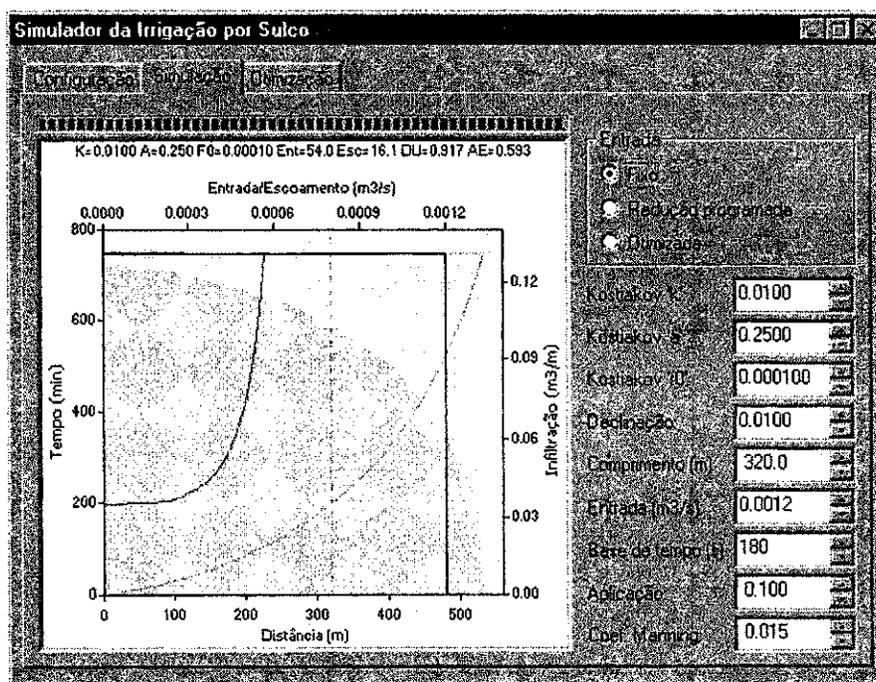


Figura 4-31: Ferramenta 'Simulador de Irrigação por Sulco'

Esta ferramenta tem como entrada nove parâmetros de irrigação: os coeficientes Kostiakov de infiltração (k , a e f_0), o coeficiente de rugosidade Manning, a declividade e o comprimento do sulco, a entrada inicial de água, a base de tempo a ser utilizada no modelo, e o aplicação desejada de água. A saída da ferramenta está na forma de um gráfico mostrando o perfil da irrigação simulada. Esta ferramenta é particularmente útil na realização de análises do tipo:

- Análise dos benefícios potenciais decorrentes da automação de uma área irrigada, ainda sob o controle manual.
- Análise do comportamento do modelo face a alteração dos seus parâmetros.
- Estudo de viabilidade de alternativas para um processo real de irrigação.

Tratando-se de um gráfico bidimensional (seção 3.3.3), a janela do gráfico pode ser redimensionada para melhor visualização. Utilizando comandos disponíveis para estas representações gráficas, o gráfico bidimensional pode ser copiado para o *clipboard* do Windows, tornando-o disponível para uso por outros aplicativos.

4.6.2 Ferramenta 2: 'Analisador de Avanço'

Esta ferramenta calcula os coeficientes de infiltração e disponibiliza as características de uma irrigação por sulco através de dados de avanço obtidos manualmente do campo. Devido à estrutura de compartilhamento de recursos no sistema FarmWeb, esta ferramenta utiliza os recursos gráficos do sistema e o modelo Onda-Cinemática, do módulo de irrigação. Os resultados da análise são apresentados na forma textual, através de um relatório hierárquico e na forma gráfica em uma **representação compósita**, proposta neste trabalho e descrita na seção 4.2.1. Esta ferramenta foi desenvolvida para as seguintes situações:

- A avaliação dos benefícios potenciais da automação em áreas onde usa-se o Manejo (controle) manual da irrigação. O Analisador de Avanço fornece dados para o cálculo da economia de água decorrente do controle automático e para avaliar a relação custo/benefício da introdução da automação.
- Na otimização de uma irrigação com controle manual, um operário no campo obtém dados de avanço e segue uma tabela de redução de entrada de água fornecida pela ferramenta.

A Figura 4-32 ilustra a janela de configuração do Analisador de Avanço. Nela, o usuário especifica como entrada o modelo a ser adotado na simulação, a declividade e o comprimento do sulco, o coeficiente de rugosidade Manning, a entrada inicial de água nos sulcos, e os dados de avanço obtidos do campo.

Distância (m)	Tempo (min)
100.0	23
200.0	71
300.0	147

Figura 4-32: Ferramenta 'Analisador de avanço' – configuração

Uma vez digitados os dados de configuração, seleciona-se a aba 'Identificação' para executar a análise. A Figura 4-33 ilustra a ferramenta apresentando sua saída na forma de um gráfico dos resultados da análise.

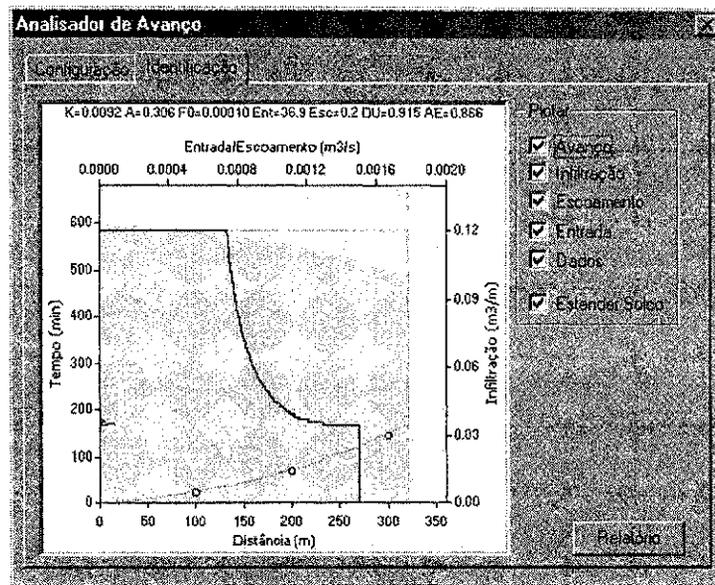


Figura 4-33: Ferramenta 'Analizador de avanço' – resultados

Um registro detalhado da análise, passo-a-passo, pode ser obtido na forma de um relatório organizado em níveis hierárquicos de detalhamento, o qual pode ser solicitado para visualização através do botão 'Relatório'.

4.7 GERENTE DE IRRIGAÇÃO

A Figura 4-34 apresenta o painel de controle do gerente de irrigação. Este painel mostra as áreas de irrigação controladas, o escalonamento, e o estado atual destas áreas.

Nome	Escalação	Estado
Adicionar escalonamento		
Sulco 4	Cada Terça as 07:00 horas	Ativo
Localizada 2	Todo dia as 07:00 horas por 180 min	Aguardando
Aspersão 2	Sob demanda	Aguardando

Figura 4-34: Painel de controle do aplicativo 'Gerente de irrigação'

A primeira entrada na lista de áreas escalonadas ('Adicionar escalonamento') permite a adição de novas áreas ao escalonamento. Quando o usuário seleciona esta entrada, surge a janela de escalonamento da Figura 4-35. Esta janela oferece diversas opções ao usuário, em termos de quando e quantas vezes, uma área deve ser irrigada. Estas opções são agrupadas nas categorias de escalonamento:

Diário, Semanal, Sob Demanda e Seqüência. As janelas auxiliares, tabeladas, permitem a configuração do escalonamento. Na Figura 4-35 são apresentadas as opções de escalonamento diário.

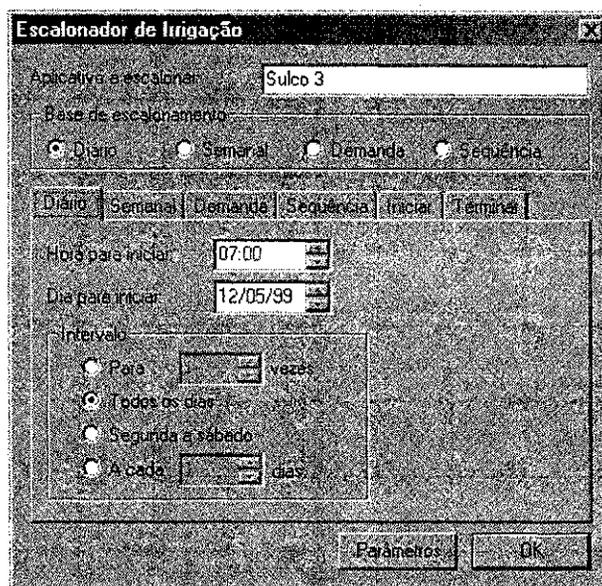


Figura 4-35: Janela para escalonamento diário

A Figura 4-36 ilustra as opções para escalonamento sob demanda. Até três sensores de umidade podem ser especificados, junto com o limite inferior de umidade que deve iniciar a irrigação. O usuário pode configurar a irrigação para começar quando 1) pelo menos um, ou 2) todos os sensores estão indicando umidade abaixo do limite.

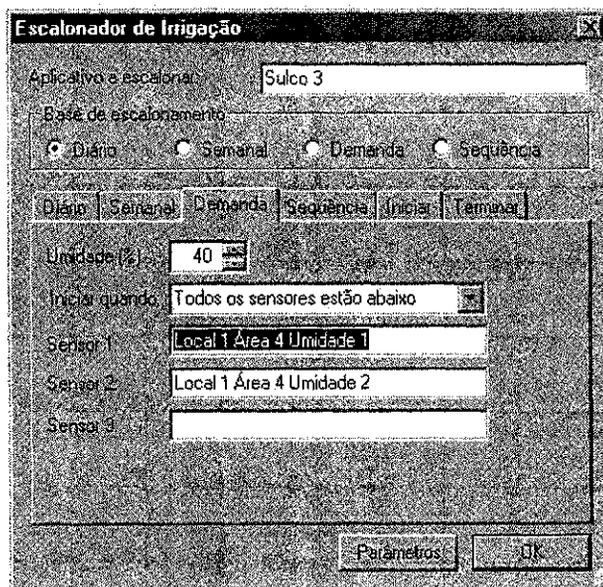


Figura 4-36: Janela para escalonamento sob demanda

A Figura 4-37 ilustra as opções de inicialização de dispositivos. Até seis atuadores podem ser especificados, cada um com estado de inicialização e o período de espera a ser introduzido após seu acionamento. Este atraso possibilita que o sistema de canais, e/ou de canos, atinja um equilíbrio entre passos, na inicialização dos dispositivos.

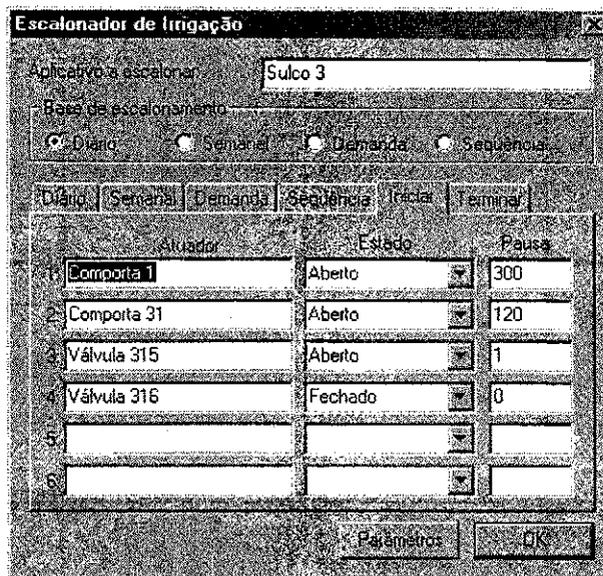


Figura 4-37: Janela de configuração dos dispositivos

4.7.1 Comunicação entre o Gerente e o Controlador de Irrigação por Sulco

O gerente de irrigação envia a mensagem CONFIGURA_SESSÃO para obter do controlador os parâmetros para uma sessão de irrigação. Estes parâmetros são devolvidos na forma de uma estrutura de dados, cuja estrutura interna correspondente não precisa ser conhecida pelo gerente.

```

CARACTERISTICAS c;
Dispositivo *pD;

// determina características do dispositivo
pD->Servico(CARACTERISTICAS, NULL, NULL, &c, sizeof(c));

//
if (pA->Servico(CRIA_SESSAO, NULL, NULL, &s, sizeof(s)) {
}

```

5 HARDWARE PARA O CONTROLE DA IRRIGAÇÃO POR

SULCO

Os conceitos de dispositivos genéricos e transparência de acesso são fundamentais para o modelo de automação agrícola proposto neste trabalho. Ambos são realizados no sistema FarmWeb através da definição de objetos virtuais que representam dispositivos de hardware no campo. Usando estes objetos, os aplicativos de controle podem manipular dispositivos sem conhecer detalhes de onde estão localizados, como é feito o acesso, ou como os dispositivos são implementados. Em consequência disso, os aplicativos de controle tornam-se mais portáteis, podendo ser utilizados em sistemas de automação agrícola com configurações diferentes de *hardware*.

No aplicativo de controle para a irrigação por sulco descrito no capítulo anterior, foram mencionados dispositivos genéricos do tipo 'Sensor', 'AtuadorCíclico' e 'AtuadorLinear'. Naquele capítulo, detalhes da implementação destes dispositivos não foram abordados, reforçando a proposta de que o software e o hardware de um projeto de automação podem ser tratados em separado. Restou portanto para este capítulo, discutir aspectos de *hardware* relevantes ao controle da irrigação, apresentando as alternativas disponíveis e as soluções propostas para a realização de dispositivos no campo que correspondessem aos objetos virtuais usados pelos aplicativos.

Neste capítulo é apresentada inicialmente uma discussão sobre métodos para controle da entrada de água nos sulcos. Esta discussão abrange duas alternativas, a primeira utilizando dispositivos do tipo 'AtuadorLinear' na forma de válvulas e comportas, e a segunda utilizando dispositivos tipo 'AtuadorLigDesliga', na forma de válvulas com controle de ciclo de trabalho.

Na segunda seção são discutidos métodos para a determinação da entrada de água nos sulcos. Esta determinação deve ser feita com precisão para garantir a otimização correta da irrigação, conforme discutido na seção 4.4.5.

Na terceira seção são discutidas alternativas para a detecção do avanço da água no sulco. São apresentadas três redes de sensores de água que foram desenvolvidas neste trabalho, duas das quais utilizam detetores com elementos sensores resistivos, enquanto que a terceira utiliza sensores com elementos capacitivos.

Na quarta seção são discutidos aspectos relacionados à energização das estações de campo e sua comunicação com os computadores centrais. É apresentada uma solução integrada de energização/comunicação que viabiliza a interligação de um grande número de estações de campo a um custo relativamente baixo.

Na última seção é descrito o protótipo de uma estação de campo para realizar o controle otimizado da irrigação. Esta estação de campo faz o controle da entrada de água, medição de fluxo de entrada e a monitorização do avanço. Esta estação pode ser energizada com 110/220 V ou através da linha de comunicação.

5.1 CONTROLE DE ENTRADA DE ÁGUA NO SULCO

Tipicamente, um fluxo de água elevado é usado no início da irrigação para que haja um avanço rápido até os finais dos sulcos. O avanço rápido é vantajoso porque reduz a diferença entre os tempos de infiltração do começo e do final do sulco. Se a entrada inicial de água for mantida durante o resto da irrigação, ocorrerá escoamento excessivo de água nos finais, o que significa perdas de água, a menos que haja reciclagem. Idealmente, a entrada de água deve ser reduzida iterativamente durante uma irrigação. Porém, no controle manual, a prática normalmente adotada é a redução da entrada de água, apenas uma vez, efetivada pouco tempo depois da água ter atingido os finais dos sulcos. A nova entrada é mantida até o final da fase de aplicação e geralmente varia de um terço à metade da entrada inicial.

No controle automático da irrigação a estratégia de redução da entrada de água depende do tipo de válvula ou comporta utilizada no controle do fluxo de água. A redução de água pode ser em degraus ou contínua conforme ilustra a Figura 5-1.

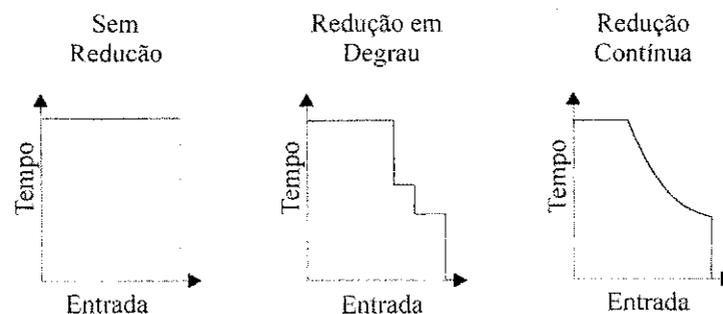


Figura 5-1: Estratégias de redução de água

Ainda hoje, na maioria dos casos, a entrada de água na irrigação por sulco é controlada manualmente. Uma técnica muito usada é a transferência de água de um canal de cabeceira usando sifões, tipicamente dois ou três por sulco [Walker 1987, Humpherys 1986]. Neste caso, a redução da entrada de água é feita retirando-se manualmente os sifões, o que provoca uma redução em degrau da entrada. Outra técnica usada é o controle de entrada usando comportas.

Nos sistemas automatizados, várias alternativas foram propostas para o controle da entrada de água, a partir da estratégia 'liga/desliga' [Walker 1987, Hoffman 1990]. Em [Humpherys 1986] são descritas várias técnicas através das quais a entrada pode ser reduzida para um valor intermediário, através da divisão do fluxo de água entre duas ou mais parcelas. Porém, para atingir o máximo em eficiência, os sistemas automatizados devem empregar um controle variável da entrada de água nos sulcos. São necessárias entre 17 e 40 entradas controladas por hectare [Humpherys 1986], o que significa que custo torna-se um fator importante na avaliação das soluções. Em [Varlev 1998] por exemplo, o controle manual da entrada de água ainda é defendido para países como a Bulgária, onde o custo de mão de obra é baixo.

O avanço de água na primeira fase da irrigação por sulco é bastante sensível a variações no ciclo de trabalho da entrada de água. Em experimentos relatados em [Walker 1987], a variação do ciclo de trabalho resultou em grandes alterações nos tempos de avanço quando comparadas àquelas variações obtidas com a entrada de água constante. Como consequência, o ciclo de trabalho das válvulas nesta configuração tem que ser mantido em 100% durante a fase de avanço. Para garantir o avanço mais rápido possível, as manivelas das válvulas devem ser individualmente ajustadas para obter a vazão máxima não erosiva em cada sulco. Uma vez terminada a fase de avanço, o ciclo de trabalho pode ser gradualmente reduzido para diminuir a vazão.

Os dois aplicativos de controle otimizado da irrigação por sulco, descritos no capítulo anterior, diferem apenas no tipo de dispositivo usado para controlar a entrada de água nos sulcos, representados por objetos de E/S genérica do tipo 'Atuador' e 'AtuadorCíclico'. As duas seções a seguir discutem os tipos de dispositivos de hardware que podem ser representados por estes dois tipos de objeto.

5.1.1 Dispositivo 'AtuadorPID'

Uma configuração comum de controle de entrada de água é o uso de comportas com atuadores liga/desliga, alimentando canais laterais com *spiles*²⁰, ilustrado na Figura 5-2. A vantagem desta configuração é que um único dispositivo de controle pode controlar a entrada de água em dezenas de sulcos, o que possibilita o uso de parcelas irrigadas grandes. A desvantagem desta configuração é sua inflexibilidade, representando um investimento relativamente alto sem a possibilidade de variar a separação entre sulcos para acomodar planteis diferentes.

²⁰ *Spile* – Seção curta de um tubo, chumbada nas laterais de um canal, para alimentar um sulco de água.

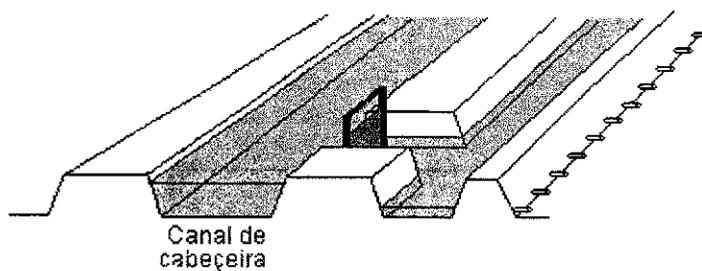


Figura 5-2: Comporta com canal lateral e *spiles*

Nesta configuração o nível de água no canal lateral atinge e permanece no mesmo nível que o canal principal, e o fluxo de água saindo pelos *spiles* é constante. Porém, para obter um controle variável de entrada de água nos sulcos, a comporta tem que ser equipada com atuador linear. Quando o nível de água no canal principal mantém-se constante, o fluxo de água entrando nos sulcos é uma função de abertura da comporta. Neste caso a comporta poderá ser representada por um dispositivo 'AtuadorLinear'. Por outro lado, se o nível de água no canal principal sofre alterações, então a comporta e seu atuador linear necessitam de um dispositivo mais sofisticado o 'ControladorPID'. Este dispositivo mantém o nível de água no canal secundário em um nível que resulta no fluxo de água desejado para entrada nos sulcos. Em termos da variável controlada há duas possibilidades:

- *Vazão de água* entrando nos sulcos é medido através de um sensor de fluxo instalado em um dos *spiles* em uma parcela.
- *Altura da água* no canal secundário é medida através de um sensor de nível, e a entrada de água é uma função da altura.

Dos dois métodos citados, o controle da altura de água é o mais interessante porque um sensor de profundidade pode ser adquirido por uma fração do custo de um sensor de vazão. Por outro lado, o controle de altura de água requer que o aplicativo de controle gerencie uma tabela de relação altura/entrada, ou seja, há necessidade de calibração *in situ* da configuração.

5.1.2 Dispositivo 'Atuador'

A vantagem de dispositivos de controle de entrada de água com atuadores lineares resulta da possibilidade de variação contínua do fluxo de água, a partir de zero até um valor máximo de vazão. Isso permite que o operador escolha uma entrada de água inicial que corresponda às condições existentes no campo. Além disso permite, se necessário, que a entrada de água seja ajustada durante a fase de avanço. As duas seções a seguir discutem como válvulas borboleta e comportas podem ser usados desta forma.

Válvula Borboleta

Esta válvula oferece pouca resistência ao fluxo da água, sendo portanto apropriada para uso na irrigação por sulco, em situações onde a coluna de água é baixa (quando é retirada de um canal de

cabeceira, por exemplo). Esta válvula é bastante usada nos sistemas de automação da irrigação, porém com atuador “liga/desliga” do tipo elétrico, pneumático ou hidráulico. Uma vazão variável, usando atuadores liga/desliga, pode ser obtida através da alteração do ciclo de trabalho, mas não é aconselhável devido ao desgaste mecânico excessivo que resultaria. A maneira mais apropriada de obter uma vazão usando a válvula borboleta é, com atuador linear elétrico, possivelmente baseado em motor passo-a-passo (Figura 5-3).

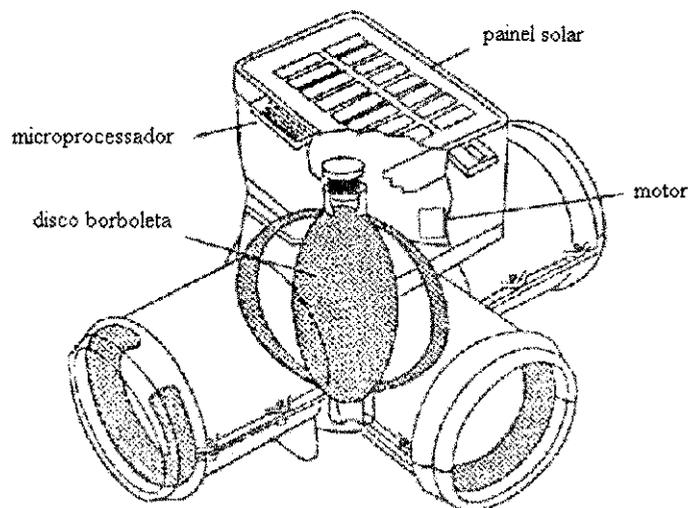


Figura 5-3 Válvula borboleta

Devido ao alto custo do conjunto válvula borboleta e atuador linear, é economicamente inviável utilizar um conjunto para cada sulco. Mais apropriado é usar uma válvula por parcela, acoplada a um cano janelado, conforme ilustrado na Figura 5-4. Uma válvula borboleta usada com cano de 250 mm pode alimentar de 10 a 20 sulcos, dependendo da coluna de água disponível. Para assegurar que a entrada de água seja igual em todos os sulcos, o cano janelado deverá ser instalado na horizontal, com todas as janelas ajustadas para a mesma abertura. Uma tela de proteção na entrada do cano evita a entrada de objetos estranhos que poderiam obstruir o fluxo de água [Humpherys 1986].

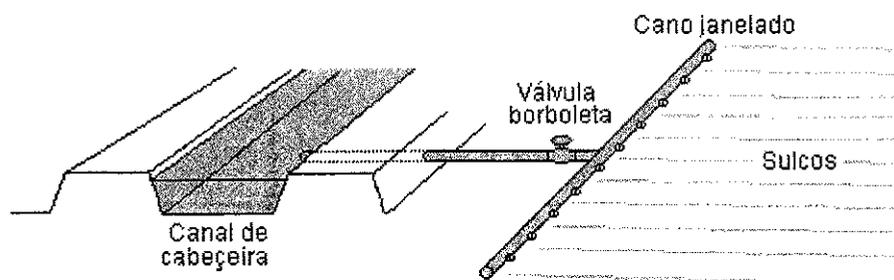


Figura 5-4: Controle de entrada usando válvula borboleta

Comportas

Como dispositivo de controle, as comportas oferecem duas vantagens em relação às válvulas. Primeiro, seu custo é menor, podendo ser fabricada artesanalmente usando materiais disponíveis

localmente. Segundo, comportas funcionam com uma coluna de água baixa, e fornecem vazões altas de água de canais de cabeceira. Como no caso das válvulas borboleta, sua atuação linear ainda é rara nos sistemas automatizados, atuais.

Como a comporta é um dispositivo de uso em sistemas abertos de transporte de água, uma caixa de saída é necessária para acoplá-la a um cano janelado, conforme ilustra a Figura 5-5, onde uma comporta é acoplada a dois canos janelados de 250 mm. A utilização de dois canos separados ajuda a reduzir a queda de pressão ao longo do cano, fornecendo uma saída mais uniforme de água das janelas. Uma tela de proteção deve ser instalada, frente a comporta, para evitar que objetos estranhos entrem e obstruam os canos.

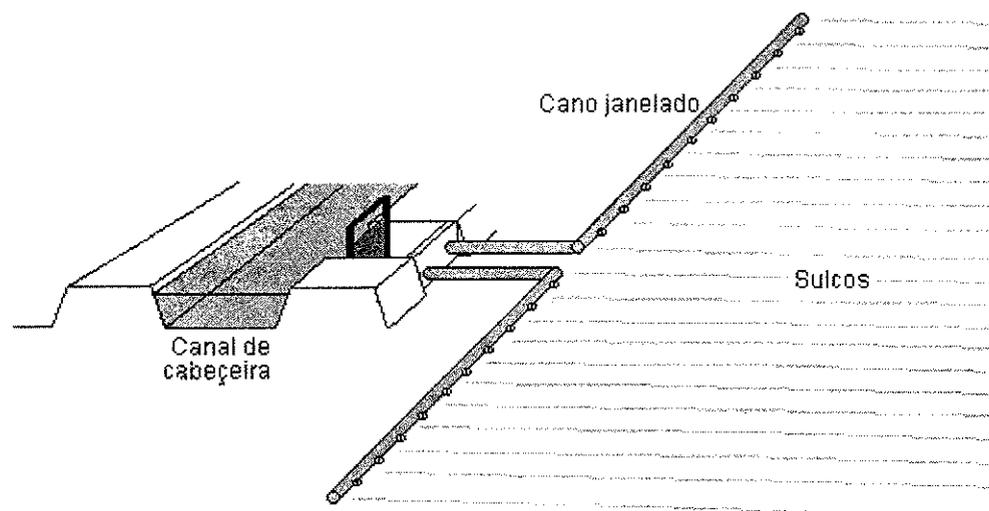


Figura 5-5: Controle variável de entrada usando uma comporta

5.1.3 Dispositivo 'AtuadorCíclico'

Há dois tipos básicos de dispositivo de controle de fluxo: comportas para canais e válvulas para canos. Uma vez que comportas não são apropriadas para operação contínua de ligar/desligar, a discussão a seguir concentra-se no uso de válvulas. Existem três tipos básicos de válvula usados na irrigação: borboleta, diafragma e travesseiro de disco. A válvula borboleta é muito usada na automação da irrigação por sulco, mas não é apropriada para o controle de entrada usando variação de ciclo de trabalho, devido ao excessivo desgaste mecânico resultante. As válvulas diafragma e travesseiro podem ser acionadas de forma rápida, sem desgaste mecânico significativo. Estes dois tipos de válvula são discutidos a seguir.

Válvulas Diafragma

As válvulas diafragma são do tipo "liga/desliga", são robustas e, quando fabricadas em plástico, são de custo relativamente baixo. Podem ser acionadas por meios elétricos, hidráulicos ou pneumáticos. De acordo com [Wardle 1993], o acionamento elétrico está tornando-se o mais usado devido à sua maior confiabilidade. A Figura 5-6 ilustra os resultados de testes de vazão realizados com

uma válvula diafragma de plástico²¹, de 50 mm, acionada por solenóide, com uma duração de ciclo de trabalho de 20 segundos.

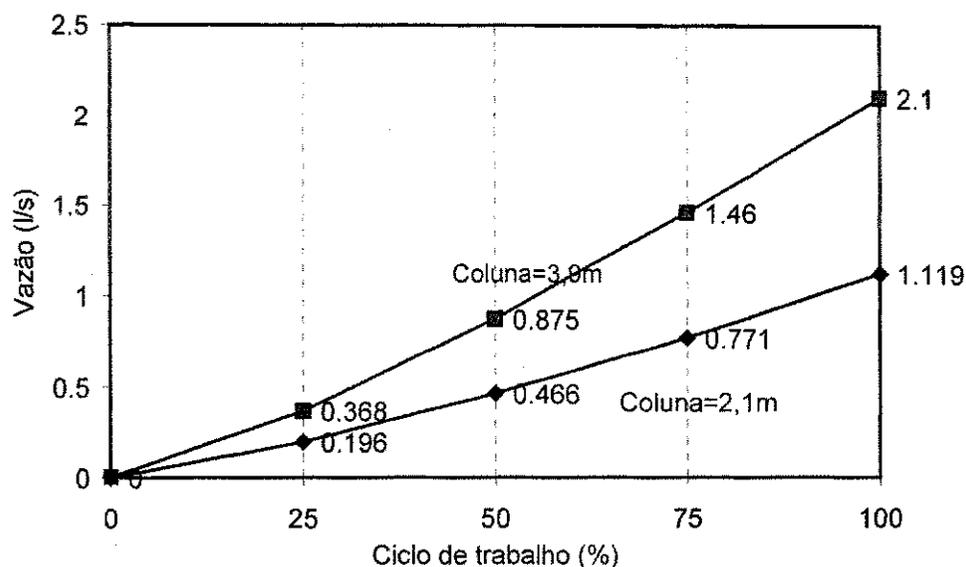


Figura 5-6: Fluxo de água de uma válvula diafragma em função do ciclo de trabalho

Estes resultados revelam duas características das válvulas tipo diafragma, neste tipo de operação:

- *Uma pequena não linearidade de vazão*, em relação ao ciclo de trabalho empregado. Isso deve-se ao tempo de aproximadamente 1 s que o fluxo de água leva para estabilizar-se após a energização e desenergização do solenóide.
- *A coluna de água necessária*, na válvula testada, está na faixa de 2 a 4 m, para fornecer a necessária vazão de água por sulco.

Devido à coluna de água necessária, o uso de válvulas tipo diafragma não é viável, quando a coluna de água é muito baixa, o que acontece quando a água é obtida diretamente de um canal na cabeceira das parcelas. No exemplo da Figura 5-7, um único cano de 250 mm alimenta duas parcelas de 10 sulcos cada. Apenas uma das parcelas pode ser irrigada por vez.

²¹ Válvula, marca Bermad, modelo 200

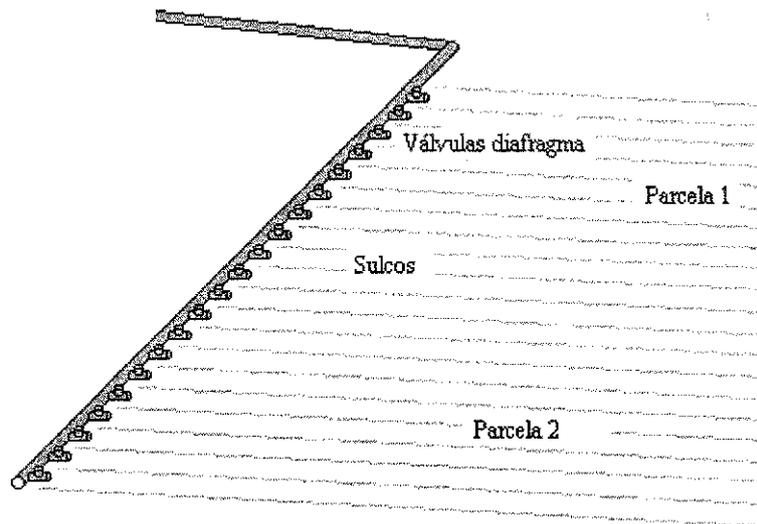


Figura 5-7: Controle de entrada usando válvulas diafragma individuais

O solenóide de cada válvula é acionado com 24 V c.a. com corrente de 80 mA. Portanto, uma parcela com 10 válvulas requer em torno de 800 mA, apenas para os solenóides, por um período de horas por vez. Quando o controlador é alimentado por painéis solares, baterias em torno de 20 AH de capacidade são necessárias. Com um investimento maior, solenóides tipo 'latching' podem ser utilizados, reduzindo consideravelmente a corrente média necessária.

Para reduzir os custos da automação e aumentar a confiabilidade, uma única válvula diafragma pode ser usada conforme mostra a Figura 5-8. Cada válvula é acoplada a um cano janelado. Para direcionar a água para as parcelas, válvulas borboletas adicionais são necessárias.

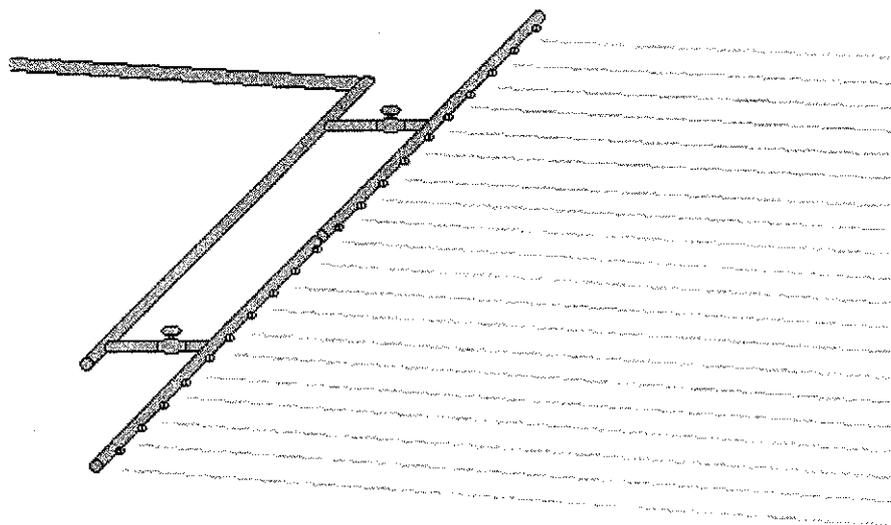


Figura 5-8: Controle de entrada usando uma válvula diafragma por parcela

Válvulas Travesseiro

As válvulas travesseiro são acionadas pneumaticamente (Figura 5-9). Oferecendo menor impedimento ao vazão de água, elas podem ser operadas com uma pequena coluna de água. O tipo

ilustrado em [Humpherys 1986] tem corpo de plástico, é de baixo custo, e é acoplada a um cano de 250 mm.

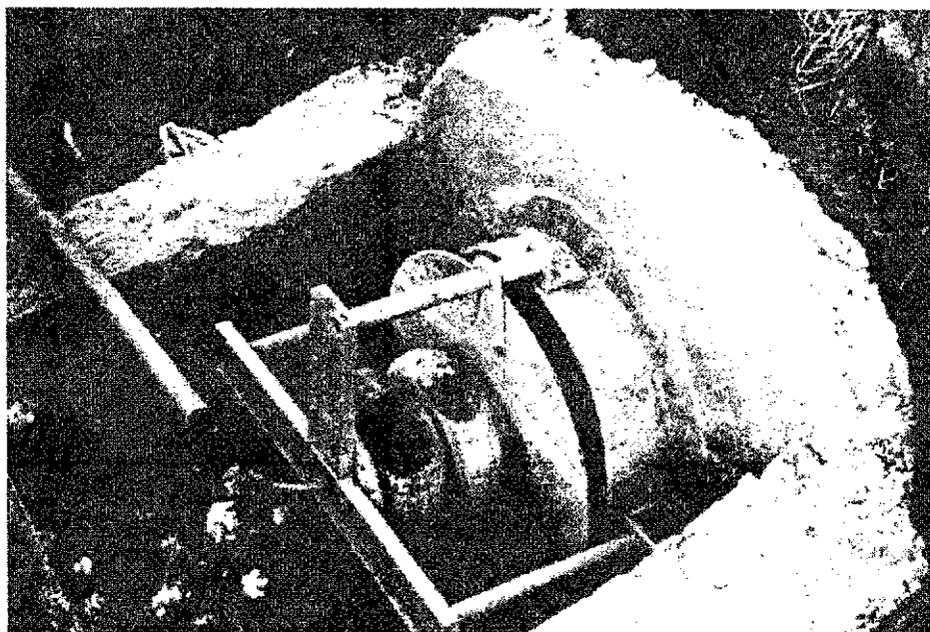


Figura 5-9 Válvula travesseiro

As Válvulas 'Epp-Fly Modificadas'

Uma alternativa à válvulas do tipo diafragma é a válvula “Epp-fly modificada” [Walker 1987]. De construção simples, esta válvula é composta de uma caixa de aproximadamente 8 x 15 cm, que contém um balão de borracha. Este balão interrompe o fluxo de água ao ser inflado pneumaticamente. Cada válvula possui um alavanca de ajuste de fluxo, permitindo que as entradas nos sulcos sejam equalizadas. Apesar de ser de baixo custo, sua utilização apresenta duas desvantagens:

- *Requer uma válvula auxiliar.* Sendo uma válvula normalmente aberta, há necessidade de uma válvula auxiliar, no início do cano para desligar a água. Infelizmente, o custo de uma válvula para canos de 200 – 300 mm, é alto [Varlev 1998].
- *Menor confiabilidade.* Manter a integridade pneumática alta, é difícil, devido aos seguintes fatores: 1) ocorrência de danos no tubo de interconexão, por exemplo aqueles causados por ratos [Humpherys 1986], e 2) desgaste dos balões das válvulas, a borracha dos quais são feitos pode ficar comprometida após milhares de inflações.

Devido a estas desvantagens a válvula ‘Epp-Fly Modificada’ é mais apropriada para sistemas experimentais do que para sistemas de produção.

5.2 DETERMINAÇÃO DA ENTRADA DE ÁGUA

Os dois métodos de otimização da irrigação por sulco, descritos no capítulo anterior, demandam a medição da entrada de água nos sulcos. Isso pode ser realizado sem sensoreamento, usando uma

calibração *in situ* inicial que relaciona uma fluxo de água com o grau de abertura de uma válvula. Alternativamente, pode-se determinar a entrada de água através de sensoreamento. No capítulo anterior, foi determinado no estudo de erros que a otimização correta da irrigação depende da determinação da entrada de água com erro máximo de um ou dois por cento. Segundo [Hoffman 1990], os tipos de sensor mais apropriados para medição do fluxo de água em canos de irrigação são:

- *Sensor tipo hélice*, nestes, o tamanho da hélice deve ser igual ao diâmetro interno do cano para evitar erros provenientes da não uniformidade no fluxo causados pela proximidade da válvula. Com erro típico abaixo de 3%, este sensor é apropriado para uso na finalidade deste trabalho, porém, segundo [Walker 1987], o funcionamento deste tipo de sensor pode ser prejudicado por detritos.
- *Sensor ultra-som* é um sensor que necessita de uma fonte de energia 110/220 V para funcionar. Com erro típico abaixo de 2%, este sensor também é apropriado para uso neste trabalho, porém segundo [Walker 1997] este sensor é relativamente caro.
- *Sensor tubo de Venturi* é um sensor simples sem partes móveis. O fluxo da água é dado pela diferença de pressão entre dois orifícios situados em lados opostos de uma restrição. A queda de pressão devido à obstrução pode inviabilizar seu uso em sistemas com pouca coluna de água. Com erro típico de até 7% este sensor só pode ser usado neste trabalho se for levantado uma curva de correção através da calibração *in situ*.
- *Sensor de vórtices* mede fluxo através da medição da velocidade de vórtices criados por um obstáculo. O erro típico, abaixo de 1% torna este sensor apropriado para uso neste trabalho.

Todos estes tipos de sensor devem operar em canos totalmente cheios de água. Portanto, quando operados em conjunto com válvulas devem ser instalados antes delas.

Quando a entrada de água é controlada de forma proporcional, então o fluxo de água passando pelo sensor é razoavelmente estável. Neste caso, qualquer dos sensores acima pode ser usado, devendo ser lido a cada intervalo de tempo usado na simulação, tipicamente a cada dois ou três minutos. Por outro lado, nas duas técnicas de controle propostas neste trabalho, a entrada de água é controlada através do seu ciclo de trabalho. Neste caso, o fluxo de água passando pelo sensor sofre muita variação em magnitude. Assim, a medição de fluxo torna-se mais difícil. Se o sensor usado for de leitura rápida, uma estação de campo pode realizar uma alta taxa de amostragem e calcular a média. Por outro lado, se o sensor for do tipo que gera pulsos, estes pulsos podem ser contados usando as entradas tipo contador que a maioria dos microcontroladores dispõe. Este método é mais fácil de implementar e mais preciso. O tipo de sensor mais indicado para esta modalidade é o tipo hélice, no qual, um detetor Hall captura a rotação da hélice através de um ímã na ponta de uma de suas hélices.

5.3 DETECÇÃO DE ÁGUA NO SULCO

Além do controle e medição da entrada de água, um outro desafio técnico a ser superado para efetivar o controle otimizado da irrigação por sulco é a detecção do avanço da água na primeira fase da

irrigação. Para fins de análise e otimização, o avanço é caracterizado pelos dados relativos à distância e ao tempo. Uma das primeiras técnicas usadas para obter dados de avanço é descrita em [Humpherys 1985]. Nesta técnica, circuitos de relógios digitais (comuns) foram adaptados para incluir um par de eletrodos externos. A presença da água nos eletrodos parava o relógio, marcando o tempo de chegada da água naquele ponto do sulco. Para cada sessão de irrigação, os relógios eram sincronizados, instalados no sulco e, recolhidos após a fase de avanço. Embora válida para fins de pesquisa, esta técnica não é apropriada para fins de controle nos sistemas reais.

Uma segunda técnica de coleta de dados sobre o avanço da água foi implementada no sistema ARFIS [Latimer 1990]. Este sistema é baseado em estações de campo instaladas no local onde ocorre a irrigação. Estas estações de campo detectam a presença de água em dois pontos do sulco e transmitem os dados à estação base através de enlaces de rádio. A detecção de água é feita a partir da queda de resistência entre os dois eletrodos.

5.3.1 Análise de Requisitos

Em [Hoffman 1990] é ressaltada a necessidade de novas formas de telemetria para sensores, que apresentem baixo custo, baixa potência e que tenham um alcance de até 2 km. Conclui-se portanto, que um projeto de detetores da presença de água, para acompanhar o avanço de água no sulco, deve considerar os seguintes aspectos:

- *Longas Distâncias.* Os sulcos geralmente têm algumas centenas de metros de comprimento, podendo chegar ou até ultrapassar 700 m [Varlev 1998]. Além disso, o roteamento das redes de detetores pode ser multiplicado para permitir o acompanhamento do avanço em mais de um sulco. Portanto, o comprimento total da rede poderá ultrapassar mil metros.
- *Ruído.* Centenas de metros de fio captam ruído eletromagnético de máquinas agrícolas, linhas de transmissão de alta tensão e sinais de rádio para a comunicação por voz.
- *Custo.* O número de detetores de água empregado em um projeto é influenciado pelo seu custo. Um custo reduzido incentiva a instalação de um maior número de detetores, o que por sua vez pode levar a um aumento de precisão dos dados sobre o avanço utilizados na otimização da irrigação por sulco.
- *Facilidade de manutenção.* Como já foi mencionado, o campo é um ambiente hostil ao hardware instalado. Detetores, fios, estações de campo estão sob constante ameaça de danos provocados por insetos, roedores, passagem de trabalhadores e de máquinas agrícolas. Por conseguinte, a rede de detetores deverá ser de fácil manutenção. Particularmente, porque os trabalhadores e técnicos responsáveis pela manutenção do sistema de automação agrícola dispõem de poucas ferramentas especializadas e possuem apenas um treinamento básico em eletrônica ou, não possuem nenhum.
- *Não obstrução do fluxo de água.* Os detetores não devem obstruir o fluxo de água no sulco. Qualquer obstrução seria exacerbada pelo acúmulo de folhas e pedras, resultando na distorção do avanço e no comprometimento da otimização da irrigação.

Com base nestas considerações, as três redes de detetores desenvolvidas neste trabalho utilizam fio duplo. Isso resulta em maior confiabilidade, pois acredita-se que a principal causa de falha de uma rede de detetores seja o mal contato entre os detetores e o fio. O uso de apenas dois fios minimiza este risco. O uso de dois fios também facilita a manutenção, porque em caso de dano, o fio duplo é facilmente consertado no campo pelos próprios agricultores. Finalmente, a utilização de dois fios minimiza custos (fio duplo de bitola fina é de fácil aquisição e de baixo custo). Este fator é importante se for considerado que sistemas de médio e de grande porte necessitam de milhares de metros de fio para as redes de detetores.

O sistema FarmWeb possibilita a utilização da rede de detetores de duas formas. Na primeira, a rede pode ser acoplada a um computador central através de um circuito de interface. Esta forma é apropriada para um sistema de apoio a decisão, utilizado no acompanhamento e planejamento de uma irrigação. Na segunda forma, a rede de detetores pode ser acoplada a uma estação de campo, e fornece dados para o controle da irrigação.

5.3.2 Detecção de Água com Elementos Sensores Resistivos

Esta forma de detecção da presença da água no sulco de irrigação consiste em medir a alteração da resistência entre eletrodos. Duas das três redes de detetores, desenvolvidas neste trabalho, utilizam este método para detectar a presença da água no sulco. Nos testes destas redes de detetores, foram utilizados eletrodos construídos com chapa de alumínio, com área de 9 cm² e uma separação de 1 mm. A resistência medida entre estes eletrodos no ar é maior que 30 M Ω (limite do equipamento de medição utilizado), enquanto que a resistência medida após a imersão em água varia de 20 a 40 k Ω . Nas seções a seguir serão discutidas algumas das características deste método de detecção de água.

Interação Elétrica entre Detetores.

A interação elétrica entre detetores foi observada quando dois deles foram testados próximos um do outro. Esta interação prejudicava a operação dos detetores em distâncias de até dois metros para água potável e de quatro metros para água salobra. Na irrigação por sulco observa-se a tendência para o acúmulo de sal nas laterais dos sulcos, chegando a formar crostas que podem vir a prejudicar o cultivo. Nestes casos, a água deve ser considerada salobra e a distância mínima de separação a ser adotada deve ser de cinco metros. Normalmente, os detetores em um sulco são separados por distâncias de algumas dezenas de metros, portanto estes problemas de interação não se manifestarão. Por outro lado, existe a possibilidade de interação entre um detetor e um sensor de outro tipo, por exemplo, um sensor de umidade ou de infiltração de água.

Tensão Eletroquímica

Os primeiros testes realizados com os eletrodos imersos em água potável produziram resultados favoráveis, com a resistência medida entre os eletrodos variando entre 20 e 40 k Ω . Porém, em testes

posteriores, com os eletrodos imersos em uma solução de água e solo, observou-se que a resistência não caía abaixo de 100 k Ω . De início suspeitou-se que esta inconsistência fosse resultado da corrosão do alumínio utilizado na construção dos eletrodos ou de alterações na composição química da mistura água/solo. Após testes foi constatado que estas inconsistências eram resultado da geração de tensões eletroquímicas nas placas.

O efeito da tensão eletroquímica sobre um sensor de umidade do solo é discutido em [Malicki 1989]. Basicamente, uma tensão eletroquímica é gerada na interface entre um eletrodo e o solo úmido. Testes realizados com dois eletrodos de aço inoxidável, colocados em solo úmido, registraram uma tensão de 200 mV entre eletrodos. A inconsistência observada entre os valores de resistência registrados no testes iniciais e em testes posteriores, deve-se portanto às tensões eletroquímicas. No entanto, a tensão eletroquímica não compromete o funcionamento dos detetores resistivos propostos neste trabalho.

Corrosão devido a Eletrólises

Os primeiros protótipos de detetores resistivo, desenvolvidos neste trabalho, utilizavam eletrodos de alumínio. Embora o alumínio seja resistente à corrosão, a imersão periódica dos eletrodos em água salobra pode eventualmente resultar em problemas de corrosão devido a eletrólises. Os dois detetores utilizam uma tensão de corrente contínua, nos eletrodos, que pode resultar em eletrólise e na degradação das suas superfícies. O resultado a longo prazo é o aumento da resistência entre eletrodos. Este problema pode ser reduzido utilizando-se uma tensão alternada entre os eletrodos, mas esta solução não é compatível com as redes de detetores apresentadas. Uma solução alternativa consiste na substituição do alumínio por metais mais resistentes a corrosão, como o aço inoxidável por exemplo. Esta solução que ainda deverá ser submetida a testes exaustivos por períodos prolongados de operação, mostrou-se satisfatória quando foi testada em laboratório.

Acúmulo de Depósitos nos Eletrodos

Para obter quedas perceptíveis e consistentes na resistência do detetor, na presença de água, verificou-se experimentalmente em testes de laboratório que a separação entre os eletrodos deveria ser de no máximo 1 mm. Contudo, se não for adotado um método para prevenir o acúmulo de partículas de solo e vegetação entre os detetores, o seu funcionamento pode ser comprometido. Os testes com os protótipos demonstraram que até pequenos acúmulos de partículas entre os eletrodos prejudicam o funcionamento do elemento sensor. Isso porque as partículas funcionam como uma esponja, retendo a água por um período prolongado (horas) após a retirada dos eletrodos da água. Esta retenção da água prejudica a monitorização da redução da água no sulco durante a fase de recessão da irrigação.

Uma solução investigada, para este problema, foi o encapsulamento dos eletrodos em gesso. Porém, o gesso não é recomendado porque é solúvel na água. Além do que, uma consequência do encapsulamento dos eletrodos é a introdução de um atraso entre a chegada da água e o disparo do sensor, uma vez que introduz um atraso adicional para a água atravessar o material de encapsulamento.

Em testes com eletrodos encapsulados em gesso de 10 mm de espessura, houve um atraso de cinco a dez minutos para ocorrer a queda de resistência. A redução da espessura para 2 mm diminuiu o tempo de atraso para a faixa de dois a três minutos, porém este atraso ainda é inaceitável para os propósitos de controle deste trabalho, conforme discutido na seção 4.4.4.

Uma solução proposta como alternativa ao gesso é o uso de eletrodos revestidos por um material sintético como o poliéster. Este revestimento permitiria a passagem imediata da água mas impediria a passagem de partículas maiores. O revestimento sintético não reteria a água após a secagem do sulco, permitindo assim o acompanhamento da fase de recessão.

O Elemento Resistivo no Sulco

Para atingir um valor de resistência em torno de 20 k Ω , quando molhados, os melhores eletrodos testados, mediam cerca de 30 x 30 mm com separação de 1 mm. Revestidos em gesso, as dimensões do conjunto ficaram em torno de 42 x 42 x 15 mm. O grau em que o revestimento de gesso interfere com a secagem dos elementos sensores do detetor resistivo é ilustrado na Figura 5-10. Até uma camada de 3 mm implica num atraso de seis a sete horas, após a ausência da água, para que o detetor possa voltar ao estado 'seco'.

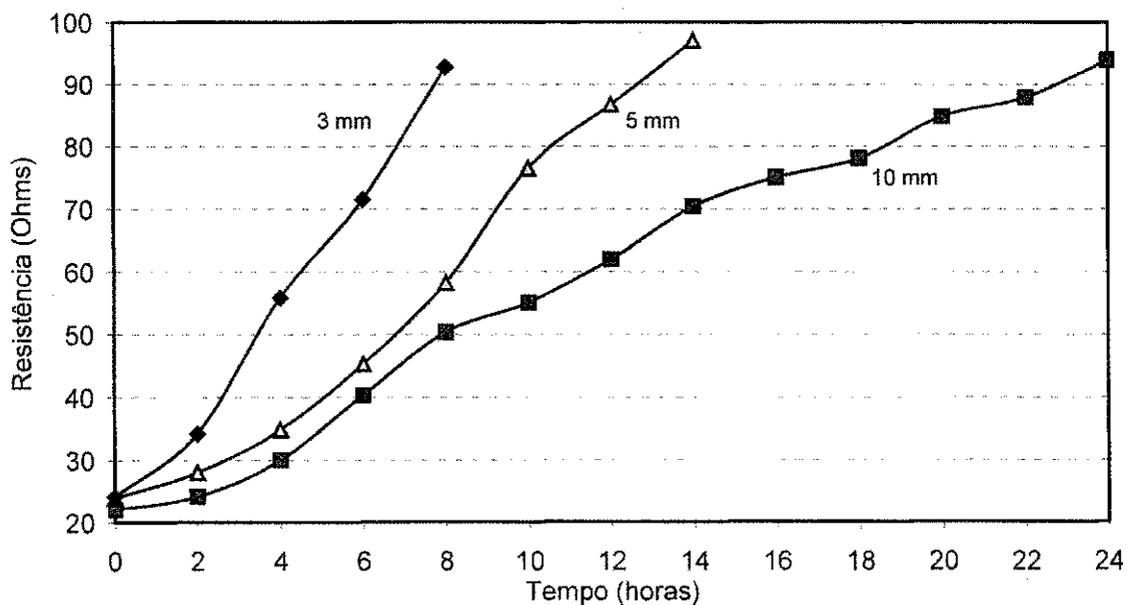


Figura 5-10: Resistência do elementos resistivos revestidos

A colocação de um objeto no sulco com estas dimensões poderia provocar um acúmulo de detritos orgânicos e pedras a sua volta. Para diminuir este risco uma alternativa mais apropriada consistiria em utilizar eletrodos cilíndricos, revestidos com um material sintético, o que resultaria em um conjunto com dimensões aproximadas de 10 x 90 mm.

5.3.3 Detecção da Água com Elementos Sensores Capacitivos

Um sensor capacitivo foi desenvolvido com o propósito de construir uma rede alternativa de detetores para detecção de água. O princípio básico, utilizado pelo elemento sensor, baseia-se no uso da capacitância para detecção da presença de água. Este princípio é bastante utilizado na detecção de umidade e baseia-se na relação descrita a seguir. Considerem-se duas placas sobrepostas, a capacitância das placas pode ser obtida da expressão:

$$C = K\epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (6.1)$$

na qual:

K é a constante dielétrica do material entre as placas;

ϵ_0 é a permissividade do vácuo;

A é a área de cada placa e;

d é a distância entre elas.

Quando a área de superposição ou a distância entre as placas é alterada, obtém-se um sensor de deslocamento. Por outro lado, quando o material dielétrico é alterado, obtém-se um sensor que detecta a alteração do tipo de material entre as placas.

No entanto, um capacitor baseado em duas placas sobrepostas não seria apropriado para a detecção de água no sulco, devido à dificuldade de isolar eletricamente as placas da água e do meio, e devido ao alojamento de partículas de solo entre as placas. A solução encontrada consistiu no uso de um fio condutor elétrico, duplo, como elemento sensor, como ilustra a Figura 5-11:

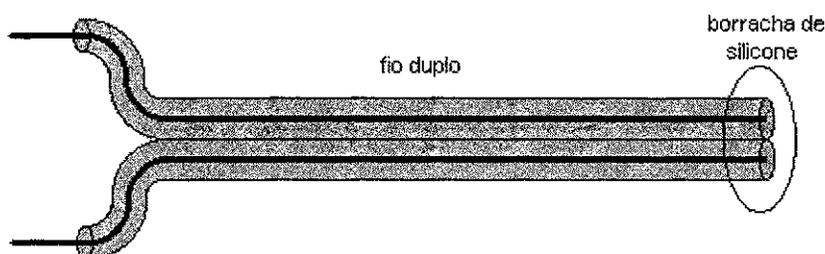


Figura 5-11: Sensor capacitivo com fio duplo

Os terminais de cada fio permanecem abertos, protegidos da água por uma camada de borracha de silicone. A capacitância do fio duplo depende do material que reveste o condutor (o plástico) e do meio no qual o fio está imerso, no caso da irrigação, no ar ou na água. A constante dielétrica do revestimento plástico varia de 3 a 12 de acordo com o tipo de revestimento plástico, enquanto que a constante dielétrica do meio no qual o plástico está imerso é 1,006 para o ar e, 81 para a água. O transporte do fio, entre os meios: ar e água, resulta na alteração do coeficiente do dielétrico do meio entre os fio e portanto, na alteração de sua capacitância. A Tabela 5-1 mostra a capacitância de 10 m de fio duplo (bitola 22 AWG) à medida que é recoberto pela água ao longo de sua extensão. As medidas foram registradas à medida que cada metro do par de fios ia sendo imerso na água.

Tabela 5-1: Aumento da capacitância de fio duplo imerso em água

Comprimento Imerso (m)	Capacitância do fio (nF)	Varição da capacitância (%)
0	0.46	-
1	0.51	10.9
2	0.56	21.7
3	0.62	34.8
4	0.67	45.6
5	0.73	58.7
6	0.79	71.7
7	0.84	82.6
8	0.89	93.5
9	0.95	106.5
10	1.01	119.6

Estes resultados ilustram o grau de sensibilidade do fio, na presença da água, tendo sido registrado um aumento de 119,6% na capacitância do fio quando encontrava-se totalmente imerso na água. Para verificar que este efeito não depende da variação de resistência, resultante da infiltração de água no revestimento plástico, a resistência entre os fios foi medida antes, durante e após o teste. Todos os valores registrados permaneceram acima de 30 MΩ (limite superior do instrumento utilizado).

O uso de fio duplo como capacitor é limitado pelo comprimento necessário para registrar uma capacitância efetiva. Como ilustrado na Tabela 5-1, são necessários 20 m de fio para obter-se 1 nF. Uma alternativa ao uso de fio duplo é a utilização de cabo flexível²². Este tipo de cabo apresenta um comportamento de capacitor a partir do agrupamento de seus condutores de forma alternada, conforme ilustra a Figura 5.12.

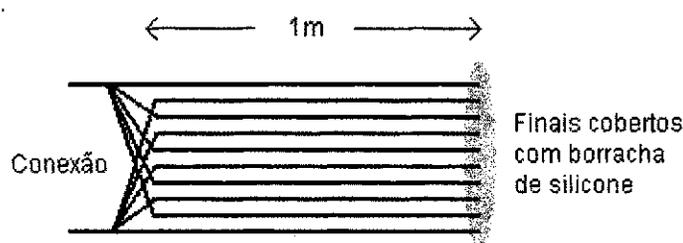


Figura 5-12: Cabo flexível como capacitor

A Tabela 5-2 apresenta o efeito da água sobre a capacitância de um segmento de cabo flexível, com 1 m de comprimento, para diversos números de vias. Desta tabela nota-se que o comprimento de cabo flexível necessário para obter-se 1 nF é por volta de 0,60 m (50 vias), sendo portanto, bem menor que aquele necessário para obter o mesmo valor de capacitância com o fio duplo.

Tabela 5-2: Capacitâncias seco e molhado de 1 m de cabo flexível

²² Flat cable, do tipo usado na conexão de disco rígidos com placa mães.

Número de vias no cabo	Capacitância quando seco (nF)	Capacitância Quando Molhado (nF)	Variação da Capacitância (%)
2	0,03	0,13	333,3
4	0,09	0,26	188,8
8	0,20	0,51	155,0
16	0,43	1,07	148,8
26	0,72	1,75	143,0
40	1,21	2,87	138,0
50	1,48	3,45	133,7

A Tabela 5-2 ilustra também a mudança percentual de capacitância, que é maior do que aquela registrada para o fio duplo. Esse resultado pode ser explicado a partir da Figura 5-13, que representa a seção transversal do cabo flexível. No fio duplo, o plástico que reveste os condutores apresenta uma seção circular, enquanto que no cabo flexível o plástico tem uma seção elíptica. Conseqüentemente, no cabo flexível, o ar e a água aproximam-se mais dos condutores e produzem um efeito maior sobre a capacitância entre eles.



Figura 5-13: Seção transversal do cabo flexível

Um teste foi realizado para verificar a possível infiltração de água no revestimento plástico do fio. Uma seção de fio duplo e outra seção de cabo flexível foram deixadas em água potável por vinte dias. Ao final deste período a resistência entre os fios foi medida. Nos dois casos, a resistência registrada foi maior que 30 MΩ, indicando que não houve infiltração mensurável, com os medidores disponíveis.

O Elemento Sensor Capacitivo no Sulco

A partir dos resultados apresentados, foram analisadas duas configurações básicas para os elementos capacitivos baseados em fio: elementos curtos e elementos compridos. No elemento curto, o aumento de capacitância com a chegada da água, é rápido, especialmente se o elemento for dobrado.

O sinal obtido de um sensor capacitivo (com elemento curto de 50 cm) em um sulco, durante três ciclos de alagamento/secagem, é apresentado na Figura 5-14. O elemento foi instalado no sulco de forma inclinada, seu ponto final no fundo do sulco e seu ponto inicial no topo do sulco. Desta forma o cobrimento do elemento é uma função da altura da água no sulco. O sinal do detetor está na forma de pulsos de corrente de 1 a 3 ms de duração. Esta figura mostra que o período dos pulsos pode ser considerado proporcional à altura de água no sulco. Assim, um sensor capacitivo com elemento curto pode ser utilizado não apenas para detectar a presença ou não de água no sulco, como no caso do sensor resistivo, mas também para detectar a altura de água no sulco.

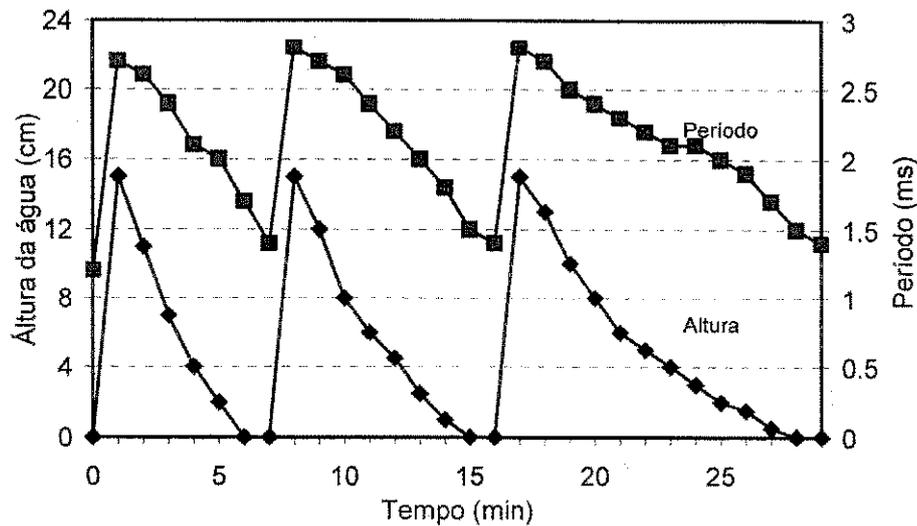


Figura 5-14: Sinalização do sensor em função da altura de água no sulco

No sensor capacitivo comprido, por outro lado, o aumento de capacitância não ocorre de forma imediata, mas gradual, conforme resultados apresentados na Figura 5-15. O ponto A, representa o início do elemento sensor. Após um intervalo de tempo, que depende do comprimento do elemento sensor, a água atinge o final do elemento sensor (ponto B). Porém, a capacitância continua aumentando, uma vez que neste ponto, a camada inicial de água ainda não era suficiente para envolver o fio completamente. Uma vez, submerso na água, a capacitância do fio atinge seu valor máximo (ponto C).

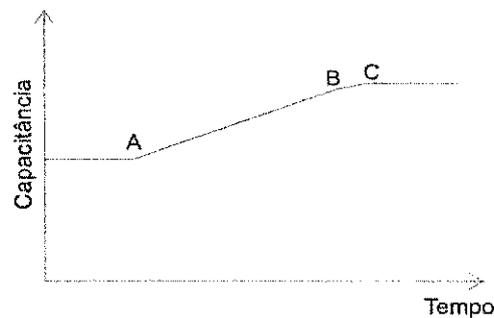


Figura 5-15: Aumento de capacitância

No caso de elementos curtos, cada detetor fornece dados de avanço para apenas um ponto do sulco. Quando elementos compridos são usados (de 10 a 20 m), cada detetor pode fornecer dois dados de avanço, um para o começo do elemento sensor e outro para o final, conforme mostra a Figura 5-16. O aplicativo FarmWeb responsável pela gerência da rede de detetores, cria então dois dispositivos genéricos do tipo “Detetor” para representar um detetor físico na rede.

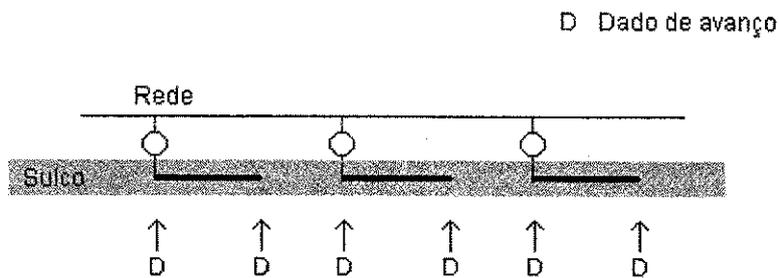


Figura 5-16: Elementos capacitivos longos (no sulco)

5.3.4 Rede de Detetores Resistivos Simples

Esta seção descreve a primeira rede de detetores de água, desenvolvida neste trabalho. A ligação de detetores em rede utiliza dois fios. A detecção da água dá-se através da variação da resistência de um elemento sensor. A sinalização de estado é realizada através de corrente contínua, enquanto que a identificação dos detetores é feita através da magnitude da corrente do sinal. Esta rede é semelhante àquela descrita em [Smith 1984], exceto que aquela rede utiliza três fios ao invés de dois.

O detetor resistivo baseia-se no princípio de que a resistência entre dois eletrodos diminui na presença de água. Esta diminuição de resistência coloca um transistor de carga em condução e aumenta o consumo de corrente do detetor. Os detetores são ligados em rede, usando fio duplo, conforme ilustra a Figura 5-17. O computador monitora a corrente fornecida à rede para determinar o número de detetores ativados pela presença de água. No início da irrigação todos os detetores estão secos, logo, a resistência total apresentada pela rede é alta. À medida que a água escorre pelo sulco os detetores são ativados e a corrente consumida pela rede aumenta.

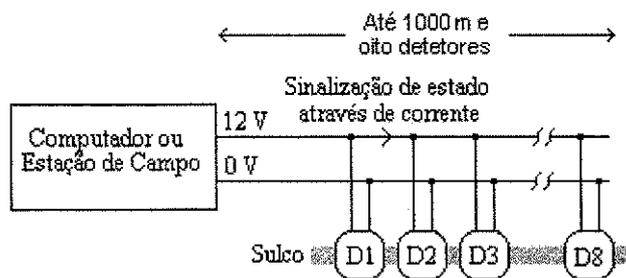


Figura 5-17: Rede de detetores resistivos simples

As correntes de sinalização dos detetores podem ser iguais ou podem variar. A Figura 5-18a ilustra o aumento da corrente durante a fase de avanço, quando os detetores consomem correntes iguais. A Figura 5-18b ilustra a situação na qual a corrente varia de um fator de dois a cada detetor.

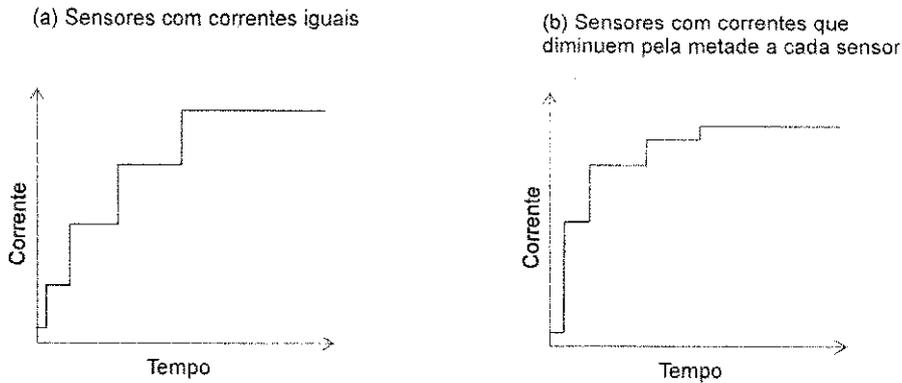


Figura 5-18: Alternativas para o aumento da corrente dos detetores

O uso de correntes iguais facilita a construção dos detetores e sua instalação no campo, uma vez que são todos iguais. Por outro lado, o uso de correntes iguais traz sérias conseqüências em termos da tolerância a falhas na rede. Se um detetor falhar, o sistema não tem meios para detectar esta condição e passa a obter dados incorretos sobre o avanço, associando tempos de avanço a detetores errados. Quando o consumo de um detetor é função de sua posição na rede, é possível associar um aumento específico de corrente a um sensor específico. No exemplo apresentado na Figura 5-18b a corrente de sinalização de cada detetor é metade da corrente de seu predecessor. Se um detetor falhar, esta condição é evidenciada na ocasião em que o detetor subsequente for ativado. As correntes de sinalização usadas na rede desenvolvida são apresentadas na Tabela 5-3.

Tabela 5-3: Correntes de sinalização dos detetores da rede resistiva simples

Sensor	Corrente (mA)
1	32,00
2	16,00
3	8,00
4	4,00
5	2,00
6	1,00
7	0,50
8	0,25

Esta rede é limitada a oito detetores por duas razões. Os conversores A/D, da maioria dos microcontroladores usados nas estações de campo, têm uma resolução de 8 *bits*, ou seja, uma resolução de $1/2^8 = 1/256$. Oito detetores resultam em uma variação de corrente de $1/2^7 = 1/128$, que está na faixa de resolução destes conversores. A segunda razão é a queda de tensão ao longo da rede. Quanto maior for o número de detetores, maior tem que ser a bitola do fio da rede, para evitar quedas de tensão excessivas ao longo da rede. Para reduzir as quedas de tensão os detetores são instalados na rede, em ordem decrescente de corrente. Feito isso, uma rede construída com fio 18 AWG suporta oito detetores sobre uma distância de até 1000 m.

O Circuito

A Figura 5-19 apresenta o circuito do detetor resistivo simples. Este circuito é composto de dois transistores e dois resistores. A resistência entre os eletrodos do detetor é representada na figura pelo resistor R_s . Com os eletrodos secos, o valor da resistência R_s está acima de $30\text{ M}\Omega$ e não há tensão suficiente na base do transistor T1 para que ele conduza. Com os eletrodos molhados, o valor da resistência R_s cai para valores abaixo de $100\text{ k}\Omega$ e a tensão na base de T1 aumenta para cerca de 6 V . Com isso o transistor T1 entra em condução e ativa o transistor T2, que apresenta o resistor de carga R_c na linha da rede. O capacitor de 100 nF filtra o ruído na rede enquanto o varistor V_1 protege o detetor contra tensões altas na rede.

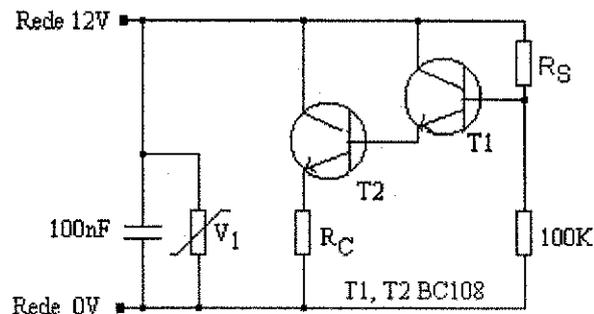


Figura 5-19: Circuito do detetor da rede resistiva simples

Com os eletrodos secos, o consumo do detetor é da ordem de micro-ampères. Esta corrente é suficientemente pequena para que o computador central, ou a estação de campo, ignore o consumo dos detetores que ainda encontram-se secos.

Avaliação

A interligação dos detetores usando fio duplo e, a simplicidade do circuito, são fatores que minimizam custos e aumentam a confiabilidade. O uso de corrente para sinalização resulta em boa imunidade a ruído. A limitação do número de detetores em oito, por rede, não constitui-se em desvantagem, tendo mostrado-se um número adequado quando a rede é acoplada a uma estação de campo responsável pelo controle individual de uma ou duas parcelas de área irrigada.

A principal limitação desta rede resulta da impossibilidade de confirmar o funcionamento correto dos detetores no início de uma sessão de irrigação. Isso porque os detetores só retornam um sinal (que confirma seu funcionamento correto) quando são ativados pela presença de água. Portanto, no início de uma irrigação é impossível avaliar se há um número suficiente de detetores funcionando corretamente, de modo a viabilizar a otimização da irrigação.

5.3.5 Rede de Detetores Resistivos Endereçáveis

A segunda rede de detetores resistivos foi desenvolvida para possibilitar um maior número de detetores interligados em uma mesma rede e permitir seu endereçamento. Como na rede de detetores simples, a ligação dos detetores nesta rede é feita através de dois fios e, a detecção da água é feita

através de elementos resistivos. A sinalização de estado é feita através de corrente contínua. Esta rede inclui um mecanismo de endereçamento por tensão, que permite a leitura de detetores individuais.

Os detetores são ligados em rede utilizando dois fios conforme ilustra a Figura 5-20. A tensão fixa de 12 V, utilizada na rede anterior, foi substituída por uma tensão variável na linha, de 0 a 20 V. O computador, ou a estação de campo, endereça os detetores através da variação de tensão na linha. Cada detetore na rede é habilitado apenas quando a tensão na linha encontra-se em uma faixa estreita e específica. Para interrogar um detetore, o computador central (ou a estação de campo, dependendo a qual a rede está ligada) coloca o respectivo valor de tensão de ativação na linha e em seguida mede a corrente consumida pela rede. Quando um detetore não está sendo endereçado, seu consumo fica entre 3 e 10 mA, dependendo da tensão de linha. Quando um detetore está sendo endereçado, mas não está detectando água, seu consumo permanece nesta mesma faixa. Porém, quando um detetore está sendo endereçado e, está detectando água, seu consumo de corrente sobe para a faixa de 20 a 30 mA.

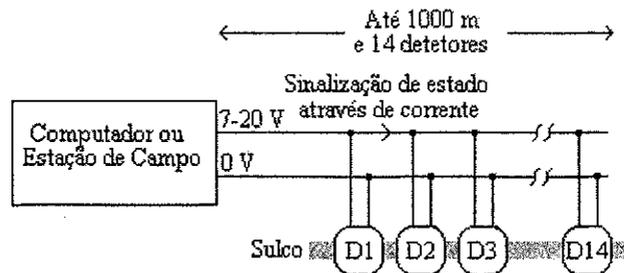


Figura 5-20: Rede de detetores resistivos endereçáveis

A Figura 5-21 ilustra um exemplo de rastreamento de seis detetores na rede. A Figura 5-21a apresenta a tensão que o computador, ou a estação de campo, coloca na linha, durante o rastreamento. A Figura 5-21b mostra a corrente na linha. Neste exemplo, apenas os primeiros três detetores estão sinalizando a presença de água.

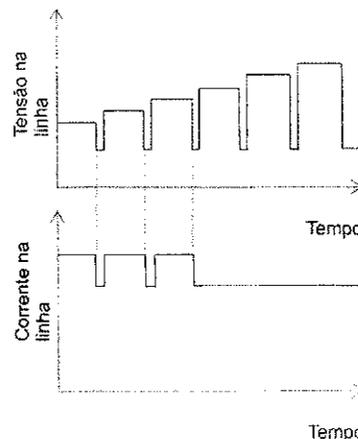


Figura 5-21: Endereçamento de detetores da rede resistiva

O Circuito

A Figura 5-22 apresenta o circuito do detetore da rede resistiva endereçável. Nesta figura a resistência entre os eletrodos é representada pelo resistor R_s . Quando a água atinge os eletrodos, o

valor de R_S cai para valores entre 20 e 40 $k\Omega$ e os transistores T1 e T2 entram em condução, colocando o resistor R_C como carga na linha. O aumento resultante de corrente é a sinalização da presença de água. A função do LED D3 é indicar visualmente a ativação do detetor. Este LED pode ser útil para verificar o funcionamento dos detetores no campo.

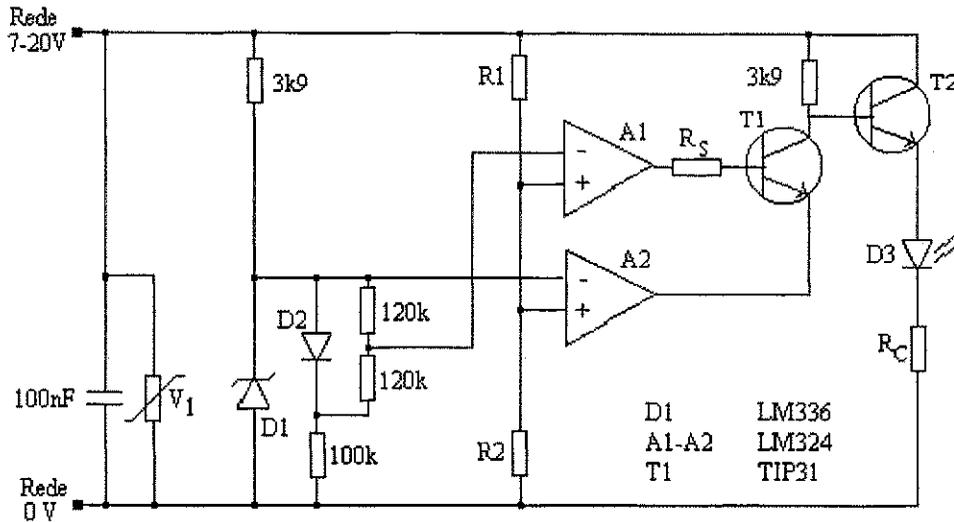


Figura 5-22: Circuito do detetor da rede resistiva endereçável

O capacitor de 100nF filtra o ruído da rede, enquanto o varistor V_1 protege o detetor de altas tensões na rede. No circuito, os amplificadores A1 e A2 são configurados como comparadores. Eles comparam a tensão na linha, com tensões fixas obtidas de um circuito de tensão de referência, baseado no diodo D1 (uma referência de precisão LM336 de 5,0 V). A Figura 5-23 mostra as tensões de saída dos amplificadores A1 e A2 em função da tensão na linha.

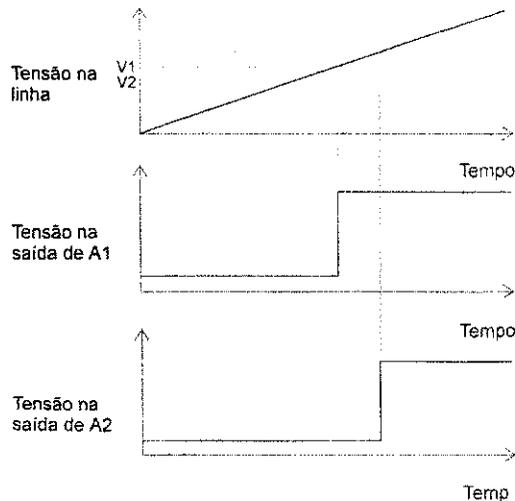


Figura 5-23: Endereçamento por tensão

Quando ocorre a seguinte situação o detetor aumenta o consumo de corrente: 1) a saída de A1 está em nível alto, 2) a saída de A2 está em nível baixo, e 3) o valor da resistência R_S está em nível baixo. Esta combinação ocorre quando a tensão na linha está na faixa de tensão entre V_1 e V_2 . Esta faixa é diferente para cada detetor na rede. A largura da faixa de ativação (V_1 a V_2), é resultado do diodo D2. A entrada inversora do amplificador A1 é ligada à tensão de 5,0 V, fornecida pelo diodo de

referência D1. A entrada negativa do amplificador A2 recebe uma tensão de 4,9 V, resultado do diodo D2²³ e do divisor de tensão formado pelos dois resistores de 120 kΩ. Esta diferença de 0,1 V determina a largura da faixa de ativação.

A Figura 5-24 apresenta o circuito utilizado na interface entre um computador central e a rede de detetores. Este circuito gera uma tensão variável, entre 0 e 20 V, para o endereçamento dos detetores, e fornece ao computador ou à estação de campo um sinal de tensão proporcional à corrente consumida pela rede. Este sinal é acoplado a uma entrada A/D. O ruído de alta frequência é filtrado pelo capacitor de cerâmica de 100nF, enquanto que o varistor V₁ protege a interface contra altas tensões na rede. A tensão de controle V_C, fornecida pelo computador ou pela estação de campo, determina a tensão colocada na linha da rede. No protótipo construído, a tensão V_C é obtida de um conversor D/A de 8 bits de resolução. O amplificador A1 mantém a tensão na linha V_L proporcional a V_C. A relação entre a tensão V_C e a tensão na linha V_L é dada pelo divisor formado pelos resistores 3,3 kΩ e 3,9 kΩ. O transistor T1 aumenta a corrente máxima de saída do circuito para 1 A.

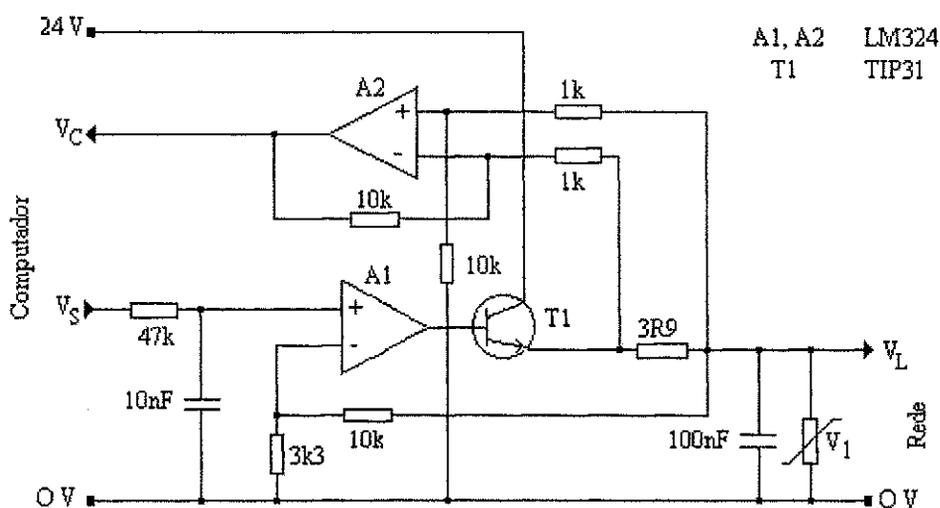


Figura 5-24: Interface entre o computador e a rede endereçável

A função do amplificador A2 é fornecer ao computador ou à estação de campo uma tensão proporcional à corrente consumida pela rede. A saída de A2 é proporcional à queda de tensão sobre o resistor de 3,9 Ω. No protótipo, a saída de A2 é conectada a um conversor A/D de 8 bits de resolução, através de uma placa de entrada/saída interna ao computador.

Cada detetor em uma rede tem uma faixa própria de tensão de habilitação. Se o ganho dos amplificadores operacionais fosse infinito então estas faixas poderiam ser contíguas sem risco de interferência. No entanto, o ganho dos amplificadores reais é finito e portanto, a transição das saídas dos amplificadores usados nos detetores não é abrupta, como sugere a Figura 5-24, mas segue a curva apresentada na Figura 5-25.

²³ O diodo D2 é de germânio

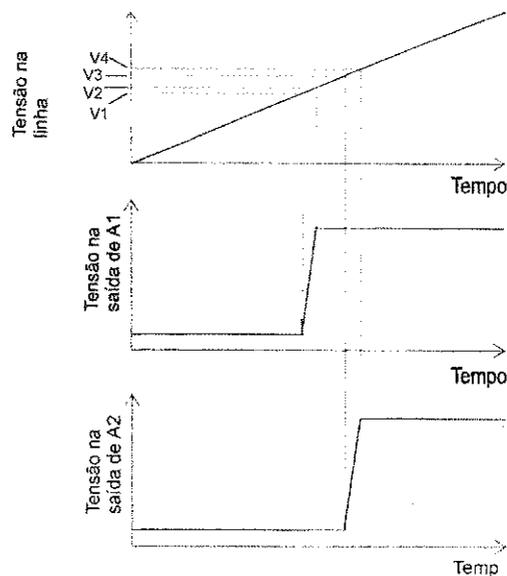


Figura 5-25: Faixa de endereçamento por tensão

A faixa de tensão sobre a qual o detetor é habilitado é de V_1 a V_4 . Porém o funcionamento adequado do detetor, só é garantido na da faixa entre V_2 e V_3 . Consequentemente, as faixas de habilitação dos detetores têm que ser separadas por espaços de guarda cuja função é evitar a interferência entre detetores. A Tabela 5-4 apresenta as faixas de tensão adotadas na rede protótipo.

Tabela 5-4: Tensões de endereçamento dos detetores de água

Detetor	Faixa de Tensão (V)	Detetor	Faixa de Tensão (V)
1	7,00 – 7,29	8	10,75 – 11,20
2	7,44 – 7,75	9	11,43 – 11,90
3	7,91 – 8,24	10	12,15 – 12,66
4	8,41 – 8,76	11	12,93 – 13,46
5	8,94 – 9,31	12	13,74 – 14,31
6	9,51 – 9,90	13	14,61 – 15,22
7	10,11 – 10,53	14	15,52 – 16,18

Consumo de Corrente

O endereçamento por tensão torna este detetor sensível ao consumo de corrente. Um consumo de corrente muito elevado causaria quedas excessivas de tensão na linha as quais, por sua vez, afetariam o mecanismo de endereçamento. O consumo deste detetor é de 3,5 mA para uma tensão de linha de 10 V e, de 5 mA para tensão de linha de 18 V. A redução alcançada é significativa em relação aos protótipos iniciais, os quais apresentaram um consumo entre 12 e 20 mA, para as mesmas tensões. A redução de consumo de corrente foi alcançada com a elevação dos valores dos resistores usados e com a introdução do amplificador operacional LM324. O LM324, embora tenha uma frequência de operação inferior à do TL084, usado originalmente, apresenta uma elevação pequena no consumo interno de corrente, para uma alimentação acima de 5 V. O consumo interno do TL084, porém, é uma função quase linear da tensão de alimentação. Um consumo na faixa de 3,5 a 5,0 mA permite o uso de fio duplo de 20 AWG para redes de até oito detetores, com 600 m de extensão.

Avaliação

A interligação dos detetores usando fio duplo e a simplicidade do circuito são fatores que minimizam custos e aumentam a confiabilidade. A sinalização por corrente contínua apresenta uma razoável imunidade ao ruído. A inclusão de um mecanismo de endereçamento permite o rastreamento individual dos detetores. Este mecanismo é vantajoso porque eleva a quatorze, o número máximo de detetores por rede.

5.3.6 Rede de Sensores Capacitivos Endereçáveis

A rede de sensores capacitivos endereçáveis [Turnell 1997a] utiliza dois fios para comunicação e energização, e utiliza um mecanismo de endereçamento baseado em tensão, como aquele da rede anterior. Por outro lado, os detetores desta rede utilizam capacitância para detectar a presença de água e sinalizam seu estado através de pulsos de corrente. Esta rede de detetores é apresentada na Figura 5-26.

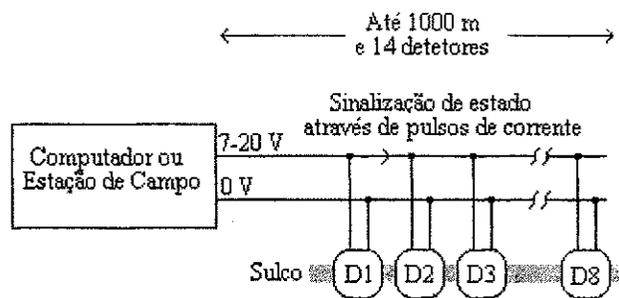


Figura 5-26: Rede de sensores capacitivos endereçáveis

Os detetores desta rede sinalizam seus estados através de pulsos de corrente. O período destes pulsos depende da capacitância do elemento sensor, que por sua vez depende da presença da água. Na ausência de água os pulsos do elemento sensor têm um período de aproximadamente 1 ms. Na presença de água, este período aumenta em até 100%. A Figura 5-27 ilustra o rastreamento de seis detetores em seqüência. A Figura 5-27a apresenta a tensão V aplicada na linha (gerada por uma interface D/A) e a Figura 5-27b apresenta os pulsos de corrente I utilizados pelo detetor para sinalizar seu estado.

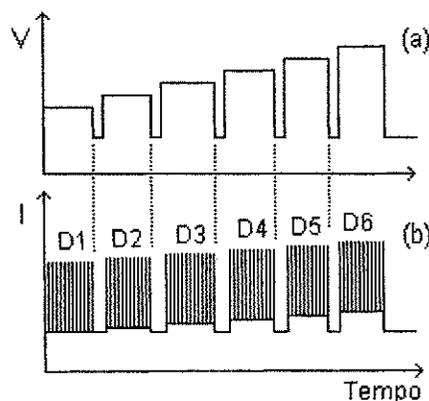


Figura 5-27: Sinalização de estado por pulsos de corrente

Os pulsos de corrente são gerados quando o detetor é endereçado, independentemente do estado da detecção da água. Assim o computador, ou a estação de campo, recebe uma confirmação positiva da presença e do funcionamento dos detetores em uma rede, durante todo o processo de irrigação. A Figura 5-28 apresenta a janela de visualização do sinal que faz parte do aplicativo “gerente de hardware” associado a esta rede. As duas linhas verticais demarcam um pulso.

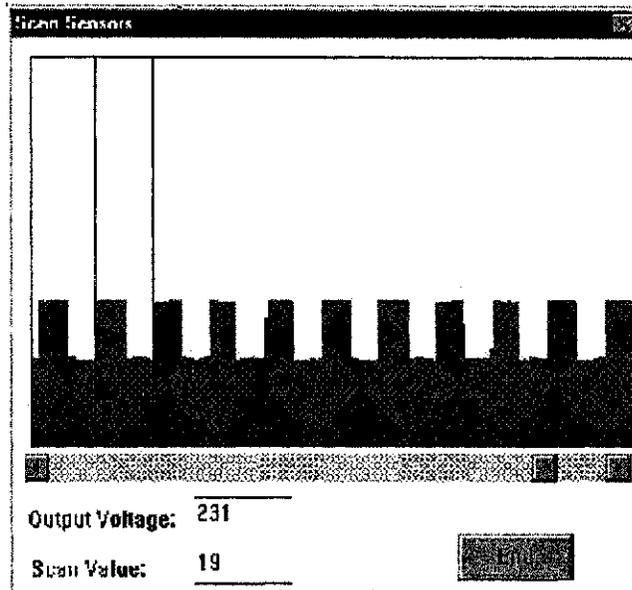


Figura 5-28: Janela de monitorização de pulsos de corrente

O Circuito

A Figura 5-29 apresenta o circuito do detetor desta rede. O lado esquerdo do circuito implementa o endereçamento por tensão e é idêntico àquele do detetor da segunda rede. O lado direito deste circuito implementa a geração dos pulsos de corrente. O amplificador operacional A3 é configurado como um oscilador. Sua frequência de oscilação varia de 500 a 1000 Hz de acordo com a capacitância do elemento detetor C_s . Na presença de água a capacitância de C_s aumenta e a frequência de oscilação do amplificador A3 diminui. A saída do amplificador A3 alimenta a base do transistor T1. Este transistor conduz apenas quando a saída do amplificador A1 está alta e a saída do amplificador A2 está baixa. Isso ocorre quando o computador, ou a estação de campo, aplica uma tensão na linha cujo valor está na faixa de habilitação do detetor. Quando isso ocorre, a onda quadrada na saída de A3 é aplicada pelo transistor T1 no resistor de carga R_c , causando os pulsos de corrente na linha. O valor do resistor R_c determina a magnitude dos pulsos de corrente, que deve ser suficiente para permitir sua detecção pelo computador ou pela estação de campo de modo confiável. O LED do circuito faz a indicação visual de rastreamento, sendo útil para verificação, no campo, do funcionamento da rede. Este LED acende sempre que o detetor está sendo endereçado.

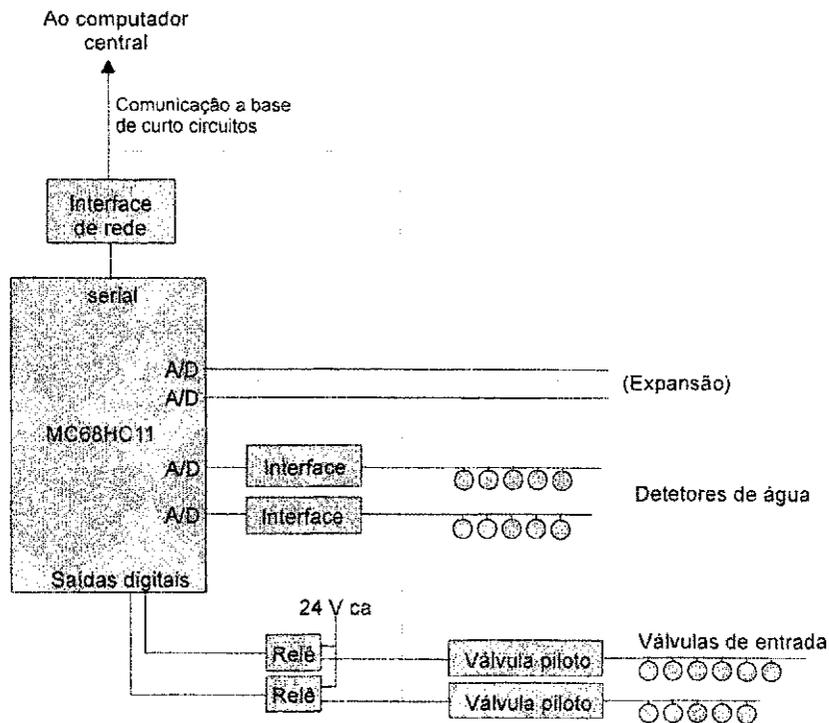


Figura 5-30: Diagrama de blocos da segunda estação de campo

A estação dispõe de cinco entradas analógicas, duas das quais são usadas para acoplar redes de detetores resistivos. As outras três entradas A/D estão disponíveis para o acoplamento de sensores, os quais podem ser dos tipos:

- *Sensor de fluxo*, para determinação de entrada de água nos sulcos nas duas parcelas controladas.
- *Sensor de umidade*. A medição da umidade no solo cultivado fornece dados úteis para aplicativos que monitoram as condições ambientais onde desenvolvem-se as culturas. A umidade pode ser medida através da resistência entre dois eletrodos introduzidos no solo, conforme descrito em [Amer 1994].
- *Sensor de temperatura*. De forma análoga à umidade, dados de temperatura são úteis para aplicativos que monitoram as condições ambientais em torno das culturas. A medição de temperatura é necessária também para fins de compensação em alguns tipos de sensor. Por exemplo, a medição da umidade do solo pelo método Bouyoucos necessita da compensação de temperatura para alcançar uma precisão razoável, conforme descrito em [Lima 1997].

A estação de campo controla a entrada de água em duas parcelas de uma área irrigada, através de saídas com relês de 24 V ca. Estas saídas podem acionar diretamente válvulas elétricas, ou podem ser conectadas a válvulas piloto, que por sua vez acionam válvulas pneumáticas, conforme ilustra a Figura 5-30.

A estação de campo incorpora duas redes de detetores de água do tipo descrito na seção 5.3.4. Este tipo de rede foi adotado porque o microcontrolador 68HC11 não dispõe das saídas D/A necessárias para efetivar o endereçamento por tensão usada nos outros dois tipos de rede de detetor/sensor. No futuro, espera-se ter a oportunidade de desenvolver uma segunda estação de campo

baseada num microcontrolador mais sofisticada que tenha saídas D/A e que permita a utilização de redes de sensores capacitivos.

5.4.1 Comunicação/Energização

Os processos agrícolas estão separados por distâncias da ordem de centenas ou milhares de metros, e geralmente ocorrem em áreas onde não há energia elétrica disponível. A solução adotada atualmente, pela maioria dos sistemas de automação, consiste no uso de estações de campo equipadas com painéis solares e baterias. Estas estações comunicam-se com o computador central através de enlaces de rádio ou radiação infravermelha.

Idealmente, para viabilizar um nível maior de automação na agricultura, as estações de campo deveriam ser tão simples quanto possível. Esta simplicidade pode ser alcançada se forem energizadas localmente e se a comunicação for realizada através de fios. No caso das estações de médio e grande porte, que requerem um consumo elétrico significativo, a energização pode ser local 100/220 V. A energização local forneceria a corrente necessária para solenóides e motores. Embora a energização local seja mais conveniente do ponto de vista da simplicidade de projeto, nem sempre a rede elétrica 110/220 V está disponível nos locais onde seriam instaladas. Mesmo quando está disponível, a energia é tipicamente de baixa qualidade [Gomide 1998]. Como alternativa, para as estações de maior porte, a energia elétrica pode ser fornecida através de painéis solares e baterias, como nos sistemas ARFIS [Latimer 1990], GAL [Deho 1991] e GIL [Gil 1999]. Entretanto, além de aumentar os custos do projeto, esta solução também resulta em estações de campo com estruturas físicas grandes, devido à necessidade de posicionar os painéis acima da vegetação. Para que as estações de campo possam vir a ser mais utilizadas é necessário reduzir seus custos, o que implica na busca de alternativas de energização. Uma solução explorada neste trabalho, é a energização através dos fios utilizados na rede de comunicação.

Conforme mencionado anteriormente, um dos objetivos deste trabalho foi o desenvolvimento de um método de energização e comunicação para estações de campo que reduzisse custos e, como consequência, viabilizasse a difusão da automação agrícola. Na solução proposta e desenvolvida neste trabalho, as estações de campo são ligadas em rede conforme ilustra a Figura 5-31 e podem ser energizadas ou através desta rede, ou podem utilizar a rede elétrica 110/220 V local, dependendo da disponibilidade.

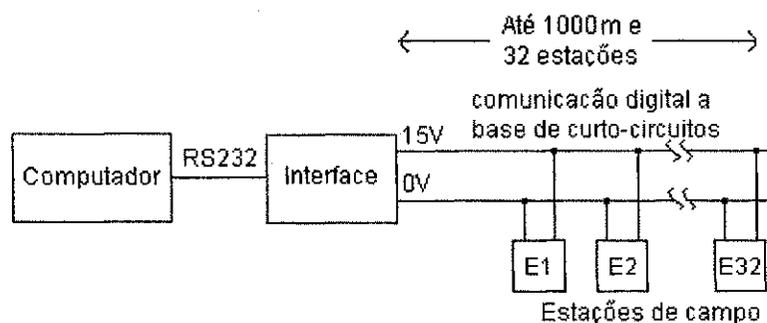


Figura 5-31: Rede de estações digitais

A comunicação entre o computador central e as estações é feita através de um protocolo digital. Os bits da transmissão são gerados a partir da aplicação de curto-circuitos parciais na linha, de forma semelhante àquela utilizada durante a discagem nas linhas telefônicas convencionais. A Figura 5-32 mostra a transmissão de um octeto de dados usando esta técnica.

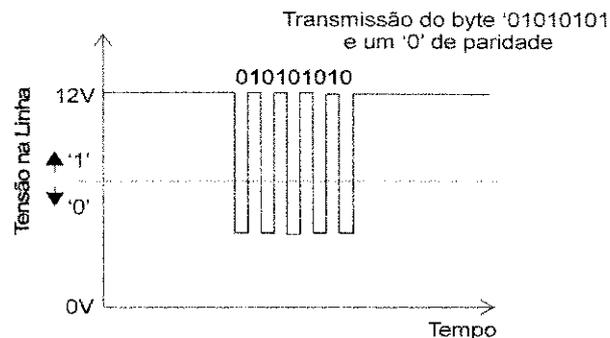


Figura 5-32: Transmissão de dados usando curto-circuito

Normalmente, a tensão na linha é de 12 V, o que representa um nível '1'. Quando um curto-circuito parcial é aplicado à linha, a tensão cai para níveis abaixo de 6 V, o que representa um nível '0'. Durante os curto-circuitos, a alimentação das estações através da linha é interrompida. As estações de campo passam então a depender da energia armazenada em um capacitor de sustentação, até que a tensão da linha retorne a 12 V. O período dos curto circuitos depende da taxa de transmissão utilizada, que pode variar de 300 a 9600 baud.

Interface da Estação de Campo com a Rede

A Figura 5-33 apresenta a interface entre a estação de campo e a rede de sensores. O regulador de tensão, LM7805, gera as tensões de alimentação para a estação a partir da tensão de 24 V da linha. O capacitor de sustentação, C, armazena carga suficiente para manter o regulador LM7805 funcionando durante os curto-circuitos usados na comunicação digital. O diodo D1 evita que este capacitor descarregue-se, através da linha, durante os curto-circuitos.

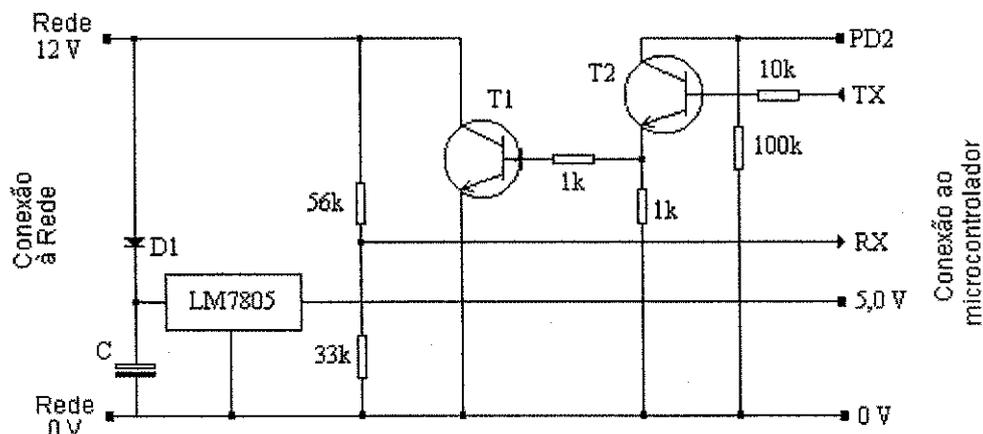


Figura 5-33: Interface entre a rede e a estação de campo

Os dois resistores de 56 k Ω e 33 k Ω formam um divisor que reduz a tensão na linha para 4,5 V. Esta tensão reduzida é passada diretamente à entrada serial RX do microcontrolador. A saída serial

TX, do microcontrolador, controla os dois transistores T1 e T2. Quando a saída TX está em '0' os transistores estão desligados. Quando a saída TX está em '1' os dois transistores conduzem e aplicam um curto circuito na linha. A alimentação do transistor T2 vem do pino PD2 do microcontrolador, que é uma saída digital. Quando a estação é energizada, esta saída está em '0', o que desabilita a parte de transmissão. Durante a inicialização, o microcontrolador coloca a saída PD2 em nível alto, habilitando assim a transmissão. Se não fosse utilizada a saída PD2, quando a estação fosse energizada os dois transistores 'travariam' a linha em curto circuito.

Um aspecto importante do projeto desta estação digital é o dimensionamento do capacitor de sustentação (C na Figura 5-33). Este capacitor deve sustentar o regulador durante os curto-circuitos parciais na linha. Seu valor deve ser tal que o regulador LM7805 sustente a carga e, o microcontrolador não entre em *reset*. A Figura 5-34 representa o comportamento da tensão no capacitor de sustentação durante um rastreamento da estação pelo computador. No ponto A, o computador envia um pedido de dados (uma mensagem de um octeto). Durante a transmissão deste pedido a tensão no capacitor sofre uma queda mas recupera-se após a transmissão (ponto B).

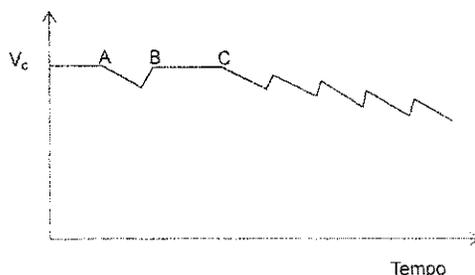


Figura 5-34: Tensão no capacitor durante uma interrogação

No intervalo de tempo entre B e C o microcontrolador faz um rastreamento dos detetores. No ponto C inicia a transmissão dos dados para o computador. Se os octetos da mensagem forem todos '0' e, forem transmitidos de forma consecutiva, ocorre a situação ilustrada na Figura 5-34, na qual a tensão cai continuamente. Para evitar este problema em potencial a estação não transmite os octetos da mensagem de dados de forma consecutiva. Estes, são transmitidos a cada 10 ms, temporizados por um relógio de tempo real. Assim, o tempo de transmissão de uma mensagem contendo 16 octetos de dados é obtido considerando o tempo de transmissão dos caracteres e, a soma dos intervalos de 10 ms entre eles, ou seja a partir da expressão:

$$T = \left(n \times \frac{b}{B} \right) + (n-1) \times t = 0.183 \quad (6.2)$$

na qual:

n = número de octetos

b = bits transmitidos por octeto de dados

B = taxa de transmissão (bits/s)

t = intervalo entre octetos transmitidos

No caso da rede protótipo apresentada, o tempo de transmissão é dado por:

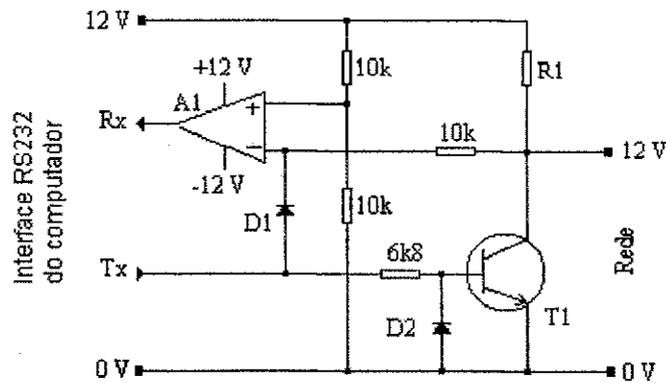


Figura 5-35: Interface entre o computador e a rede de estações de campo

$$T = \left(16 \times \frac{10}{4800} \right) + (16 - 1) \times 0.01 = 0.183s \quad (6.3)$$

À medida que a taxa de transmissão aumenta, o período dos curto-circuitos diminui. Neste caso a queda de tensão no capacitor é menor. Para uma taxa de transmissão de 300 baud, é necessário um capacitor de 2200 μF . Se a taxa de transmissão for restrita à faixa de 1200 a 9600 baud, um capacitor de 1000 μF é adequado.

Interface do Computador Central com a Rede

A interface de linha, usada pelo computador central, acopla uma rede de estações a uma de suas interfaces seriais RS-232. A Figura 5-35 apresenta o circuito desta interface. O sinal TX da interface RS-232 é aplicado à base do transistor T1, com a função de aplicar curto circuitos na linha. O diodo D2 e o resistor de 6,8 k Ω cortam a tensão negativa usada nos sinais RS-232, fazendo com que a tensão aplicada à base de T1 varie de 0 a 12 V. Isso é necessário porque a aplicação de 12 V negativos na base de T1 poderá causar danos.

Quando a tensão na entrada TX está em -12 V (o que representa um '0' para o computador), a tensão na base de T1 fica em torno de -0,6 V. Neste caso, T1 não conduz e a tensão na rede permanece em 12 V. Quando a tensão na entrada TX está em +12 V o transistor T1 conduz, aplicando um curto-circuito na linha. O valor de R1 deve ser suficientemente baixo para que a tensão na linha caia abaixo de 5 V. Por outro lado, o valor de R1 deve ser alto o suficiente para proteger o transistor T1 contra danos causados por corrente excessiva.

O amplificador operacional A1 é usado na recepção de dados. A tensão na rede é aplicada à sua entrada negativa. Quando a tensão na rede está acima de 6 V a saída de A1 está em -12 V, o que representa um '0' para o computador. Desta forma os curto circuitos na linha, gerados pelas estações, são transformados em sinais +12 V e -12 V para a interface RS-232. A função do diodo D1 é desabilitar a recepção durante a transmissão de dados. Se este diodo não estivesse presente, a interface receberia cada octeto transmitido.

Taxa de Transmissão Serial

No início do desenvolvimento, a taxa de comunicação usada em testes foi de 300 baud e o tempo entre caracteres foi de 100 ms. Como discutido na seção anterior, a mensagem de dados leva em torno de dois segundos para ser transmitida. Após a depuração do software da estação e do computador, testes foram realizados para determinar a taxa máxima possível para uma rede com este tipo de estação, 600 m de extensão e utilizando fio 22 AWG.

A cada teste, a taxa de transmissão (baud rate) foi aumentada e o tempo entre caracteres foi diminuído. A expectativa inicial era de que a partir de 1200 baud surgissem erros de transmissão. No entanto, constatou-se que, até 9600 baud, houve zero erros de transmissão. Durante um período de dez dias de testes, o computador 'rastrou' continuamente a estação protótipo, através de 600 m de fio duplo 22 AWG com uma taxa de transmissão de 9600 baud. Mais de quatro milhões de pedidos de dados foram enviados e sessenta milhões de octetos transmitidos pela estação. Nestas condições, o número de mensagens recebidas com erro foi zero.

5.4.2 Protocolo de Comunicação

Um protocolo de rede define o formato das mensagens trocadas e as seqüências permitidas. No caso da rede de estações digitais o protocolo foi especificado com base nos seguintes fatos: 1) o *hardware* disponível não oferece recursos para detecção de erro ou detecção de colisão, e 2) o código da estação deve ocupar apenas os 512 octetos de EEPROM disponíveis na versão do microcontrolador MC68HC11 utilizada no projeto. Inicialmente, o protocolo consistia de seis tipos de mensagem. Este protocolo foi abandonado porque sua implementação foi inviabilizada pela capacidade de memória disponível para implementá-lo. O protocolo que passou a ser adotado consiste de apenas dois pares de mensagens do tipo pedido/resposta. O primeiro par de mensagens trata da escrita em uma das duas saídas cíclicas para o controle de válvulas:

Pedido

Endereço de destino	Endereço de origem	ID da saída	Tempo base da saída	Valor da saída	CRC
---------------------	--------------------	-------------	---------------------	----------------	-----

Resposta

Endereço de destino	Endereço de origem	Estado	CRC
---------------------	--------------------	--------	-----

Os campos de endereço variam de 0 (computador central) a 255. Na mensagem de pedido, o campo 'ID de saída' identifica qual das duas saídas está sendo alterada. O campo 'Tempo base de saída' especifica a duração do ciclo de trabalho, em segundos. O campo 'Duração de saída' especifica o tempo (em segundos) durante o qual a saída deve ficar em '1'. Na mensagem de resposta, o campo 'Estado' indica se a operação foi bem sucedida, ou não.

O segundo par de mensagens trata da leitura do estado dos sensores e detetores:

Pedido

Endereço de destino	Endereço de origem	ID da entrada	CRC
---------------------	--------------------	---------------	-----

Resposta

Endereço de destino	Endereço de origem	Dados	Estado	CRC
---------------------	--------------------	-------	--------	-----

Na mensagem pedido, o campo 'ID da entrada' especifica o sensor ou detetor a ser interrogado, de acordo com a Tabela 5-5. Na mensagem de resposta o campo 'Dados' é um valor de 0 a 255 que representa o estado da entrada, enquanto o campo 'Estado' indica se a operação foi bem sucedida ou não.

Tabela 5-5: Endereços dos dispositivos da estação de campo

ID	Dispositivo de entrada
0	Registrador de estado da estação de campo
8 – 15	Entradas A/D para sensores de expansão
16 – 31	Detetores da rede 1
32 – 63	Detetores da rede 2

Na transmissão de mensagens na rede, haverá algumas mensagens corrompidas por ruído. Para detecta-las, cada mensagem inclui um campo de código CRC²⁴ de 32 bits.

5.4.3 Gerente de Hardware

Na biblioteca de classes FarmWeb, uma das classes de aplicativo contidas no módulo de expansão 'Hardware Experimental', faz o gerenciamento de redes de estações de campo. O papel desta classe é representar os detetores, sensores e atuadores das estações de campo na forma de objetos do tipo 'Dispositivo'. Desta forma, estes recursos tornam-se acessíveis aos aplicativos responsáveis pelo controle dos processos agrícolas. No caso da estação de campo, descrita neste trabalho, os dispositivos envolvidos são ilustrados na Figura 5-36.

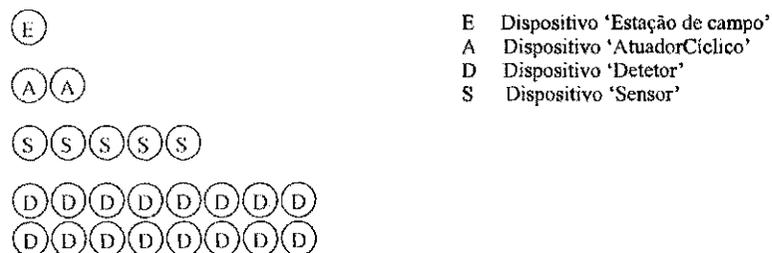


Figura 5-36: Dispositivos relacionados com a estação de campo

O gerente de hardware da rede de estações é configurado através da janela ilustrada na Figura 5-37. Esta janela permite a configuração de uma rede de estações em termos do seu nome, sua porta

serial à qual está conectada, e seu estado de ativação na partida do sistema (Auto iniciar). A janela contém também uma caixa de listagem que relaciona todas as estações de campo presentes na rede.

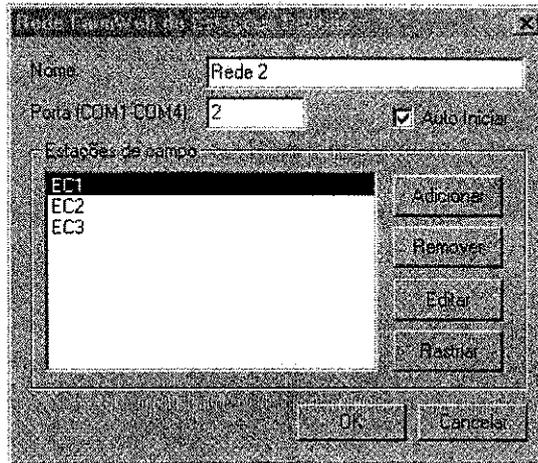


Figura 5-37: Janela de configuração da rede de estações de campo

O usuário pode configurar uma estação da rede através do botão 'Editar'. No caso da estação de campo descrita neste capítulo, o botão 'Editar' invoca a janela de configuração ilustrada na Figura 5-38.

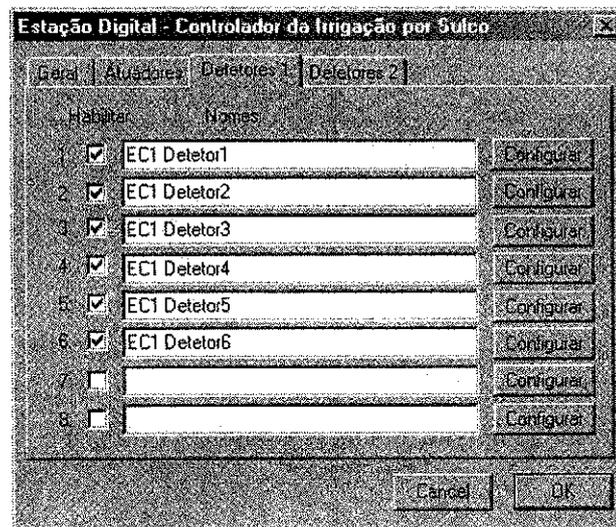


Figura 5-38: Janela de configuração de estação de campo

A configuração da estação de campo é dividida em quatro categorias: geral, atuadores cíclicos, rede primária de detetores e rede secundária de detetores. Cada categoria é associada a uma janela com aba. Note-se que na Figura 5-37 a janela da rede primária está ativa. Esta rede primária é a rede de detetores resistivos simples. Cada uma destas redes pode ter até oito destes detetores. Se o usuário apertar o botão 'Configurar' é apresentada a janela ilustrada na Figura 5-39.

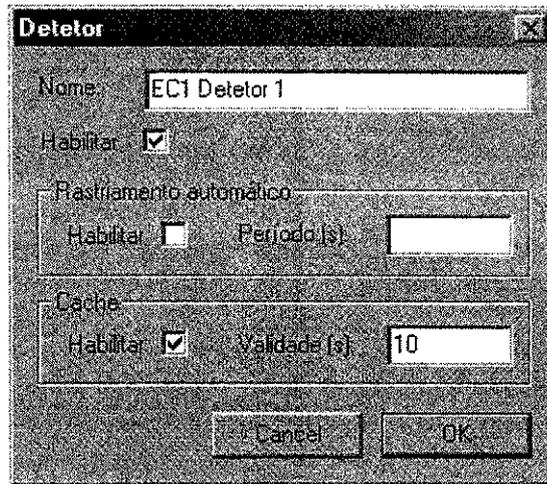


Figura 5-39: Janela de configuração de detetor

Os atuadores e os sensores podem ser configurados da mesma forma.

6 CONCLUSÕES DO TRABALHO

A comunidade agrícola tradicionalmente mostra-se conservadora. A grande maioria dos agricultores só adota uma nova tecnologia uma vez comprovadas suas vantagens a partir de uma análise cuidadosa da relação custo-benefício. Nos países desenvolvidos, o alto custo de equipamento tecnologicamente avançado perde seu impacto face às economias que resultam em termos de mão de obra, que nestes países é de alto custo. Por outro lado, nos países em desenvolvimento, o custo do 'estado da arte' em tecnologia é relativamente alto. Nestes países, justifica-se a busca por soluções alternativas que enfatizem custo e robustez e que usem materiais disponíveis localmente.

Inicialmente, uma parte significativa do trabalho de pesquisa relacionada ao projeto FarmWeb concentrou-se no desenvolvimento de hardware para o controle otimizado da irrigação por sulco, particularmente na rede de sensores e estações de campo que viabilizassem este controle. Mais adiante no trabalho de pesquisa, o foco foi estendido para incluir o desenvolvimento de software que possibilitasse um controle integrado de diferentes contextos da automação agrícola, mantendo no entanto a automação da irrigação por sulco como o contexto do trabalho de pesquisa. Espera-se, que com a continuidade deste trabalho seja possível incorporar novos domínios de automação agrícola assim como integrar novas técnicas de otimização destes processos.

6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Um sistema automatizado para controle de irrigação envolve o uso de sensores, atuadores, estações de campo, computador, uma rede de comunicação de dados e um software de controle dedicado. Além do custo elevado de implantação, deve-se ainda considerar a necessária robustez e dificuldade de manutenção de um sistema de controle automático para uso no campo. Estes fatores encarecem o projeto de automação e o tornam inacessível para o pequeno e médio produtor rural.

Este trabalho de pesquisa concentrou-se na investigação de soluções de hardware e software para suporte ao desenvolvimento de sistemas distribuídos (múltiplos computadores cooperando em grupos de automação) e integrados (múltiplos aplicativos compartilhando os mesmos serviços e estilo de

comando) para aplicação na automação agrícola. Pretendeu-se demonstrar com este trabalho que o conceito de sistemas integrados representa uma solução factível para a otimização da irrigação por sulco e para a automação agrícola em geral. Com o sistema FarmWeb, buscou-se investigar os conceitos, estratégias e objetivos propostos, demonstrando como um sistema integrado reduz o esforço de desenvolvimento necessário para criar um aplicativo de controle. A partir deste sistema, foi também possível verificar a aplicabilidade de sistemas integrados de automação agrícola a partir do desenvolvimento de um conjunto de aplicativos de software e do hardware de suporte para o controle da irrigação por sulco.

Propõe-se, com a continuidade do trabalho de pesquisa, uma mudança na abordagem de desenvolvimento de sistemas de automação agrícola, a partir da adoção do conceito de sistemas semi-abertos. No caso do sistema FarmWeb, a biblioteca de módulos de expansão é proposta como uma maneira em que sistemas podem se tornar mais abertos. Pretende-se com esta biblioteca, possibilitar que pesquisadores tanto na área de Engenharia Agrícola quanto na área de Engenharia Elétrica possam 1) adotar módulos já existentes e adicionar-lhes nova funcionalidade, e 2) criar novos módulos com funcionalidades adicionais ou alternativas.

A otimização da irrigação por sulco apresenta uma série de dificuldades que motivaram esta pesquisa de tese. A primeira destas deve-se ao uso de equipamento de controle nas condições ambientais do campo, onde há problemas de temperatura, umidade, poeira, ruído eletromagnético, danos por máquinas agrícolas e ataque por animais. Para tanto, ao longo do trabalho, decisões foram tomadas com base no conhecimento das restrições impostas por estas condições.

Outra dificuldade na otimização da irrigação por sulco resulta da alteração temporal e espacial das características de infiltração de água no solo. De uma sessão de irrigação para outra, e de um campo irrigado para outro, as características de infiltração podem variar de forma significativa. Esta variação torna mais complexa a determinação da infiltração e, portanto, a otimização de uma sessão de irrigação. A superação deste problema requer o uso de novas técnicas de sensoriamento para acompanhar uma irrigação. Para tanto foram desenvolvidas redes de sensores e estações de campo, de baixo custo e de simples instalação no campo .

Uma terceira dificuldade consiste na falta de integração entre sistemas de controle. Na automação agrícola centralizada atual, cada processo é controlado por um pacote proprietário de software e hardware, o que dificulta ou mesmo impossibilita a interação entre eles. Esta configuração dificulta a gestão integrada de diferentes processos em uma empresa agrícola, particularmente em situações onde estejam envolvidos diferentes contextos de controle da produção. Este problema agrava-se à medida que o número destes sistemas individuais aumenta em cada instalação agrícola, aumentando a necessidade de uma integração entre eles. Nesta pesquisa de tese, foram investigados métodos de integração entre sistemas de controle para aplicação no ambiente agrícola.

A duração da irrigação é o fator que mais influencia a eficiência da irrigação, determinando o nível de absorção de água pelas raízes. Isto pode ser observado a partir de medições tais como: umidade do solo e nível de infiltração da água no solo, de modo a reduzir as perdas do processo. Em

sistemas automatizados a duração de aplicação da água e a quantidade de água aplicada são controladas por um programa de escalonamento baseado em vários tipos de dispositivos tais como temporizadores ou de sensores de presença da água e sensores de umidade. Neste trabalho o escalonamento do sistema de controle apoiou-se em informações adquiridas, através de redes de sensores por meio de telemetria. Um outro aspecto explorado, nesta pesquisa de tese, foi a comunicação entre os sensores no campo e a estrutura de controle

Um outro problema associado ao uso de sensores na irrigação por sulco, é a inter-relação entre a entrada de água, comprimento do sulco, taxa de infiltração do solo e a localização dos sensores no sulco. A análise destes aspectos foi viabilizada a partir do uso de simulação como estratégia de otimização do controle da irrigação.

O sistema FarmWeb provê um ambiente de pesquisa para testar e explorar alternativas de automação agrícola que suportam a implementação de múltiplas tecnologias, permitindo aos projetistas concentrar-se no projeto de subsistemas específicos. As ferramentas disponíveis no módulo de controle da irrigação por sulco possibilitam análises do tipo 'what-if', dando ao usuário uma visão mais completa do comportamento da irrigação. Este recurso permite que o sistema Farmweb seja utilizado como ferramenta de pesquisa e ferramenta didática.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

O propósito do sistema FarmWeb é servir de suporte para pesquisa em aplicações de controle na área de automação agrícola. Portanto, este trabalho de tese representa o início de um trabalho de pesquisa no qual pretende-se aprofundar os temas discutidos a seguir.

Desenvolvimento de Módulos Adicionais

No sistema FarmWeb, além do módulo de irrigação, foram desenvolvidos outros quatro módulos com aplicativos de controle para aviários, pocilgas, casas de vegetação e silos. Estes módulos ainda encontram-se com o conjunto básico de funcionalidades, uma vez que o propósito de seu desenvolvimento foi possibilitar a realização de testes de integração. Uma proposta de trabalhos futuros consiste na extensão da funcionalidade destes módulos e incorporação de simulação como estratégia de otimização destes processos.

Extensão dos Serviços

Os serviços oferecidos pelo sistema FarmWeb foram desenvolvidos tendo como objetivo apoiar a aplicação de controle da irrigação. Na medida que os aplicativos existentes e novos aplicativos de controle forem desenvolvidos surgirá a necessidade de estender os serviços existentes incluindo novos serviços gráficos e serviços para análise numérica.

Refinamento e Expansão da Interface com o Usuário

A interface com o usuário é um serviço FarmWeb em evolução contínua para acomodar a evolução do sistema como um todo. Assim, o conjunto de símbolos gráficos que representa os recursos do ambiente agrícola envolvidos no processo de automação, pode ser expandido para incluir novos recursos relativos aos módulos já desenvolvidos e aos módulos que poderão vir a ser integrados. Exemplos desta expansão de símbolos seria a inclusão da representação de recursos tais como forrageiras, cata-ventos, cercas elétricas, etc. Por outro lado, os mecanismos disponíveis para a interação poderiam ser refinados tais como a manipulação de símbolos gráficos, de modo a possibilitar a seleção e manipulação de grupos de símbolos.

Expansão do Hardware

Na automação da irrigação, os sensores de umidade do solo são usados para determinar a necessidade de irrigação. Devido à variação das características do solo, torna-se difícil uma calibração para estes sensores que seja adequada para um tipo específico de solo. Uma solução que propõe-se investigar é o desenvolvimento de um sensor do tipo 'fuzzy', o qual seria integrado à rede endereçável de sensores proposta neste trabalho.

Segurança no Acesso

Na versão atual de FarmWeb, o controle de acesso é baseado em listas de endereços dos clientes autorizados. Estas listas contêm os endereços IP dos computadores autorizados a ter acesso aos recursos da rede de automação distribuída através do Serviço de Nomes. Porém, esta proteção é insuficiente em situações nas quais ocorre o acesso físico à rede local de computadores, a partir de um nó autorizado de um grupo de automação, assumindo sua identidade quando o computador autorizado estiver desligado.

Uma possível solução para este problema seria a codificação das mensagens trocadas entre nós. Esta codificação poderia ser baseada no uso de chaves públicas/privadas [Sinha 1997]. Nesta solução, cada entrada numa listas de nós autorizados teria uma chave privada, que seria usada para decodificar mensagens vinda daquele nó. Sem o conhecimento destas chaves, não seria possível o acesso a um grupo de automação, impedindo assim o acesso não autorizado.

Escalonamento da Irrigação

O aplicativo Gerente de Irrigação no seu estado atual de desenvolvimento fornece estratégias de escalonamento baseadas em intervalos de tempo, em tempos predeterminados, ou através do sensoreamento das condições de campo. Uma estratégia alternativa é o escalonamento baseado no acesso a dados meteorológicos e na simulação da relação água/solo/planta. Esta estratégia já foi adotada no sistema AISSUM [Singh 1995], na forma de uma ferramenta de apoio a decisão. No entanto, seria interessante a adoção desta estratégia como parte integrante do controle do processo, em

um sistema integrado. O sistema integrado possibilitaria introduzir informações sobre condições climáticas no escalonamento acessadas via rede de computadores e simular a relação água/solo/planta.

Incorporar novos modelos matemáticos

À medida que os Engenheiros Agrícolas aprimoram seu entendimento do comportamento hidrodinâmico da irrigação por sulco, surgem novos modelos matemáticos para sua simulação. No sistema FarmWeb o mecanismo de 'objetos Componentes' permite que modelos matemáticos alternativos sejam adotados pelo aplicativo de controle da irrigação por sulco. Um trabalho futuro consistiria na implementação módulos de expansão contendo objetos Componentes correspondentes a estes modelos.

6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em suma, com os resultados desta pesquisa de tese espera-se que se tenha contribuído para a viabilização do conceito de automação agrícola integrada e, mais especificamente, para o controle automático da irrigação por sulco. As razões que suportam esta expectativa são, a adoção de conceitos tais como automação integrada, hardware para sensoriamento remoto, e a disponibilidade de uma plataforma de suporte ao desenvolvimento de aplicações integradas de controle no contexto agrícola.

Referências Bibliográficas

- [Amer 1994] Amer, S.A., Keefer, T.O., Weltz, M.A., Goodrich D.C. e Bach L.B., 'Soil moisture Sensors for Continuous Monitoring', *Water Resources Buletin of the American Water Resources Association*, Vol. 30, No.1, pp. 69-83, 1994.
- [Andrade 1998] Andrade, D.V., Botrel T.A., Paz V.P. e Frizzone J.A., 'Modelo matemático para simulação da fase de avanço na irrigação por sulcos', *XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, Volume II, Poços de Caldas, 1998.
- [Azevedo 1992] Azevedo C.A.V., *Real-time solution of the inverse furrow advance problem*, Tese de doutorado em Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University, 1992.
- [Bautista 1993a] Bautista, E. e Wallender, W.W., 'Identification of furrow intake parameters from advance times and rates', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 295-311, 1993.
- [Bautista 1993b] Bautista, E. e Wallender, W.W., 'Reliability of optimized furrow-infiltration parameters', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 119, No. 5, pp. 784-801, 1993.
- [Benami 1984] Benami, A. e Ofen, A., *Irrigation Engineering*, Irrigation Engineering Scientific Publications, ISBN 965-222-029-9, 1984.
- [Blair 1986] Blair, A.W, 'Economics of computerized surface irrigation with real-time optimization of efficiency', Austin, Texas, 1986.
- [Boas 1998] Vilas Boas, M.A. e Scaloppi, E.J. (1998). Programa computacional para simulação da irrigação por superfície. *XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, Vol. II, Poços de Caldas, MG, 1998.
- [Brassard 1991] Brassard, M., *Qualidade – Ferramentas para uma melhoria contínua*, Qualitymark Editora Limitada, 1995.

- [Carvalho 1999] Carvalho, J.J., 'Efeito da variação da velocidade de infiltração básica na estimativa da infiltração acumulada num solo franco-arenoso', *XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, Poços de Caldas, 1998.
- [Casavant 1994] Casavant, T.L. e Singhal, M., 'Introdução', *Readings in Distributed Computing Systems*, ISBN 0-8186-3032-9, pp. 1-5, 1994.
- [Childs 1993] Childs, J.L., Wallender W.W. e Hopmans J.W., 'Spatial and seasonal variation of furrow infiltration', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 119, No. 1, pp. 74-90, 1993.
- [Comer 1988] Comer, D.E., *Internetworking with TCP/IP*, Prentice Hall, ISBN 0-13-470154-2, 1988.
- [Crabfield 1999] 'Precision Farming Introduction', Center for Precision Farming, Cranfield University, Inglaterra, <http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/cpf/papers/introduc.htm>, abril 1999.
- [Deho 1991] Deho, A., 'Controladores programáveis, tecnologia eletrônica que comanda à distância o manejo da irrigação localizada', *Irrigação e Tecnologia Moderna*, março 1991.
- [Dewhurst 1989] Dewhurst, S.C. e Stark, K.T., *Programming in C++*, Prentice-Hall, ISBN 0-13-723156-3, 1989.
- [Doneen 1984] Doneen, L.D. e Westcot, D.W., (1984). 'Irrigation practice and water management', *FAO Irrigation and Drainage Paper*, Roma, 1984.
- [Douglas 1998] Douglas B.P., 'Real-time UML – Developing Efficient Objects for Embedded Systems', Addison Wesley Longman, ISBN 0-201-32579-9, 1998.
- [Duke 1992] Duke, H.R., Stetson L.E. e Ciancaglini N.C., 'Irrigation System Controls', *Management of Farm Irrigation Systems*, ISBN 0-929355-11-3, pp. 265-314, 1992.
- [Embrapa 1999] Página WWW da Embrapa Semi-árido, <http://www.cpatsa.embrapa.br>, 1999.
- [Faria 1998] Faria, M.A., Monitoramento para manejo da irrigação: instrumentação, automação e métodos, *XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, Vol.2, Poços de Caldas, 1998.
- [Faye 1998] Faye, R.M, Mora-Camino F., Sawadogo. S. Niang A., 'An intelligent decision support system for irrigation system management', *Anais do IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 3908-3913, San Diego, outubro 1998.
- [Filho 1998] Filho, A.F.L. e Souza, F., 'Variabilidade temporal da infiltração em solos irrigados por sulcos abertos e em declive', *Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, Vol. II, Poços de Caldas, 1998.
- [Fischback 1970] Fischbach P.E., Thompson T.L. e Stetson L.E., Electric Controls for Automatic Surface Irrigation Systems with Reuse System, *Transactions of the ASAE*, pp. 286-288, 1970.

- [Framji 1986] Framji, K.K., *Automated farm surface irrigation systems worldwide*, United India Press, New Delhi, ISBN 81-85068-13-5, 1986.
- [Fox 1994] Fox, F.A. e Slack D.C., 'Irrigation scheduling decision support', *5th International Conference on Computers in Agriculture*, pp. 676-681, Orlando, USA, 1994.
- [Gelb 1994] Gelb, E., Friedman C., Kenig. E. e Oron, G., 'Computer controlled irrigation systems: potential benefits', *Irrigation News*, No. 23, Summer, Israel, 1994
- [Georgia 1999] 'Precision Agriculture', College of Agricultural & Environmental Sciences, The University of Georgia, http://nespal.cpes.peachnet.edu/research/precision_agriculture/, abril 1999.
- [Gil 1999] Página WWW de descrição técnica da estação de campo Geo 255, Gil Fabricação e Projetos Especiais, <http://www.gil.com.br>, 1999.
- [Gomide 1998] Gomide, R.L., 'Monitoramento para manejo da irrigação: instrumentação, automação e métodos', *Manejo da Irrigação*, XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Poços de Caldas, 1998.
- [Gonçalves 1998] Gonçalves, J.M. et al, 'Environmental Criteria in a Decision Support System for Surface Irrigation Design', *Water and the Environment: Inovative Issues in Irrigation and Drainage*, ISBN 0419237100, 1998.
- [Gotfreid 1973] Gotfreid, B.S. e Weisman.J., *Introduction to Optimization Theory*, International series in industrial and systems engineering, Prentice Hall, 1973.
- [Henry 1991] Henry, Z.A. et al, *Instrumentation and Measurement for Environmental Sciences*, publicação da ASAE, ISBN 0-929355-16-4, 1991.
- [Hoffman 1990] Hoffman, G.J., Howell, T.A. e Solomon, K.H., *Management of farm irrigation systems*, ASAE Monograph Number 9, ASAE, ISBN 0-929355-11-3, 1990.
- [Hooper 1984] Hooper, A.W., *Computer control of the environment in the NIAE research greenhouses*, Nota interna, National Institute of Agricultural Engineering, Inglaterra, 1984.
- [Humpherys 1985] Humphreys A.S., Wilson M.D. e Trout T.J., 'Electronic clocks for timing irrigation advance', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 111, No. 1, pp. 94-98, 1985.
- [Humpherys 1986] Humpherys, A..S., *Automated farm surface irrigation systems worldwide*, International Commission on Irrigation and Drainage, ISBN 81-85068-13-5, 1986.
- [Izadi 1998] Izadi, B., Heerman D.F. e Duke H.R., 'Sensor placement for real-time infiltration parameter evaluation', *Transactions of the ASAE*, Vol.31, pp. 1159-1166, 1988,.
- [Jalote 1994] Jalote, P., *Fault Tolerance in Distributed Systems*, Prentice Hall, ISBN 0-13-301367-7, 1994.
- [Javis 1997] Javis, N. G. et al, 'MACRO-DB: A decision-support tool for assessing pesticide fate and mobility in soils', *Environmental Modeling and Software*, Vol. 12, pp. 251-265, 1997.

- [Kristensen 1980] Kristensen T. e Kristensen, E.S., 'Analysis and simulation modeling of the production in Danish organic and conventional dairy herds', *Livestock Production Science*, pp. 55-65, 1998.
- [Latimer 1990] Latimer, E.A. e Redell, D.L., 'Components for an advance rate feedback irrigation system (ARFIS)', *Transactions. of the ASAE*, Vol. 33, No. 4, 1990.
- [Lillevik 1979] Lillevik, S.L., e Christie, B.P., 'Microcomputer – controlled furrow irrigation', publicação do IEEE, Catalog number CH1474, pp. 43-45, junho 1979.
- [Lima 1997] Lima, F.M.C., *Caracterização de um sensor para determinação de água disponível nos solos*, dissertação de mestrado, DEE UFPB, setembro 1997.
- [Lowry 1978] Lowry, W. et al, *Radio frequency interference*, Livro publicado pelo 'The American Radio League', 1978.
- [Mackevich 1997] Mackevich J. e Simmons S., 'Polymer outdoor insulating materials, part II – material considerations', *IEEE Electrical Insulation Magazine*, julho/agosto, Vol. 13, No. 4, pp. 10-16, 1997.
- [Malicki 1989] Malicki, M.A. e Hanks, R.J., 'Interfacial contributions to two-electrode soil moisture sensor readings', *Irrigation Science*, Springer-Verlag, pp. 41-54, 1989.
- [Martin 1992] Martin, D.L., Stegman, E.C., Fereres, E., *Irrigation scheduling principles, in management of farm irrigation systems*, ASAE Monograph Number 9, 1992.
- [Martin 1994] Martin, B.E. et al, 'An object-based taxonomy for distributed computing systems', *Readings in Distributed Computing Systems*, IEEE Computer Society Press, ISBN 0-8186-3032-9, pp. 152-169, 1994.
- [Mathews 1992] Mathews, J.H. *Numerical Methods for Mathematics, Science and Engineering*, Prentice-Hall, ISBN 0-13-624990-6, 1992.
- [Myers 1970] Myers, R.G. e Edwards, D.M., 'Moisture sensor placement for regulation of furrow irrigation systems', *Transactions of the ASAE*, pp. 302-306, 1970.
- [Naas 1996] Naas, I.A. et al, 'Swine ventilation design based on heat production simulation', *6th International Conference on Computers in Agriculture*, pp. 1052-1057, Cancun, Mexico, 1996.
- [Neto 1997] Torre-Neto, A., Cruvinel P.E., Inamasu R.Y. e Crestana S., 'Tecnologias de ponta na agricultura: instrumentação e automação para a agricultura de precisão', *Tecnologia e Aplicações Racional de Energia Elétrica e de Fontes Renováveis na Agricultura*, XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Campina Grande, julho 1997.
- [Or 1996] Or, D. e Walker, W.R., 'Effects of spatially variable intake on surface irrigation advance', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 122, pp. 122-130, 1996.
- [Paoli 1995] Paoli, M.A., 'Polímeros: degradação e estabilização', *Apostilha de curso do Instituto de Química*, UNICAMP, 1995.

- [Petzold 1990] Petzold, C., *Programming Windows – the Microsoft guide to writing applications for Windows 3*, Microsoft Press, ISBN 1-55615-264-7, 1990.
- [Redell 1986] Redell, D.L. e Latimer, E.A., 'Advance rate feedback irrigation system (ARFIS)', *ASAE Meeting Paper* No. 86-2578, 1986.
- [Roermund 1996] Roermund, H.G.W., 'Biological control of greenhouse white fly with the parasitoid *Encarsia formosa* on tomatoe: an individual-based simulation approach', *Biological Control*, pp. 25-47, 1997.
- [Schildt 1996] Schildt, H., *Programando em C e C++ com Windows 95*, Makron Books, ISBN 85-346-0479-7, 1996.
- [Simon 1996] Simon, E., *Distributed Information Systems*, McGraw-Hill, ISBN 0-07-709076-4, 1996.
- [Singh 1995] Singh, B., Boivin J., Kiripatrick G e Hum B. 'Automatic irrigation scheduling system (AISSUM): principles and applications', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 121, No. 1, pp. 43-56, 1995.
- [Sinha 1997] Sinha, P.K., *Distributed Operating Systems*, IEEE Computer Society Press, ISBN 0-7803-1119-1, 1997.
- [Smith 1984] Smith, D.L. e Duke, H.R., 'Prediction of irrigation advance rates in real-time', 1984 winter meeting of the American Society of Agricultural Engineers, dezembro 1984.
- [Standler 1989] Standler, R.B., *Protection of Electronic Circuits from Overvoltages*, Wiley-Interscience Publications, ISBN 0-471-61121-2, 1989.
- [Stankovic 1994] Stankovic, J.A., 'Distributed Computing', *Readings in Distributed Computing Systems*, ISBN 0-8186-3032-9, pp. 6–30, 1994.
- [Turnell 1997a] Turnell, D.J., Deep, G.S., e Freire, R.C.S., 'A low-cost water detection method for irrigation control', *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 46, No. 4, pp. 986-990, 1997.
- [Turnell 1997b] Turnell, D.J., Deep, G.S., e Freire, R.C.S., 'RIOS – A real-time irrigation optimization system', *Anais do XI Congresso Brasileiro de Automática*, Vol. 3, pp. 1751-1756, São Paulo, 1997.
- [Turnell 1997c] Turnell, D.J., Deep, G.S., e Freire, R.C.S., 'A network of microcontroller-based field stations for irrigation control', *XII Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica*, Temuco, Chile, 1997.
- [Turnell 1998] Turnell, D.J., Turnell, M.F.Q.V., Deep, G.S., e Freire, R.C.S., 'FarmWeb – an integrated, modular farm automation system', *IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 1184-1190, San Diego, outubro 1998.
- [Turner 1985] Turner, M.J.B., 'Intensive livestock feeding and weighing', *International Symposium on Farm Electronics and Computing*, Stratford-upon-Avon, Reino Unido, outubro 1985.

- [Varlev 1998] Varlev, I., Popova, e Z., Gospodinov, I., 'Furrow Surge Irrigation as a Water Saving Technique', *Water and the Environment: Innovative Issues in Irrigation and Drainage*, ISBN 0419237100, 1998.
- [Walker 1989] Walker, W.R., *Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems*, FAO Irrigation and Drainage Paper, ISBN 92-5-102879-6, Roma, 1989.
- [Walker 1987] Walker, W.R. e Skogerboe, G.V., *Surface irrigation theory and practice*, Prentice-Hall, ISBN 0-13-877929-5, 1987.
- [Walker 1990] Walker, W.R. e Busman, J.D., 'Real-time estimation of furrow infiltration', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol.116, No. 3, pp. 299-317, 1990.
- [Wardle 1993] Wardle, G.P., 'An introduction to the automation of pressurized irrigation systems', artigo apresentado no *Reunião da UKIA/ICID* do Institute of Civil Engineers, Londres, outubro 1993.
- [Yao 1995] Yao, P. e Yao, J., *Foundations of Visual C++ programming for Windows 95*, IDG Books worldwide Inc, ISBN 1-56884-321-6, 1995.

Apêndice A - MODELO MATEMÁTICO DA IRRIGAÇÃO POR SULCO

Neste apêndice descreve-se os fundamentos matemáticos empregados na otimização da irrigação por sulco. Estes fundamentos foram obtidos da bibliografia na área de Engenharia Agrícola. Inicialmente é descrito o modelo Onda Cinemática, adotado para descrever o comportamento da água ao longo de um sulco durante a irrigação. Em seguida é descrita uma técnica que foi adotada em uma das estratégias de controle para identificar os coeficientes de infiltração da água no solo, a partir de dados obtidos dos detetores instalados nos sulcos.

A.1 MODELO ONDA-CINEMÁTICA

A otimização da irrigação por sulco depende do uso de um modelo matemático que descreva o deslocamento de água, e sua infiltração no solo, durante uma sessão de irrigação. De acordo com [Boas 1998] as quatro classes de modelos de deslocamento de água, em ordem decrescente de complexidade, são modelos Hidrodinâmicos, Zero Inércia, Onda Cinemática, e Balanço Volumétrico. No modelo Onda-Cinemática o volume de água no sulco, em um dado instante da fase de avanço, é calculado a partir da relação entre o volume de água contido na superfície e o volume de água infiltrado no solo, conforme ilustra a Figura A-1:

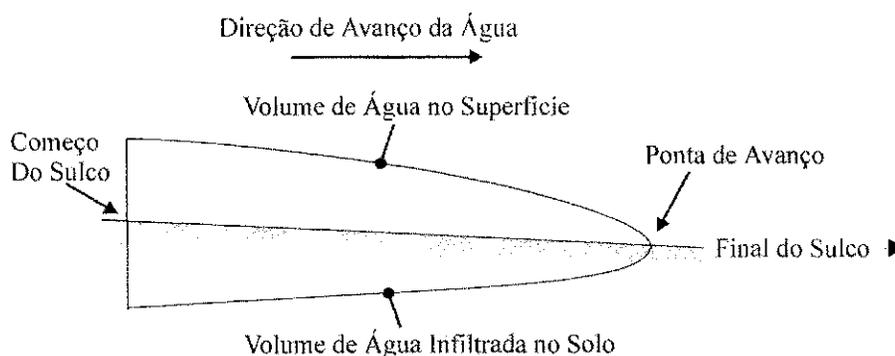


Figura A-1: Volume de água no sulco em um dado instante do avanço

No modelo, à medida que a água avança, a cada intervalo T criam-se células ao longo do sulco. Estas células estão demarcadas na Figura A-2 por linhas verticais pontilhadas. O comprimento de cada célula (δx_1 , δx_2 , δx_3 e δx_4) representa a distância que a água avançou em um intervalo de tempo naquele ponto do sulco.

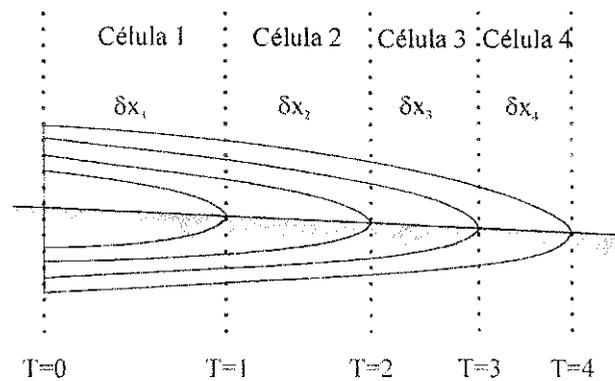


Figura A-2: Volume de água superficial e infiltrada em quatro intervalos de tempo

Uma vez formada uma célula seu comprimento no sulco não altera-se ao longo da análise. Em um dado momento do avanço, há três tipos de célula:

- *A célula da ponta*, que forma-se na frente do avanço a cada intervalo de tempo (célula 4 da Figura A-2).
- *A célula de transição*, que resulta da transformação de uma célula da ponta em uma célula retangular (célula 3 da Figura A-2).
- *Células retangulares*, que representam todas as outras células (células 1 e 2 da Figura A-2).

Estes três tipos de célula são representados individualmente na Figura A-3.

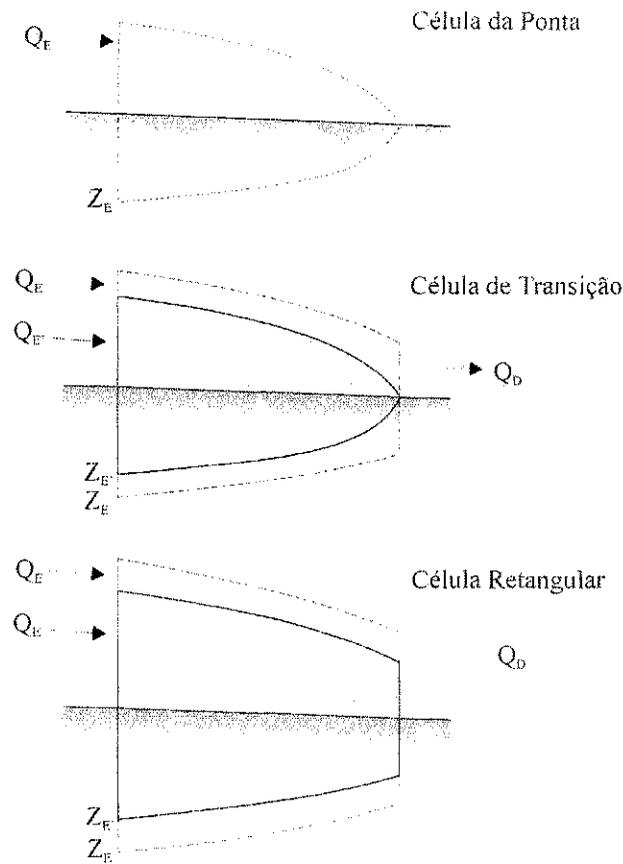


Figura A-3: Os três tipos de célula deformável

Na Figura A-3, Q é o fluxo de água e Z é a infiltração. Os subscritos E e D denotam o lado da célula em questão (esquerda/direita), enquanto que a utilização, ou não, do apóstrofo no subscrito denota se trata-se do início ou do final do intervalo de tempo, respectivamente. Por exemplo, na parte inferior da Figura A-3, a infiltração do lado esquerdo da célula aumentou de $Z_{E'}$ para Z_E durante o intervalo de tempo em questão. Assim, considerando todo o conjunto de células, obtém-se uma matriz computacional no plano tempo/distância, conforme ilustra a Figura A-4:

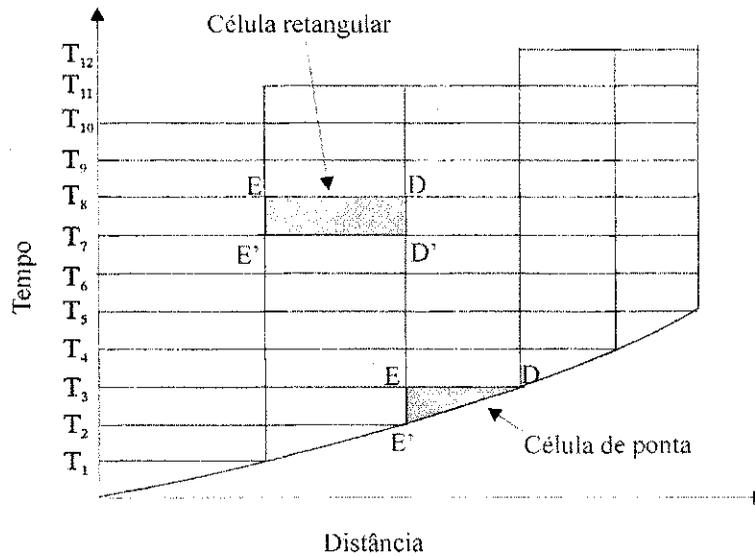


Figura A-4: Matriz de soluções t-x euleriano para o modelo onda cinemática

$$\begin{aligned}
C_2 = & -A_E^{m+1} - \frac{1-\mathcal{G}}{\mathcal{G}} A_{E'}^{m+1} + \frac{1-\mathcal{G}}{\mathcal{G}} A_{D'}^{m+1} \\
& + \frac{\phi}{\theta\alpha} (A_E + Z_E - A_{E'} - Z_{E'}) \frac{\delta x_{k-1}}{\delta t} \\
& + \frac{1-\phi}{\theta\alpha} (Z_D - A_{D'} - Z_{D'}) \frac{\delta x_{k-1}}{\delta t}
\end{aligned} \tag{A.7}$$

A Equação A.5 é solucionada para cada célula, a cada passo de tempo, usando o procedimento Newton-Raphson de solução de equações não lineares [Mathews 1992]. Para tornar o cálculo das equações A.6 e A.7 mais eficiente, estas podem ser representadas da seguinte forma:

$$C_1 = C_3 dx_{k-1} \tag{A.8}$$

e

$$\begin{aligned}
C_2 = & -A_E^{m+1} - C_4 A_{E'}^{m+1} + C_4 A_{D'}^{m+1} \\
& + C_5 (A_E + Z_E - A_{E'} - Z_{E'}) dx_{k-1} \\
& + C_3 (Z_{D'} - A_{D'} - Z_{D'}) dx_{k-1}
\end{aligned} \tag{A.9}$$

em que: $C_3 = \frac{1-\Phi}{\alpha\mathcal{G} dt} \tag{A.10}$

$$C_4 = \frac{1-\mathcal{G}}{\mathcal{G}} \tag{A.11}$$

$$C_5 = \frac{\phi}{\theta\alpha dt} \tag{A.12}$$

Os valores de C_1 , C_2 e C_3 são mantidos constantes durante a execução do modelo, e podem ser calculados como parte do procedimento de inicialização do modelo. Para a célula da ponta, os parâmetros A_E , A_D , $A_{D'}$, Q_E , Q_D e $Q_{D'}$ são considerados nulos, levando a uma simplificação da equação A.5, que passa a ser representada por:

$$\mathcal{Q}_L dt - \phi A_L dx_N - \phi Z dx_N = 0. \tag{A.13}$$

Uma vez que A_E é obtido a partir da solução da célula anterior, e Z_E é função apenas do tempo de oportunidade, obtém-se:

$$dx_n = \frac{\theta\alpha A_L^{m+1} \delta t}{\phi A_L + \phi Z_L} \tag{A.14}$$

A equação A.14 é também utilizada no primeiro passo de tempo para calcular o avanço inicial δx_1 . Neste caso, \mathcal{G} deve ser interpretado como um fator de compensação pelo não estabelecimento imediato da entrada de água [Walker 1987].

A.2 SOLUÇÃO DO PROBLEMA INVERSO DO AVANÇO

A 'solução do problema inverso do avanço de água no sulco' [Azevedo 1992, Bautista 1993a] é uma técnica utilizada para a identificação dos coeficientes Kostiaikov de infiltração k , a e $f\theta$ (Eq. 2,1)

a partir de dados de avanço obtidos do campo. Na Figura A.5 os dados de avanço obtidos do campo são representados pelos pontos p_1, p_2 e p_3 . A linha A-A' é uma curva de avanço gerada pelo modelo Onda Cinemática usando valores k_n, a_n e f_{0n} para os coeficientes Kostiakov. A soma dos erros e_1, e_2 e e_3 representa o erro de 'ajuste da curva' com os dados de avanço.

Usando o método Nelder-Mead de minimização [Mathews 1992], os coeficientes de infiltração têm seus valores ajustados para reduzir o erro de encaixe. A cada novo ajuste, o modelo Onda Cinemática volta a ser executado para gerar uma nova curva de avanço A-A'. Os coeficientes de infiltração do campo são identificados quando o erro de ajuste da curva é minimizado.

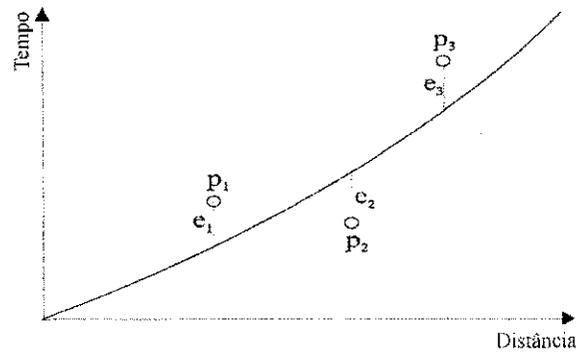


Figura A-5: Cálculo do erro de encaixe dos dados de avanço