

JONATHAN BEHRENS

**AUTOMAÇÃO DA IRRIGAÇÃO DE LAVOURAS DE ARROZ PARA
MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do grau de Engenheiro
Eletricista.

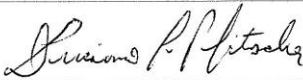
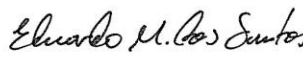

Orientador: Luciano Lopes Pfitscher

**ALEGRETE
2013**

Autoria: Jonathan Behrens

Título: Automação da irrigação de lavouras de arroz para melhoria da eficiência energética

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa.

Os componentes da banca de avaliação, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado.				
	Nome	Titulação	Assinatura	Instituição
1	Luciano Lopes Pfitscher	Me.		Unipampa
2	Eduardo Machado dos Santos	Me.		Unipampa
3	Jumar Luís Russi	Dr.		Unipampa

Data da aprovação: 05 de março de 2013.

*Este trabalho é dedicado às duas
pessoas que são o motivo da minha existência
e motivação. Minha amada mãe, Dionice.
Tenho certeza que estás olhando por nós ai de
cima. Meu filho, minha obra-prima, Pietro,
que me deu a força que precisava para chegar
onde estou agora.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha companheira, minha amiga, minha confidente e minha amada, Diulem, por estar do meu lado durante todas as etapas de minha vida nestes últimos 8 anos, compartilhando momentos bons e ruins, sem nunca desanimar.

Agradeço ao meu pai, José Caetano, e minhas irmãs, Aline e Alice, pelo apoio incondicional desde o dia em que aceitei o desafio de tentar ser um engenheiro.

Agradeço a família especial que ganhei de presente em Alegrete. Obrigado, Tia Ema, Tio Milton e Vó Maria pela acolhida, pelo carinho, pelas palavras.

Agradeço aos meus sogros, Henrique e Jane, pela força, principalmente na chegada do Pietro. Seu suporte foi fundamental para que eu continuasse focado na graduação.

Agradeço a todos os colegas de curso, em especial ao Duni e ao Dion, pela recepção, parceria nos momentos difíceis e nas empreitadas para estudar para provas e concluir trabalhos na última hora.

Agradeço a toda equipe de professores e técnicos da Universidade Federal do Pampa pelo suporte fornecido na minha formação.

Agradeço aos profissionais que ajudaram a compor as ideias expostas neste trabalho, através de entrevistas e conversas informais.

Agradeço a equipe da Eletroeste, pelo apoio e pela compreensão nesta reta final do curso.

Enfim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, me ajudaram no desenvolvimento do trabalho e no transcorrer do curso.

“O que dá o verdadeiro sentido ao encontro é a busca, e é preciso andar muito para se alcançar o que está perto.”

José Saramago

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de propor melhorias ao processo de automação da irrigação de lavouras de arroz. Busca-se, com a automação do sistema de irrigação, melhorar a eficiência energética deste tipo de carga, reduzindo o custo da produção e desonerando as redes de distribuição. As propostas de melhoria foram desenvolvidas com base em um sistema de automação que considera o monitoramento da água através de sensores ultrassônicos sem fio, controle das bombas de irrigação por meio de inversores de frequência e interface com o usuário através de um sistema de supervisão. A integração de todos os componentes do sistema é feita por um controlador lógico programável, que também tem a função de executar todos os fluxos de controle da aplicação. Inicialmente, é proposta uma metodologia para estimar a quantidade mínima de sensores e os melhores pontos para alocação na lavoura. Esta estimativa é feita com base nas características topográficas e de projeto da lavoura. Uma metodologia que considera a utilização de informações climáticas na aplicação também será apresentada. A principal informação usada pelo sistema são os dados pluviométricos. A chuva, quando considerada como parte do sistema, pode proporcionar a redução do consumo de energia, além de elevar o nível dos reservatórios. Informações climáticas também são utilizadas no controle e compensação das perdas hídricas da plantação. Para finalizar o trabalho é realizado um levantamento da aplicabilidade do projeto em âmbito estadual e feita uma análise econômica, com base nos custos dos equipamentos necessários para a aplicação e na economia de energia proporcionada pela automação. Dados de uma medição real e informações de custos médios são utilizados para verificar a aplicabilidade do sistema.

Palavras-chave: automação, eficiência energética, sensores ultrassônicos, dados climáticos, análise econômica, lavouras de arroz.

ABSTRACT

In this work, some improvements to the process of automation of irrigation in rice crops are proposed. The main objective of the automation is to improve the energy efficiency of this type of load, reducing the cost of production and its impact on the distribution networks. The proposed improvements were developed based on an automation system that considers water monitoring through wireless ultrasonic sensors, control of irrigation pumps by frequency inverters and a user interface through supervisory system. The integration of all devices is made by a programmable controller, which also has the function of performing all control flows of the application. Based on topographic features and on the design of the crop, it is proposed a methodology to estimate the minimum number of sensors and the best points for allocation in the farming. A methodology that considers the use of climate information in the application is also presented. The rain, when considered as part of the system may provide reduction of consumption of energy, in addition to raise the level of reservoirs. Weather information is also used in control and compensation of water loss from farming. Finally, it is performed a survey of the economic feasibility of the application, based on equipment costs and energy saving provided by automation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Distribuição da produção média nacional de arroz nos anos de 2004 a 2006	12
Figura 1.2 - Distribuição das parcelas em protótipo do sistema de irrigação.....	18
Figura 3.1 - Diagrama esquemático da aplicação.....	28
Figura 3.2 - Kit com sensores ultrassônicos, transmissor e bateria.....	30
Figura 3.3 - Interface de programação do controlador	31
Figura 3.4 - Estação meteorológica WMR928NX	32
Figura 3.5 - Tela principal do sistema de supervisão e interface com o usuário.....	33
Figura 4.1 - Solo sistematizado em nível (a) e solo sistematizado em desnível (b).....	37
Figura 4.2 - Lavoura formatada em solo sistematizado em nível.....	38
Figura 4.3 - Lavoura em terreno sistematizado em desnível (curvas de nível).....	39
Figura 4.4 - Classificação das parcelas dentro da lavoura.....	43
Figura 4.5 - Fluxograma da rotina de monitoramento da água	50
Figura 4.6 - Diagrama de recebimento das informações climáticas.....	52
Figura 4.7 - Fluxograma para alteração das referências de acordo com a previsão de chuva.....	55
Figura 4.8 - Referência com previsão de tempo seco (a). Referência com previsão de chuva (b).....	56
Figura 4.9 - Fluxograma da rotina de entrada do controle das bombas	58
Figura 4.10 - Fluxograma de controle do regime de trabalho das bombas para situação em que a lâmina d'água é inferior à referência mínima.....	61
Figura 4.11 - Fluxograma de controle do regime de trabalho das bombas para situação em que a lâmina d'água está na faixa entre a referência mínima e a referência.....	63
Figura 4.12 - Fluxograma de controle do regime de trabalho das bombas para situação em que a lâmina d'água está na faixa entre a referência e a referência máxima	65
Figura 4.13 - Comportamento da bomba de irrigação em tempo seco (a). Comportamento da bomba de irrigação em tempo chuvoso (b).....	66
Figura 4.14 - Perdas hídricas na lavoura de arroz	69
Figura 4.15 - Fluxograma de alteração das referências devido ao horário de ponta	75

Figura 5.1 - Relação entre o custo dos equipamentos fixos e o custo total da aplicação de acordo com a área (a). Relação entre o custo dos sensores e o custo total da aplicação de acordo com a área (b)	78
Figura 5.2 - Custo da irrigação em relação ao custo total da produção.....	79
Figura 5.3 - Percentual de área por modalidade de irrigação	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Comparativo de consumo do projeto para um período da safra.....	33
Tabela 4.1: Declividade média do terreno.....	41
Tabela 4.2: Número de direções de declividade.....	41
Tabela 4.3: Relação entre o perímetro dos canais de irrigação e a área da lavoura	41
Tabela 4.4: Aplicação da metodologia para estimativa da quantidade de sensores	42
Tabela 4.5: Distribuição dos sensores por nível de prioridade.....	44
Tabela 4.6: Distribuições dos sensores corrigidas.....	46
Tabela 4.7: Quantidade de sensores por nível de prioridade.....	46
Tabela 4.8: Divisão dos níveis de frequência.....	57
Tabela 4.9: Regime de trabalho da bomba de irrigação (com e sem chuva).....	66
Tabela 4.10: Perdas de água por percolação e fluxo lateral de acordo com a textura do solo	72
Tabela 5.1: Equipamentos utilizados na aplicação.....	76
Tabela 5.2: Custo dos equipamentos empregados na aplicação.....	77
Tabela 5.3: Custo total da aplicação de exemplo – solo sistematizado em desnível.....	77
Tabela 5.4: Custo total da aplicação de exemplo – solo sistematizado em nível	77
Tabela 5.5: Custo por modalidade de irrigação.....	80
Tabela 5.6: Custos com energia elétrica.....	80
Tabela 5.7: Medição de uma lavoura real.....	81
Tabela 5.8: Retorno do investimento da aplicação.....	82
Tabela 5.9: Estimativa do custo dos sensores com base no tempo para o retorno do investimento	82
Tabela 5.10: Impacto financeiro da aplicação em lavouras do Rio Grande do Sul.....	83
Tabela 5.11: Redução do consumo de energia elétrica proporcionado pela aplicação no Rio Grande do Sul	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IRGA: Instituto Rio Grandense do Arroz

SCADA: Supervisão Controle e Aquisição de Dados (*Supervisory Control Data Acquisition*)

DNP3.0: Protocolo de Redes Distribuídas versão 3.0 (*Distributed Network Protocol*)

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

GSM: Sistema Móvel Global (*Global System Mobile*)

GPS: Sistema de Posicionamento Global (*Global Position System*)

RF: Rádio Frequência

GPRS: Serviço de Rádio de Pacote Geral (*General Packet Radio Service*)

SOSBAI: Sociedade Sul Brasileira de Arroz Irrigado

XML: Linguagem de Marcação Extensível (*eXtensible Markup Language*)

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

RTC: Relógio de Tempo Real (*Real Time Clock*)

LISTA DE SÍMBOLOS

h_{med} : distância medida entre o sensor e a lâmina d'água (mm)

c : velocidade do som através do ar (mm/s)

t : tempo entre o envio do sinal pelo sensor e a recepção do sinal refletido pela lâmina d'água (s)

H_{Lam} : altura da lâmina d'água no local monitorado (mm)

h_{inst} : distância medida entre o sensor e o solo, distância de instalação (mm)

n : rotação da bomba (RPM)

R_{motor} : raio da polia do motor (mm)

R_{bomba} : raio da polia da bomba (mm)

f : frequência da tensão aplicada ao motor (Hz)

s : escorregamento do motor

p : número de polos do motor

kwh : quilowatt-hora

ha : medida de área, hectare.

QMS : quantidade mínima de sensores

$A_{lavoura}$: área da lavoura (há)

SP : somatório dos pesos

P_{dec} : peso referente à declividade média do terreno

P_{ddec} : peso referente ao número de direções de declividade do terreno

P_{per} : peso referente à relação entre o perímetro dos canais de irrigação e a área da lavoura

DS : distribuição dos sensores

DSC : distribuição dos sensores corrigida pelo número de parcelas existentes no nível de prioridade

NS : quantidade de sensores para o nível n de prioridade

NTS : quantidade total de sensores disponíveis

NP : número de parcelas do nível n de prioridade

H_{Sen_i} : medida de altura da lâmina d'água do sensor "i" (mm)

A_i : área coberta pelo sensor "i" (m²)

Med_{At} : vetor que recebe a medida atual dos sensores

Med_{An} : vetor que recebe a última medida válida dos sensores

Nr_{Sens} : número de sensores

R_{Min} : Referência mínima (mm)

R_{Med} : Referência média (mm)

R_{Max} : Referência máxima (mm)

R_{Min_0} : Referência mínima de projeto (mm)

R_{Med_0} : Referência média de projeto (mm)

R_{Max_0} : Referência máxima de projeto (mm)

$Prev_{CH}$: previsão de chuva corrigida considerada pelo sistema para alteração das referências das lâminas d'água (mm)

CH : quantidade de chuva prevista segundo informações da previsão do tempo do INPE enviada pelo sistema SCADA (mm)

$Prob$: probabilidade de que a chuva se confirme de acordo com a previsão do tempo do INPE (%)

CH_{Atual} : chuva que se confirma pela estação meteorológica (mm)

mm : milímetros

f_z : frequência zero

f_{mim} : frequência mínima

f_{bx} : frequência baixa

f_{med} : frequência média

f_{al} : frequência alta

f_{max} : frequência máxima

F_{Bomba} : frequência aplicada ao motor-bomba

Dif_Lam: variável para armazenar valores temporários do sistema

ETP : taxa de evapotranspiração diária (mm)

R_N : radiação líquida total diária (MJ m⁻² d⁻¹)

G : fluxo de calor no solo (MJ m⁻² d⁻¹)

γ : constante psicrométrica (0,063 KPa °C⁻¹)

U₂ : velocidade do vento a 2 metros de altura (m s⁻¹)

e_s : pressão de saturação de vapor (KPa)

e_a : pressão parcial de vapor (KPa)

s : declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar (KPa °C⁻¹)

ET_{BL} : taxa de evapotranspiração diária estimada pelo método de Benavides e Lopez (mm)

T_{med} : temperatura média diária ou do período da estimativa (°C)

UR_{med} : umidade relativa do ar média diária ou do período da estimativa (%)

ET_{HP} : taxa de evapotranspiração estimada para o horário de ponta (mm)

PF : estimativa de perdas diária por percolação e fluxo lateral (mm)

PF_{HP} : estimativa de perdas por percolação e fluxo lateral em horário de ponta (mm)

H_Ponta : horário de ponta (hora)

Perdas_{HP} : estimativa de perdas em horário de ponta (mm)

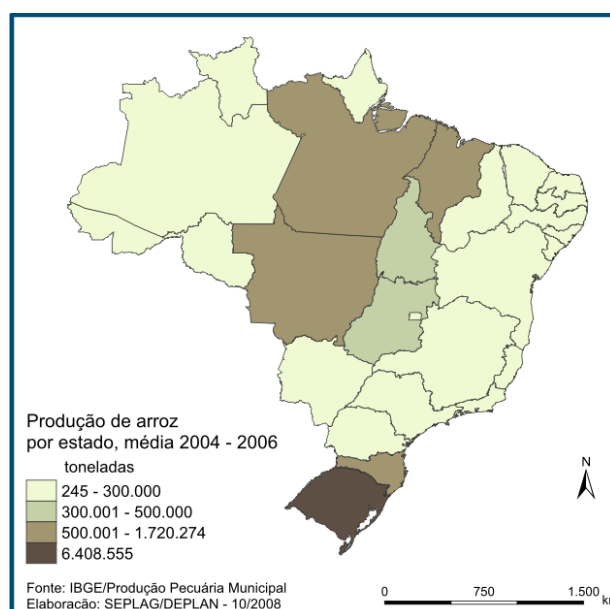
SUMÁRIO

Agradecimentos	3
RESUMO	5
Abstract	6
Lista de ilustrações	7
Lista de tabelas	9
Lista de abreviaturas e siglas	10
Lista de símbolos	11
Sumário	14
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 <i>Justificativa</i>	17
1.2 <i>Objetivos do trabalho</i>	19
1.3 <i>Metodologia</i>	20
1.4 <i>Organização do trabalho</i>	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 <i>Sensores</i>	25
2.2 <i>Comunicação</i>	25
2.3 <i>Controle e supervisão</i>	26
2.4 <i>Dados climáticos</i>	27
3 VISÃO GERAL DA APLICAÇÃO	28
3.1 <i>Monitoramento da água</i>	29
3.2 <i>Estação de controle</i>	30
3.3 <i>Supervisão e interface com o usuário</i>	32
3.4 <i>Resultados preliminares do protótipo</i>	33
4 METODOLOGIAS PROPOSTAS PARA MELHORIA DA AUTOMAÇÃO DA IRRIGAÇÃO DE LAVOURAS DE ARROZ	35
4.1 <i>Alocação dos sensores ultrassônicos</i>	35
4.1.1 <i>Terrenos sistematizados em nível</i>	37
4.1.2 <i>Terrenos sistematizados em desnível</i>	38
4.1.2.1 <i>Declividade do terreno e direções de declividade</i>	39
4.1.2.2 <i>Perímetro dos canais de irrigação</i>	40
4.1.2.3 <i>Proposta para estimativa da quantidade mínima de sensores</i>	40
4.1.2.4 <i>Estimativa dos melhores pontos para instalação</i>	42
4.2 <i>Estratégia para o monitoramento da água</i>	46

<i>4.3 Influência do clima no sistema de irrigação.....</i>	<i>51</i>
4.3.1 Aquisição de dados climáticos	51
<i>4.4 Proposta de lógica de controle das bombas através do monitoramento da chuva</i>	<i>52</i>
<i>4.5 Proposta de uma estratégia para compensação de perdas de água na lavoura em horário de ponta.....</i>	<i>67</i>
4.5.1 Horário de ponta.....	68
4.5.2 Tipos de perdas de água nas lavouras irrigadas	69
4.5.3 Estratégia proposta	73
5 ANÁLISE ECONÔMICA	76
<i>5.1 Custo de equipamentos</i>	<i>76</i>
<i>5.2 Custos com energia elétrica.....</i>	<i>79</i>
5.2.1 Custo da energia elétrica de acordo com o IRGA	79
5.2.2 Medições em uma lavoura real	81
5.2.3 Retorno do investimento	81
<i>5.3 Aplicabilidade no Estado do Rio Grande do Sul.....</i>	<i>83</i>
CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
Anexo i	91
Anexo ii	92
Anexo iii	93
Anexo iv	102

1 INTRODUÇÃO

O Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz irrigado do país. De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) cerca de 50% de toda a produção nacional de arroz é de origem gaúcha (IBGE, 2006). A Figura 1.1 apresenta o mapa de distribuição da produção nacional do arroz entre os anos de 2004 e 2006. Dentre as demais culturas praticadas em lavouras no estado, o cultivo do arroz representou 14,8% do Valor Bruto da Produção Agropecuária no ano de 2006.



Fonte: IBGE, 2006

Figura 1.1 – Distribuição da produção média nacional de arroz nos anos de 2004 a 2006

O cultivo do arroz irrigado está entre as culturas mais exigentes em termos de recursos hídricos e energéticos do mundo. De acordo com dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), para produzir um quilograma (kg) de grãos com casca, são necessários em torno de dois mil litros de água, considerando o cultivo de arroz por submersão do solo em um período de irrigação de 100 dias (EMBRAPA, 2005). Na grande maioria das plantações, a lavoura é localizada em cotas superiores do terreno em relação ao nível do reservatório de água. Neste caso a água a ser distribuída para a irrigação da plantação deve antes ser elevada mecanicamente, através de sistemas de bombeamento, também chamados de le-

vantes, o que demanda uma enorme quantidade de energia do sistema elétrico. Normalmente, os sistemas de bombeamento estão localizados nos finais de redes de alimentadores rurais, além de funcionar em regimes contínuos devido aos períodos de safra, o que aumenta ainda mais o impacto deste tipo de carga no sistema elétrico de potência (PFITSCHER, 2012).

Diante deste panorama, pesquisas em eficiência energética e de uso eficiente da água, voltadas ao cultivo do arroz tornam-se fundamentais. Uma alternativa para reduzir o impacto deste tipo de cultura é a automação dos sistemas de irrigação. A automação de sistemas de irrigação é estudada desde a década de 80. Inicialmente, era baseada simplesmente em temporizadores e chaves que eram ligadas por determinados períodos e de acordo com as condições climáticas. Desde então, os sistemas automatizados têm evoluído continuamente. Sistemas convencionais de irrigação de acionamento eletromecânico estão sendo substituídos por sistemas de acionamento eletrônico, com controladores de velocidade e de partida suave, o que permite reduzir o consumo de energia elétrica e água, e ainda aumentar a vida útil de todo o sistema de bombeamento. Segundo dados do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA) mais de 90% do arroz produzido no Estado advém do sistema de produção por submersão do solo (IRGA, 2012). Desta forma, a automação da irrigação através do controle da lâmina d'água na plantação é uma alternativa recomendável para as lavouras de arroz do Rio Grande do Sul.

Com este trabalho pretende-se apresentar algumas metodologias objetivando melhorar o processo de automação da irrigação de lavouras de arroz. As metodologias propostas levarão em consideração um sistema baseado em comunicação sem fio (*wireless*), supervisão SCADA (*Supervisão, Controle e Aquisição de Dados*), monitoramento e controle da água através de sensores ultrassônicos e controle de rotação da(s) bomba(s) de irrigação.

1.1 Justificativa

A Universidade Federal do Pampa, em parceria com a AES Sul, realizou um projeto de automação baseado em um sistema de supervisão SCADA e rede sem fio, com o objetivo de controlar e monitorar remotamente a lâmina d'água na lavoura através de uma interface amigável com o produtor/operador. O projeto teve início na safra 2010/2011, quando um protótipo foi instalado em uma propriedade particular na região de Uruguaiana. Na safra 2011/2012 o projeto foi executado em uma área dentro do Campus Uruguaiana da Universidade Federal do Pampa. A região de Uruguaiana foi escolhida por suas condições climáticas e também por ser a cidade de maior produção de arroz do país.

O projeto desenvolvido considera uma lavoura em tamanho reduzido, dividida em quatro parcelas¹, cada uma com um regime diferente de irrigação, sendo que cada uma das parcelas é irrigada por um sistema independente; existe uma bomba d'água e um sistema de tubulação particular para cada parcela. As parcelas foram divididas da seguinte forma:

- Parcela 01: Sistema convencional de irrigação, sem utilização de sensores;
- Parcela 02: Sistema automatizado considerando irrigação de uma lavoura com solo saturado, (lâmina d'água próxima à zero, suficiente apenas para encharcar o solo);
- Parcela 03: Sistema automatizado em regime contínuo de irrigação, considerando uma lâmina d'água constante;
- Parcela 04: Sistema automatizado em regime intermitente de irrigação, com variação dinâmica da lâmina d'água.

A distribuição das parcelas pode ser observada na Figura 1.2, que representa a instalação do projeto na safra 2011/2012, na área da Universidade Federal do Pampa.

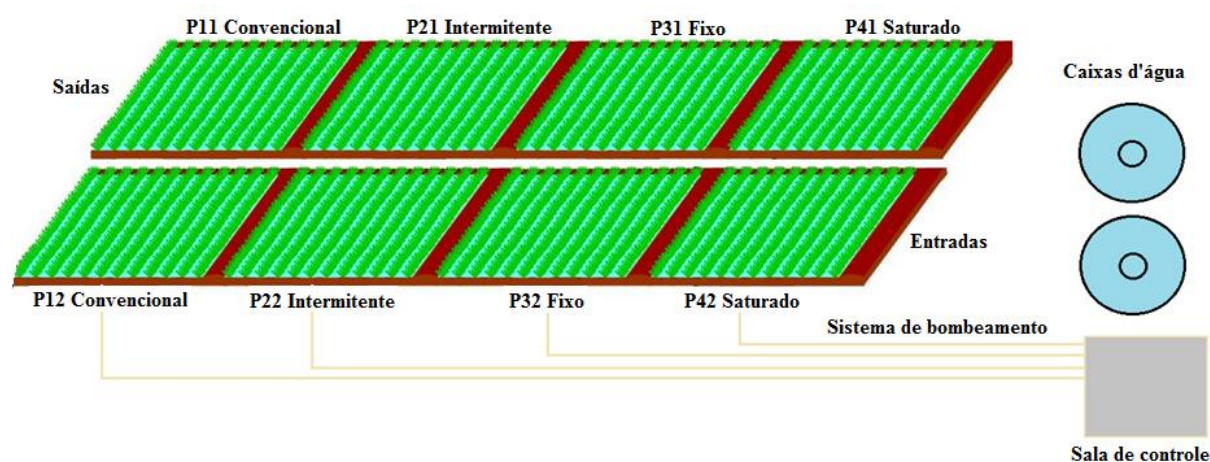


Figura 1.2 – Distribuição das parcelas em protótipo do sistema de irrigação

A aplicabilidade do sistema, desenvolvido para automatizar a irrigação de lavouras de arroz, ainda depende de algumas melhorias nos procedimentos de implantação e monitoramento da água. Lavouras reais apresentam inúmeras variações e características que devem ser observadas no projeto da aplicação e no controle da água. Os principais desafios para tornar o sistema aplicável em lavouras reais são apresentados a seguir:

¹ Parcelas: subdivisões da lavoura, que ocorrem devido à declividade do terreno e são cercadas por pequenas elevações de terra com o objetivo de manter a água confinada no seu interior.

- A alocação dos sensores é fundamental para o bom funcionamento da aplicação, entretanto, não existe nenhuma metodologia para determinar a quantidade de sensores a serem instalados e, tampouco, os melhores pontos para instalação dos sensores. Para determinar os pontos para alocar os sensores é considerado que o solo é sistematizado em nível, desta forma um único sensor é suficiente para cobrir toda a área da parcela, normalmente superior a um hectare. No entanto, existem áreas em que a sistematização do solo em nível é praticamente impossível, devido às irregularidades no terreno. Esse é o caso da grande maioria das lavouras na região de Uruguiana; para estes casos, o solo é sistematizado em desnível, com as parcelas separadas através de curvas de nível. Quando as parcelas são divididas em curvas de nível, a simples escolha de um ponto na parcela para alocar o sensor pode tornar-se um procedimento ineficaz, fazendo com que o sistema perca confiabilidade.

- A quantidade de bombas e a frequência de acionamentos também são pontos fundamentais para que o projeto se torne aplicável em uma lavoura real. O projeto atual prevê uma bomba de 0,5CV para cada uma das quatro parcelas. Entretanto, em uma aplicação real a disposição das estações de bombeamento pode ter diversas variações. Por exemplo, existem locais onde são necessárias duas estações em série para elevar a água até o nível da lavoura. Também existem lavouras irrigadas por duas, ou mais, estações de bombeamento em locais e de potências distintas. A potência da estação de bombeamento, na grande maioria dos casos, é muito alta, chegando a ultrapassar 200CV. Desta forma o acionamento repetitivo e a alteração brusca de velocidade devem ser evitados para reduzir os picos de correntes oriundos destes acionamentos, e evitar o desgaste dos equipamentos.

Diante deste panorama, esse trabalho propõe novas metodologias para expandir a aplicabilidade do projeto piloto de automação da irrigação desenvolvido pela Unipampa, com foco no dimensionamento e alocação do sistema de sensores, e no controle das bombas de irrigação.

1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo geral deste trabalho é propor melhorias nos processos de automação da irrigação de lavouras de arroz visando o aumento da eficiência do sistema.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Criação de uma metodologia de quantificação e alocação dos sensores em campo;

- Desenvolvimento de um algoritmo de controle da bomba de irrigação de acordo com os parâmetros da lavoura e integração de dados climáticos com o sistema, para influenciar a tomada de decisão;
- Criação de um método que compense as perdas de água na lavoura no horário de ponta, para evitar que a lâmina d'água fique abaixo do valor mínimo de referência estabelecido durante o período em que as bombas estão desligadas;
- Estimação da aplicabilidade no estado do Rio Grande do Sul;
- Estimação do tempo de retorno do investimento da aplicação, para uma lavoura real.

1.3 Metodologia

Para aumentar a inteligência do processo de automação da irrigação é necessário criar uma metodologia para que o sistema possa ter a maior autonomia possível diante de diversas situações. Quanto maior a diversidade de situações que o sistema puder reconhecer e, a partir daí, ter a tomada de decisão, mais inteligente será o sistema. A experiência de profissionais, agrônomos e produtores foi buscada, através de diversas entrevistas e relatos, para embasar as metodologias desenvolvidas, utilizando princípios de sistema especialista. Desta forma, algumas situações típicas serão analisadas e implementadas neste trabalho:

- Modificar a forma como as bombas são controladas integrando dados climáticos ao sistema de controle, através de uma estação meteorológica local e de previsão do tempo recuperada de um aplicativo desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), fazendo com que a tomada de decisão seja, também, baseada em dados climáticos. Além disto, a utilização da previsão do tempo torna possível antecipar algumas tomadas de decisão do sistema de irrigação, como, por exemplo, a compensação de perdas hídricas em horário de ponta e a redução da rotação das bombas em caso de chuva. Esta alternativa poderá reduzir consideravelmente o consumo de água e energia nos dias em que haja precipitação de chuvas, ou ainda estimar o nível de perda de água devido à evaporação da água na lavoura e transpiração da planta. Para que esta metodologia seja eficaz, é necessário também que os níveis de velocidade de rotação das bombas que regulam a vazão da água enviada até a lavoura sejam discretizados.
- Desenvolver uma estratégia para compensar as perdas de água na lavoura nos horários de fora ponta, para que o sistema possa ser desligado nos horários de ponta, sem causar prejuízo à plantação. Este procedimento, além de reduzir a sobrecarga do sistema elétrico em horário de ponta, permite reduzir o custo da energia consumida na produção. Será feita uma estimativa das perdas hídricas na lavoura durante o período em que o sistema é desligado devido ao

horário de ponta. A partir desta estimativa, as referências do sistema serão alteradas antes do início do horário de ponta, aumentando a quantidade de água solicitada pela lavoura e criando uma reserva para suportar o desligamento do sistema.

Para que a aplicação seja funcional em lavouras de escala real, algumas considerações devem ser feitas, visto que no período experimental da aplicação foi utilizado um terreno reduzido e pouco acidentado. Em lavouras normais, é comum existirem diversas irregularidades no terreno, o que dificulta o monitoramento da água, aumentando a quantidade de sensores necessária para não perder a confiabilidade das medições. Assim metodologias para estimar a quantidade mínima de sensores e os melhores locais para instalação dos mesmos serão apresentadas neste trabalho. Serão propostas duas metodologias para quantificação e alocação dos sensores, uma para cada método de sistematização do solo. As metodologias são diferentes, pois cada forma de sistematização do solo apresenta características próprias de recepção de água e de tamanho e formato de parcelas. As características topográficas da lavoura e o perímetro dos canais de irrigação serão utilizados como base para estimar a quantidade mínima de sensores. A distribuição dos sensores no interior da lavoura também deve levar em consideração as características topográficas do terreno. Entretanto, as parcelas serão classificadas de acordo com a necessidade de monitoramento. Cabe mencionar que não há na literatura trabalhos que abordem este tema, o que dá maior originalidade ao trabalho.

Além dos estudos citados anteriormente, neste trabalho será apresentada uma estimativa da aplicabilidade do projeto no Estado do Rio Grande do Sul, e também do tempo de retorno de investimento, com base no custo dos materiais e redução no consumo de energia proporcionado pela aplicação.

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro Capítulo é apresentada uma introdução sobre o tema automação da irrigação de lavouras de arroz. Uma revisão bibliográfica sobre o tema é mostrada no Capítulo 2. No terceiro Capítulo é descrito o projeto de automação da irrigação de lavouras de arroz, no qual este trabalho foi baseado. As metodologias para melhoria do processo de automação da irrigação das lavouras de arroz são apresentadas em detalhes no Capítulo 4. No Capítulo 5 é apresentada uma análise econômica da solução proposta e a sua aplicabilidade em âmbito estadual. As considerações finais e sugestões de continuidade do trabalho são apresentadas no final do documento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o desenvolvimento das metodologias apresentadas neste trabalho, foi necessário fazer uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos que abordam o tema da automação da irrigação de lavouras de arroz. Desta forma, esta revisão será apresentada neste capítulo. Inicialmente serão apresentadas as principais soluções propostas pelos pesquisadores e, a seguir, serão vistos, de forma geral, os tópicos mais comuns do tema na literatura.

Em (PFITSCHER et al., 2012) foi apresentado um sistema de automação da irrigação com base no monitoramento e controle de lâmina d'água em lavouras de arroz. O sistema prevê a utilização de sensores ultrassônicos com comunicação *wireless* integrada para monitorar a água e enviar as medidas à estação de controle. O controle da água é feito através de inversores de frequência que alteram a rotação das bombas de irrigação, conforme a necessidade do sistema. A interface com o usuário foi desenvolvida através de um sistema supervisório SCADA, de onde é possível monitorar todas as variáveis da aplicação e ainda enviar alguns comandos à estação de controle. Um controlador lógico programável é o responsável por realizar toda a lógica de automação e integrar os componentes do sistema. Os resultados preliminares da aplicação se mostram promissores do ponto de vista de eficiência energética e redução do uso da água.

Em (SORIANO et al., 2007) é apresentada uma análise dos sistemas de bombeamento sob a ótica da agricultura de precisão e proposto um conjunto de soluções que permitam a gestão eficiente da produção de arroz com base nos conceitos da agricultura de precisão. A solução para realizar o monitoramento das variáveis do sistema prevê a utilização de sensores que interagem com uma central de processamento de dados através de comunicação *wireless* e cabos óticos. Os sensores que realizam o monitoramento da água são distribuídos em todos os pontos desde a sucção até a lavoura, sendo que o tipo de sensor é específico para cada local. Na solução proposta, o monitoramento da água no reservatório é realizado através de sensores de nível, nas tubulações os sensores medem a vazão de água, na plantação propõe-se a instalação de sensores de umidade, temperatura e velocidade do vento. Uma das principais sugestões do trabalho é a utilização de um sensor de alerta ambiental. Este sensor tem a função de alertar o produtor/operador sobre o baixo nível dos reservatórios, onde a vazão ecológica do rio ou arroio começa a ser afetada. O trabalho não menciona que a solução tenha sido desen-

volvida, apenas apresenta propostas para automatização do sistema de irrigação de lavouras de arroz através das ferramentas de agricultura de precisão.

Em (SOUZA et al., 2011) é apresentada uma alternativa de automação para sistemas de irrigação por gotejamento. São utilizados sensores de umidade com comunicação via rádio para monitorar a água na lavoura. A aplicação possui um sistema de supervisão e interface com o usuário desenvolvida em linguagem C++. A vazão de água dos gotejadores é fixa e o que é modificado é o tempo de irrigação, a partir das medidas dos sensores. O trabalho destaca ainda o desenvolvimento de um circuito de processamento com base em microcontrolador PIC. São utilizados sensores capacitivos para o monitoramento da umidade do solo. Entre outras vantagens deste tipo de sensores está a baixa influência da temperatura nas medidas. O processo como um todo é aplicável em lavouras com baixa necessidade de água, o que é um fator limitante considerando o arroz irrigado por submersão do solo, comum no Rio Grande do Sul.

Em (YANG et al., 2006) é apresentado um dispositivo baseado em rede GSM (*Global System Mobile*) e rádio comunicação com objetivo de reduzir o uso de água pela cultura. É possível monitorar e controlar as variáveis do sistema de três formas: via computador, via celular ou através da central de controle e ação. A comunicação do sistema com computador e com o celular é realizada utilizando a rede GSM. Os sensores de umidade utilizados para monitorar a água na lavoura se comunicam com a central de controle e ação através de rádio frequência. A interface de controle desenvolvida é baseada no *Microsoft Access 2000*® e o banco de dados é operado através do *Microsoft Visual Basic 6.0*®. O módulo GSM é conectado ao computador através da porta serial RS232. O sistema de comunicação proposto utiliza redes GSM permitindo o monitoramento e o controle remoto sem a necessidade da criação de uma rede particular de grande escala. A vantagem desta metodologia é o custo de dados da rede GSM que é bastante baixo.

Em (YUNSEOP KIM et al, 2008), uma aplicação baseada em uma rede de sensores *wireless* distribuídos em campo é desenvolvida com o objetivo de maximizar a produção e reduzir o uso de água. Um software de controle foi criado para receber as medidas dos sensores em tempo real e enviar os comandos a um pivô, que é o responsável pela irrigação. Os sensores são mapeados na lavoura através de um sistema GPS (*Global Position System*), limitando a atuação do pivô somente aos locais em que há necessidade de água. Informações climáticas também são utilizadas através de uma estação meteorológica local. Os sensores são capazes de monitorar a umidade e temperatura do solo e a temperatura do ar. A alimentação dos sen-

sores é feita através de baterias de 12V que são carregadas por painéis solares. A lavoura é mapeada e classificada de acordo com as características químicas do solo e a partir daí é realizada a distribuição dos sensores. O sistema de irrigação previsto neste trabalho é por pivô, o que dificulta sua implementação em lavouras de arroz irrigado por submersão. Entretanto, o sistema de alimentação por painéis solares, a localização por GPS e o multisensoriamento das variáveis da plantação se tornam boas alternativas para realizar o monitoramento da lavoura.

Em (BENZEKRI et al., 2007) é descrito e implementado um sistema de baixo custo para controle da irrigação através de um computador. O aplicativo desenvolvido utiliza informações dos sensores de umidade na lavoura e de uma estação meteorológica para tomada de decisão. Um sistema de aquisição de dados com base em microcontroladores e comunicação serial é utilizado para comunicar o computador com o sistema de monitoramento e atuação. As informações climáticas são utilizadas para estimar as perdas por evaporação e a verificar a incidência de chuva. O volume de chuva não é levado em consideração no controle das bombas; é considerado apenas se está ou não chovendo no momento em que os sensores indicam a necessidade de água pela lavoura. A contribuição do trabalho é o baixo custo da aplicação, com software desenvolvido em linguagem Delphi para supervisão e interface com o usuário. O sistema de controle é aplicável somente em lavouras com baixa necessidade de água, o que limita sua utilização em lavouras com irrigação por submersão.

Em (VASCONCELLOS et al., 2011) é realizada uma análise da eficiência energética e qualidade de energia de sistemas de bombeamento acionados por conversores de frequência. A vazão de água pode ser controlada de duas formas: abertura e fechamento de válvulas (partida direta) e pelo controle da frequência de tensão imposta à bomba (inversor de frequência). Apesar de reduzir a eficiência hidráulica do sistema de bombeamento, o controle da vazão através da frequência da tensão imposta à carga mostrou ser eletricamente mais eficiente. Nos testes experimentais a potência ativa absorvida pelo sistema que utiliza o inversor de frequência apresentou uma redução de até 88% (frequência de 25Hz aplicada à carga), quando comparada ao sistema de controle através de válvulas, para a mesma vazão. Os resultados mostraram, também, que a influência da não linearidade do inversor sobre a tensão de entrada é desprezível. Entretanto, há uma grande distorção harmônica nas formas de onda de corrente, o que deve ser observado com maior cuidado, visto que estas alterações podem provocar sobrecarga nos equipamentos e condutores de energia. O projeto de filtros harmônicos é uma solução viável para reduzir o impacto das distorções harmônicas na rede elétrica.

2.1 Sensores

Em um sistema de automação da irrigação de uma lavoura, normalmente, a variável a ser controlada é a água na lavoura. A maioria das pesquisas sobre o tema trata de sensores de umidade do solo como o principal método para aquisição de dados. Alguns autores apresentam uma metodologia para o desenvolvimento dos sensores, utilizando microcontroladores de baixo custo, dado que, a aquisição destes sensores, por parte da maioria dos agricultores ainda é inviável, devido ao alto custo deste tipo de equipamento e à falta de capacitação técnica para operá-los. Os sensores capacitivos são os mais utilizados para realizar medidas de umidade no solo. O sinal passa pelas placas e qualquer mudança no dielétrico entre as mesmas modifica a frequência de saída, sendo que no ar a leitura da frequência aproxima-se do valor gerado e na água o mínimo; logo a umidade é inversamente proporcional à frequência de saída (SOUZA et al., 2011).

Em campo, a técnica utilizada para fazer a medição da umidade do solo consiste em alocar os sensores em pares, com diferentes profundidades entre si. O sensor mais profundo define o nível máximo de umidade para não haver infiltração de água para as camadas mais profundas. O sensor alocado mais próximo à superfície define a umidade mínima do solo para manter a qualidade da planta (BENZEKRI et al., 2007).

Porém, no Brasil, uma das técnicas mais comum de plantio de arroz é a de submersão do solo, que consiste em manter a superfície do solo submerso por uma lâmina d'água. Embora seja uma das técnicas mais exigentes em termos de recursos hídricos, pesquisas mostram que a manutenção de uma lâmina d'água sobre a superfície do solo traz uma série de benefícios à planta (EMBRAPA, 2005). Diante deste contexto, os sensores ultrassônicos podem ser aplicados para realizar as medições de altura de lâmina d'água na lavoura.

Não foram encontradas na literatura metodologias para quantificação e alocação dos sensores em campo, que se apliquem a lavouras irrigadas por submersão do solo. Outro fator que não é abordado pelos autores é a dificuldade para monitorar a água em lavouras de grande escala, devido às características topográficas do terreno.

2.2 Comunicação

A comunicação entre os dispositivos de aquisição de dados em campo, controladores, supervisores e atuadores, é o maior desafio em um projeto de automação em lavouras de arroz. Diversos fatores podem dificultar a comunicação nestes projetos, como as grandes distâncias

e a inviabilidade técnica e financeira de instalação de condutores no solo (PFITSCHER et al., 2012).

A comunicação por rádio frequência (RF) é utilizada, geralmente, na comunicação entre os sensores em campo e um sistema de controle distante de até dois quilômetros. A principal vantagem de um sistema de comunicação de dados sem fios por RF, em relação a um sistema que use condutores é poder proporcionar mobilidade dinâmica sem custo de realocação. A tecnologia de rádio frequência tem sido amplamente adotada em projetos de comunicação sem fios, e proporciona inúmeras oportunidades de utilizar a comunicação *wireless* em sistemas agrícolas. O *Bluetooth* é um exemplo que tem sido adaptado e utilizado para detecção e controle de sistemas de automação de lavouras (YUNSEOP KIM et al., 2008). As desvantagens deste tipo de sistema de comunicação são a dificuldade de implementação para grandes distâncias, necessidade de um sistema de alimentação próprio para cada dispositivo e a manutenção da rede de comunicação particular.

Em situações em que a lavoura fica distante (acima de dois quilômetros) da sede administrativa da fazenda, a comunicação entre todo o sistema de controle e supervisão via condutores, ou mesmo rede *wireless* é dificultada. Desta forma, uma solução que está sendo adotada por diversos autores é o uso da telemetria por meio do serviço de GPRS (*General Packet Radio Service*), do sistema de telefonia celular GSM. A rápida expansão das redes GSM em todo o mundo impulsiona a adoção da infraestrutura celular em substituição aos enlaces privados de rádio, desonerando as empresas do alto custo de implantação e manutenção de sistemas proprietários, ao mesmo tempo em que padroniza os protocolos da Internet nas aplicações de telemetria (DILLENBURG, 2008) e (YANG et al., 2006). A desvantagem da utilização deste tipo de sistema de comunicação é que por não se tratar de uma rede particular, como no caso da RF, existe um custo de utilização de serviço de rede das operadoras de telefonia que é proporcional ao volume de dados que é transmitido.

2.3 Controle e supervisão

O controlador tem a função de fazer a integração de todos os componentes do sistema. É por intermédio dele que a rede de sensores em campo irá se conectar ao sistema de supervisão, e por consequência, com o usuário. Os comandos para os atuadores são enviados pelo controlador, com base nos sinais recebidos pelos sensores, ou pelos comandos enviados pelo sistema de supervisão (PFITSCHER et al., 2012). O controlador ainda tem a função de fazer o armazenamento de todos os dados do sistema (medidas dos sensores, referências do usuário,

dados climáticos, etc.), principalmente em casos em que não há a presença de um sistema de supervisão. Além disto, em alguns casos o controlador pode ainda receber comandos do usuário através de uma interface própria (BENZEKRI et al., 2007). Alguns autores propõe o desenvolvimento de controladores, o que reduz o custo da aplicação mas, entretanto, aumenta o tempo de desenvolvimento, ao contrário dos sistemas que utilizam controladores lógicos programáveis.

O sistema de supervisão deve fazer a interface entre o usuário e todos os elementos do sistema. Do ponto de vista da aplicabilidade, a automação deve permitir um fácil controle dos parâmetros da planta, a fim de reduzir a resistência de produtores habituados a sistemas tradicionais. O método mais utilizado para desenvolver o aplicativo de supervisão é com a utilização do sistema SCADA, que é uma ferramenta consolidada na criação de projetos de automação em geral. A vantagem do uso do sistema SCADA é a alta confiabilidade e robustez do aplicativo; entretanto, o custo de aplicações SCADA tende a ser elevado. Algumas pesquisas apresentam interfaces criadas com linguagens de programação de alto nível, como por exemplo, C++ e Delphi; a vantagem destas aplicações é o baixo custo de implementação, entretanto o tempo de desenvolvimento é superior ao tempo de desenvolvimento de aplicações SCADA.

2.4 Dados climáticos

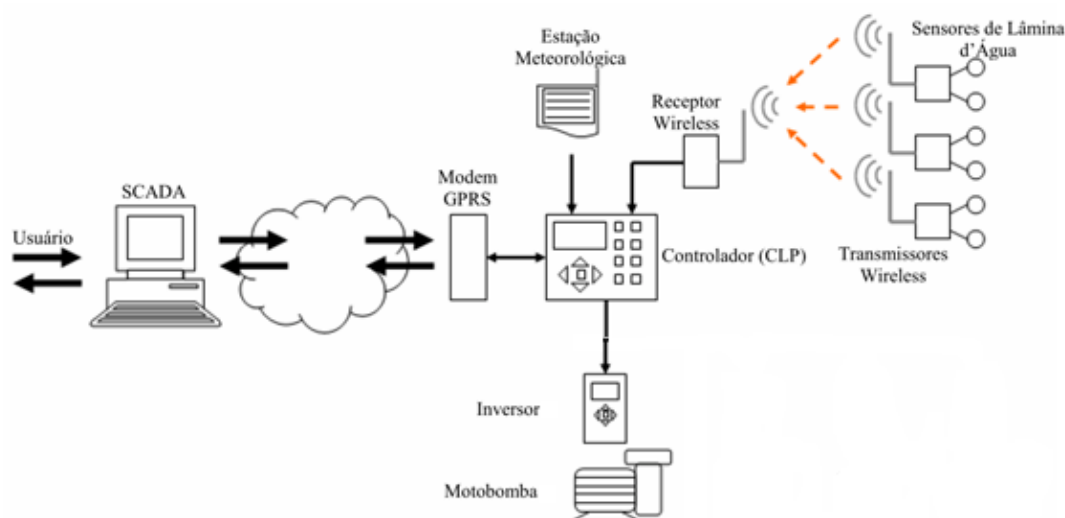
A utilização de dados climáticos no sistema de irrigação é importante no controle das perdas de água por evapotranspiração e na redução do uso da água através da chuva. Na maioria dos casos a chuva é a fonte primária de água na agricultura. Entretanto, em alguns casos a necessidade de água é superior ao volume de chuva, tornando necessária a utilização de sistemas de irrigação (BENZEKRI et al., 2007). As principais informações que devem ser buscadas na estação meteorológica são a temperatura do ar, a umidade relativa, a precipitação, a radiação solar e a velocidade e direção do vento (YUNSEOP KIM et al., 2008).

A forma mais comum de aquisição dos dados climáticos é através de uma estação meteorológica local (SOUZA et al., 2011), (YUNSEOP KIM et al., 2008) e (BENZEKRI et al., 2007). As informações oriundas da internet, mesmo que de órgãos confiáveis, como o INPE ou o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) não são abordadas na literatura. As informações advindas da internet podem reduzir o custo da aplicação dispensando a necessidade de aquisição de uma estação meteorológica particular, ou ainda trabalhar em conjunto com a estação meteorológica local.

3 VISÃO GERAL DA APLICAÇÃO

Neste capítulo, é apresentado o sistema básico de automação da irrigação de lavouras de arroz, no qual as novas metodologias propostas neste trabalho são contextualizadas. Esse sistema utiliza como base o protótipo desenvolvido em um projeto piloto da Unipampa, descrito no Capítulo 1.

O objetivo da aplicação é reduzir o consumo de energia elétrica através do controle e monitoramento da água. Para tal, foi desenvolvido um sistema baseado em sensores ultrassônicos, comunicação *wireless* e supervisor SCADA. O monitoramento da lâmina d'água é feito através de sensores ultrassônicos instalados em pontos estratégicos da lavoura. Os sensores se comunicam com a estação de trabalho através de uma rede wireless, com frequência de 2,4 MHz. O principal componente da estação de trabalho é um controlador programável, que é responsável por executar toda a lógica de controle. A interface com o usuário foi criada através de um sistema de supervisão SCADA que envia e recebe informações do sistema de controle por meio de um modem de comunicação GPRS, utilizando o protocolo DNP3.0. Neste capítulo serão abordados os principais componentes da aplicação proposta. A Figura 3.1 ilustra o diagrama esquemático da aplicação.



Fonte: PFITSCHER, 2012

Figura 3.1 - Diagrama esquemático da aplicação

3.1 Monitoramento da água

O monitoramento da água se dá por sensores ultrassônicos instalados na plantação. Os sensores ultrassônicos emitem um pulso de energia que viaja através do ar na velocidade do som. Uma parte desta energia é refletida pela lâmina d'água e volta ao sensor, que calcula a distância, através da equação 3.1.

$$h_{med} = \frac{c \cdot t}{2} \quad (3.1)$$

Onde:

- h_{med} é a medida instantânea entre o sensor e a lâmina d'água (mm);
- c é a velocidade do som através do ar (mm/s);
- t é o tempo entre o envio do sinal pelo sensor e a recepção do sinal refletido pela lâmina d'água (s).

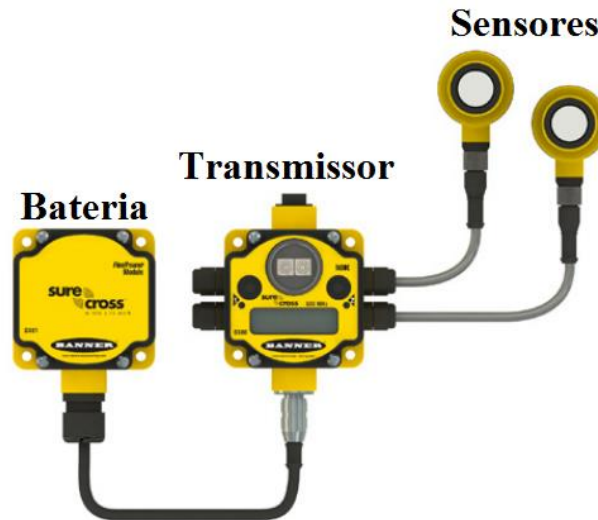
Os sensores monitoram a altura da lâmina d'água no local onde está alocado através da diferença entre a altura de instalação e a medida atual do sensor (h_{med}), de acordo com a equação 3.2. Esta altura de instalação é medida antes do início da irrigação, portanto com a lavoura ainda seca. Assim:

$$H_{Lam} = h_{inst} - h_{med} \quad (3.2)$$

Onde:

- H_{Lam} é a altura da lâmina d'água no local monitorado (mm);
- h_{inst} é a distância medida entre o sensor e o solo, distância de instalação (mm).

Os sensores utilizados na aplicação comunicam-se com a estação de controle através de um transmissor de rádio frequência com interface serial. As medidas enviadas pelos sensores chegam a um *gateway* instalado dentro da estação de controle, responsável por receber todas as medidas dos sensores e, enviar ao controlador através de uma interface serial com padrão *Modbus*. A alimentação dos sensores e do transmissor é feita através de baterias de alto desempenho, com autonomia de até um ano sem necessidade de recarga. A Figura 3.2 apresenta uma possível configuração do kit de sensores com transmissor e baterias.



Fonte: BANNER, 2012

Figura 3.2 - Kit com sensores ultrassônicos, transmissor e bateria

3.2 Estação de controle

A integração entre todos os componentes do sistema é feita na estação de controle, através de um controlador lógico programável. O controlador, além da função de integrar todo o sistema, é responsável por executar as lógicas de controle para manter a lâmina d'água dentro dos limites definidos e armazenar todos os dados do sistema. O controle do regime de funcionamento da(s) bomba(s) de irrigação é feito através do envio de sinais a uma entrada analógica do inversor de frequência em padrão $4 a 20 mA$. De acordo com o sinal recebido pelo controlador, o inversor modifica a frequência da tensão aplicada ao motor, alterando, por consequência, a rotação da bomba, conforme a equação 3.3.

$$n = \left(\frac{R_{motor}}{R_{bomba}} \right) \cdot \frac{120 \cdot f \cdot (1 - s)}{p} \quad (3.3)$$

Onde:

- n é a rotação da bomba (RPM);
- R_{motor} é o raio da polia do motor (mm);
- R_{bomba} é o raio da polia da bomba (mm);

- f é a frequência da tensão aplicada ao motor (Hz);
- s é o escorregamento do motor (adimensional);
- p é o número de polos do motor (adimensional);

O controlador utilizado na aplicação é o modelo *BCM2085B*® da empresa BCM. A estrutura de programação do controlador é baseada em diagrama de estados e a linguagem utilizada é chamada de *Linguagem Descritiva BCM*®. O diagrama de estados é basicamente uma forma padronizada de representação das regras de controle de um processo, o que facilita a programação das lógicas de controle desenvolvidas para o processo de automação da irrigação. A programação é feita utilizando o software *PROCP V5kael*®, também desenvolvido pela BCM. A interface de programação do software é apresentada na Figura 3.3.

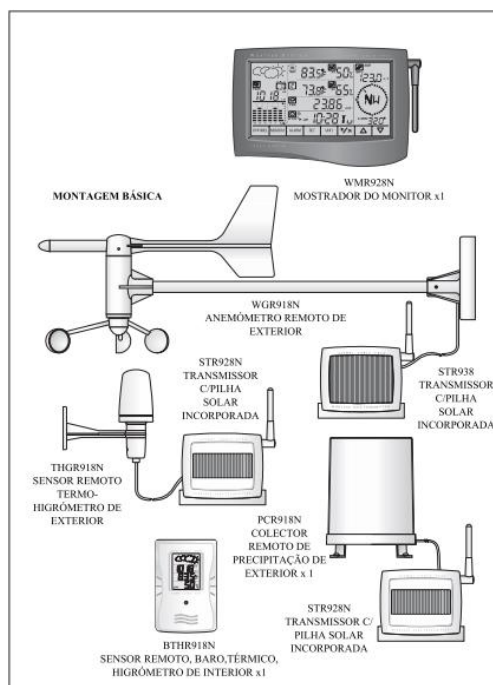
```

339 SE HBCM1(0)=2 ENTÃO 5 ; se HBCM1(0)=2 significa que a comunicação foi disparada com sucesso
340
341 ESTADO 5:
342 FACA* VAR=8 ; variável que irá setar ou resetar o buffer de saída, inicializada em 2 para
343 VA PARA 6
344
345 ESTADO 6:
346 SE CMSD1(0)=1 ENTÃO 7 ; comando de operação direta
347 SE CMSD1(0)=11 ENTÃO 7
348 SE CMSD1(0)=21 ENTÃO 7
349
350 ESTADO 7:
351 SE ATRASO=100 ENTÃO 8
352
353 ESTADO 8:
354 FACA* VAR=BFSD1(0) ; a variável recebe o valor que está no buffer de entrada, será um o
355 SE ATRASO=50 ENTÃO 9
356
357 ESTADO 9:
358 SE VAR=1 OU VAR=0 ENTÃO 10 ; tudo certo? incrementa o CMSD1
359 SE VAR<0 OU VAR>1 ENTÃO 11 ; errado? incrementa duas vezes o CMSD1
360
361 ESTADO 10:
362 FACA* CMSD1(0)=CMSD1(0)+1 ; Execução OK
363 VA PARA 12
  
```

Figura 3.3 - Interface de programação do controlador

Na estação de controle é possível encontrar ainda a unidade principal da estação meteorológica e um modem de comunicação GPRS. A unidade principal da estação meteorológica local é responsável por receber as informações climáticas em tempo real e enviar ao controlador também através de uma interface serial padrão RS232 utilizando um protocolo de comunicação próprio da estação meteorológica, que é interpretado pelo controlador. O modem de comunicação GPRS é o responsável pela troca de dados entre a estação de controle e o sistema de supervisão e interface com o usuário. O modem também utiliza uma das portas seriais do controlador, padrão RS232, com o protocolo de comunicação DNP3.0.

A estação meteorológica utilizada é apresentada na Figura 3.4 e fabricada pela *Oregon Scientific*. Os sensores da estação WMR928NX enviam os elementos meteorológicos para um mostrador *wireless* com uma frequência de 433 MHz, e possuem uma área efetiva de comunicação de até 100 metros, desde que não haja obstáculos entre o transmissor e o receptor. O mostrador possui uma porta de comunicação serial RS232 que permite a comunicação com um controlador, permitindo a atualização das informações climáticas locais em tempo real. A estação meteorológica possui sensores alimentados por energia solar fotovoltaica, capazes de medir a velocidade e a direção do vento (anemômetro), a temperatura e a umidade do ar externo (termo higrômetro), pressão atmosférica (barômetro) e a quantidade total e índice de precipitação de chuvas (medidor de precipitação).



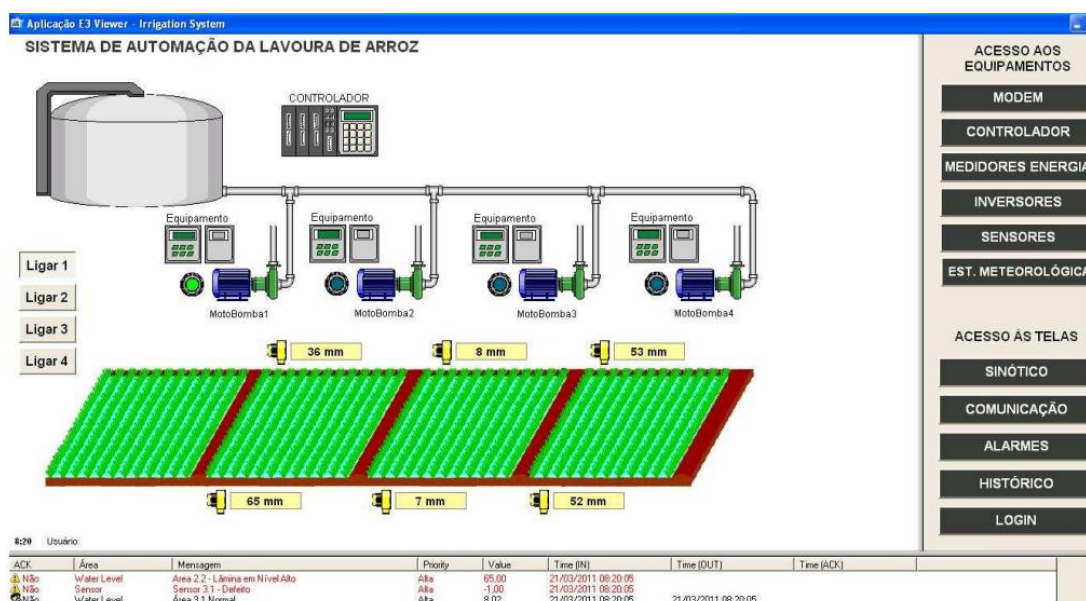
Fonte: OREGON SCIENTIFIC, 2004

Figura 3.4 - Estação meteorológica WMR928NX

3.3 Supervisão e interface com o usuário

O sistema de supervisão SCADA é o responsável pela interface entre o usuário e a estação de controle. A comunicação com a estação de controle é possível porque o supervisor é executado dentro de um servidor e pode ser acessado de qualquer lugar, através da internet. O sistema de supervisão, além de permitir ao usuário fazer o monitoramento remoto de todas as variáveis do sistema, dá a possibilidade de atuar sobre algumas destas variáveis como, por

exemplo, ligar ou desligar uma bomba. A Figura 3.5 apresenta a tela principal do sistema de supervisão e interface com o usuário.



Fonte: PFITSCHER, 2012

Figura 3.5 - Tela principal do sistema de supervisão e interface com o usuário

3.4 Resultados preliminares do protótipo

Durante a safra de 2011, o consumo de energia elétrica e o uso da água foram monitorados individualmente em cada parcela da aplicação. Os resultados obtidos são promissores, porém, ainda não conclusivos, devido ao pequeno tamanho da amostragem e, também, às restrições do terreno e da aplicação. Estes resultados mostram que houve redução tanto no uso da água quanto no consumo de energia elétrica em todas as parcelas automatizadas, quando comparadas à parcela que representa o sistema convencional. Conforme mostra a Tabela 3.1, a parcela 3 foi a que obteve melhores resultados na redução do consumo de energia e utilização da água.

Tabela 3.1: Comparativo de consumo do projeto para um período da safra.

Parcela	Uso de água (m ³)	Consumo de energia (kwh)	% da parcela convencional	
			m ³	Kwh
1	97,74	13,47	-	-
2	28,59	4,52	29,3%	33,6%
3	14,49	2,51	14,8%	18,7%
4	30,8	3,47	31,5%	25,8%

Período dos testes e aquisição dos dados: 25/01/11 a 12/02/11.

- *Parcela 1*: Parcela com sistema convencional de irrigação. É usada como referência para comparação com o sistema de irrigação automatizado;
- *Parcela 2*: Parcela com lâmina de referência de 30mm. Apresentou uma redução no consumo de energia de 64,4%. A redução no uso da água foi de 70,7%.
- *Parcela 3*: Parcela que apenas mantém o solo saturado. Apresentou uma redução no consumo de energia de 81,3%. A redução no uso da água foi de 85,2%.
- *Parcela 4*: Parcela com irrigação intermitente. Apresentou uma redução no consumo de energia de 74,2%. A redução no uso da água foi de 68,5%.

Apesar de os resultados apresentarem redução no uso da água e consumo de energia bastante semelhante, é importante mencionar que não há uma relação linear entre o consumo de energia e a utilização da água. Outro fator que deve ser destacado é que os melhores resultados são da parcela em que a automação mantém apenas o solo saturado, ou seja, a necessidade de água neste caso é inferior à das outras parcelas. Os custos dos equipamentos utilizados no projeto desenvolvido são descritos no Anexo I deste trabalho.

Com base nas características descritas nesse capítulo, novas metodologias serão propostas no Capítulo 4, com foco na distribuição dos sensores que realizam o monitoramento da água e na utilização de informações climáticas no processo de automação da irrigação.

4 METODOLOGIAS PROPOSTAS PARA MELHORIA DA AUTOMAÇÃO DA IRRIGAÇÃO DE LAVOURAS DE ARROZ

O objetivo deste capítulo é apresentar propostas de metodologias que consideram as características topográficas do terreno e as informações climáticas como variáveis fundamentais para o processo de automação do sistema de irrigação de lavouras de arroz. As características topográficas são utilizadas na distribuição dos sensores que realizam o monitoramento da água na lavoura. As informações climáticas podem proporcionar a redução do consumo de energia elétrica pelo sistema de irrigação, através da utilização destas informações no controle do regime de funcionamento da(s) bomba(s) de irrigação.

É importante mencionar que todas as metodologias que estão sendo propostas foram desenvolvidas com base no conhecimento de profissionais com experiência no ramo de produção de arroz. As informações foram levantadas através de entrevistas e documentos adquiridos com agrônomos, consultores e produtores de arroz da cidade de Uruguaiana, além das pesquisas nas agências especializadas como o IRGA, a Embrapa e a SOSBAI (Sociedade Sul Brasileira de Arroz Irrigado).

O foco inicial do capítulo é a alocação dos sensores ultrassônicos utilizados para realizar o monitoramento da água no interior da plantação. Na sequência serão propostas metodologias para integração de dados climáticos no controle do regime de funcionamento da(s) bomba(s) de irrigação e, finalmente, é apresentada uma estratégia para compensação das perdas hídricas da plantação devido ao desligamento da(s) bomba(s) em horário de ponta.

4.1 Alocação dos sensores ultrassônicos

Os sensores ultrassônicos desempenham uma função fundamental para o processo de automação do sistema de irrigação. O controle do regime de funcionamento da(s) bomba(s) de irrigação é realizado principalmente através das informações enviadas pelos sensores. Assim, um mau funcionamento dos sensores ou uma informação errônea pode acarretar em uma série de problemas no sistema de produção como, por exemplo, a falta de água ou o excesso de água na lavoura. A falta de água na lavoura prejudica a qualidade da planta devido à redução da concentração dos nutrientes necessários ao crescimento. O excesso de água aumenta o desperdício de água e energia elétrica e danifica a estrutura da lavoura.

De forma geral, o ideal seria que fossem instalados sensores em todos os quadros² da lavoura e, em alguns casos, com redundância para aumentar ainda mais a confiabilidade e a precisão das medidas enviadas à estação de controle. Entretanto, o custo dos sensores ultrassônicos aplicáveis ao projeto existentes no mercado ainda é muito alto, elevando o custo total da aplicação. A definição dos melhores pontos dentro da lavoura para instalação dos sensores é fundamental, pois a confiabilidade e exatidão das medidas dependem do quanto da área da plantação é coberta pelos mesmos. A alocação inadequada pode acarretar em uma quantidade maior que a necessária de sensores ou, ainda, uma área significativa da plantação sem a cobertura dos sensores.

O cultivo do arroz irrigado é praticado, predominantemente, em solos planos a levemente ondulados, os quais devem ser sistematizados antes do início de cada safra, alterando as cotas de declividade natural do terreno para uma cota previamente determinada pelo levantamento plano altimétrico.

Existem diversas metodologias de sistematização do solo, porém é possível dar destaque aos dois métodos mais comuns de serem encontrados. Um deles é a sistematização do solo em desnível, onde as taipas³ são formatadas em curvas de nível, com altura e área variando de acordo com a declividade do terreno. A sistematização do solo permite conhecer previamente o sentido de declividade do terreno e, conseqüentemente, como será o comportamento do escoamento da água dentro da lavoura (STEINDORFF, 2005). E o outro método é a sistematização do solo em nível, onde o terreno é dividido em quadros nivelados em altura, preferencialmente em forma retangular. Em relação ao monitoramento da água na lavoura, os solos sistematizados em nível são mais vantajosos, pois possibilitam a melhor distribuição da água dentro dos quadros. Como os quadros são normalmente grandes, em alguns casos superiores a um hectare, é possível reduzir o número de sensores sem perder confiabilidade e precisão (NUNES, 2007). Entretanto o custo para sistematizar a lavoura em nível é mais elevado, devido à grande quantidade de terra movimentada. A principal vantagem dos solos sistematizados em desnível é o baixo custo de sistematização em relação aos solos sistematizados em nível. Na Figura 4.1 são apresentadas duas lavouras que ilustram a diferença física entre o solo sistematizado em nível (a) e o solo sistematizado em desnível (b).

² Quadros: equivalente às parcelas, é um termo mais usado em lavouras sistematizadas em nível.

³ Taipas: Pequenas paredes construídas com a própria terra utilizada na plantação que cercam as parcelas (ou quadros), com o objetivo de manter a água confinada no interior das parcelas.



Fonte: NUNES, 2007

Figura 4.1 - Solo sistematizado em nível (a) e solo sistematizado em desnível (b)

Desta forma, torna-se visível a necessidade de se desenvolver uma metodologia para quantificar e instalar os sensores ultrassônicos nos pontos mais adequados, atendendo aos requisitos de confiabilidade e precisão do sistema e sem comprometer a viabilidade financeira do projeto. Assim, será proposta uma metodologia que consiste na análise das características físicas e de projeto da lavoura e, também, levando em consideração o método de sistematização do solo.

4.1.1 Terrenos sistematizados em nível

Nos terrenos em que o solo é sistematizado em nível, como pode ser observado na Figura 4.2, os quadros são totalmente nivelados e devem possuir uma estrutura de irrigação e drenagem totalmente individualizada, impossibilitando a estimativa da quantidade de água em um quadro sem que haja um sensor fazendo o monitoramento. A área de cada quadro depende da declividade natural do terreno e deve ser compatível com o tamanho das máquinas agrícolas utilizadas na produção. Entretanto, recomenda-se que os quadros tenham uma área média de um hectare, podendo até chegar a dois hectares se as condições do terreno permitirem. A vantagem deste método de sistematização quanto ao monitoramento da água é a precisão das medidas devido ao nivelamento dos quadros. O nivelamento dos quadros também permite dispensar uma metodologia para determinar o melhor ponto para instalação do sensor.



Figura 4.2 - Lavoura formatada em solo sistematizado em nível

Em síntese, nas lavouras praticadas em terrenos com solo sistematizado em nível, a quantidade de sensores varia com o número de quadros plantados e, considerando que os quadros tenham uma área média de um hectare, pode-se definir uma média de um sensor por hectare. Quanto ao posicionamento do sensor dentro do quadro, parte-se do princípio que não há desnível, portanto o sensor pode ser instalado em qualquer local no interior do quadro.

4.1.2 Terrenos sistematizados em desnível

Nas lavouras praticadas em solo sistematizado em desnível, como ilustrado na Figura 4.3, os dois principais fatores considerados para estimar a quantidade necessária de sensores e os melhores pontos para instalação são a declividade do terreno e o perímetro total dos canais de irrigação em relação à área da lavoura. A declividade pode ser dividida em declividade média e número de direções de declividade. Assim, têm-se, na verdade, três fatores a serem considerados. Na metodologia proposta, a cada um dos fatores mencionados será dado um peso de acordo com sua influência no monitoramento da água na lavoura; isto é, quanto maior for a dificuldade imposta pelo fator ao monitoramento da água, maior será o peso recebido. A quantidade mínima de sensores será estimada pelo produto entre o somatório destes pesos e a área da lavoura. Foi estabelecido que, para fins de desenvolvimento de metodologia, a quantidade mínima de sensores poderá variar de um a quatro sensores por hectare. Esta definição se dá devido ao custo elevado dos sensores utilizados no monitoramento da água. No entanto, não deve existir quantidade máxima de sensores; quanto maior o número de sensores maior será a precisão e a confiabilidade das medidas. Neste caso, esta é uma determinação do produtor, de acordo com sua capacidade de investimento.



Figura 4.3 - Lavoura em terreno sistematizado em desnível (curvas de nível)

4.1.2.1 Declividade do terreno e direções de declividade

Conceitualmente, a declividade do terreno representa a inclinação que a superfície do solo faz com o plano horizontal. A declividade do terreno é um fator muito importante para o controle da água na lavoura, pois quanto maior a declividade maior será a dificuldade de monitorar a água devido ao maior escoamento hídrico no interior da plantação. A quantidade de curvas de nível e, conseqüentemente, de parcelas também são influenciados pela declividade do terreno. Uma declividade acentuada do terreno aumenta a quantidade de quadros na lavoura e reduz a área destes quadros. Em contrapartida, a declividade do terreno, quando conhecida, é importante para o controle das perdas reais de água na lavoura, pois é possível projetar drenos de captação e reutilização da água perdida na plantação através do fluxo lateral e percolação⁴.

Terrenos planos possuem uma declividade percentual de até 3%, já os terrenos levemente ondulados apresentam uma declividade média entre 3% e 8%. Entretanto, dentro da lavoura pode haver algumas regiões com declividade mais acentuada que no restante do terreno, chegando a 13% de declividade. Estas regiões requerem uma atenção especial na alocação dos sensores; logo, a distribuição dos sensores em campo também depende do perfil de declividade da lavoura. Por exemplo, em pontos mais planos a necessidade de sensores é menor que em pontos mais acidentados.

Outro fator a ser observado é o número de direções de declividade, que representa a quantidade de sentidos de escoamento hídrico apresentada pelo terreno. Quanto maior for o

⁴ Os conceitos de fluxo lateral e percolação são vistos na Seção 4.4.2.

número de direções de declividade, maior será a dificuldade imposta pela lavoura ao sistema de monitoramento da água.

Todos os dados sobre a declividade do terreno devem ser disponibilizados no projeto de sistematização do solo e no levantamento topográfico do terreno. A partir destas informações, é possível aferir sobre a influência da declividade do solo na quantidade e nos melhores pontos para instalação dos sensores.

4.1.2.2 Perímetro dos canais de irrigação

Os canais de irrigação são responsáveis por oferecer um caminho para que a água chegue aos seus pontos de distribuição na lavoura. Quanto maior for o perímetro dos canais de irrigação que alimentam a plantação em relação à área da lavoura, melhor será a distribuição da água na plantação, o que pode reduzir a quantidade necessária de sensores. Outra observação importante é que nos quadros posicionados junto aos canais de irrigação pode-se dispensar a presença de sensores, pois normalmente são quadros com grande abundância de água e possíveis sensores nestes locais podem distorcer as medidas enviadas ao controlador, devido ao excesso de água.

4.1.2.3 Proposta para estimativa da quantidade mínima de sensores

A quantidade mínima de sensores (QMS) proposta neste trabalho, expressa na equação 4.1, é definida pelo produto entre a área da lavoura e o somatório dos pesos (SP).

$$QMS = SP \cdot A_{lavoura} \quad (4.1)$$

Onde:

- QMS é a quantidade mínima de sensores;
- $A_{lavoura}$ é a área da lavoura (hectares);
- SP é o somatório dos pesos, definido pela equação 4.2;

O resultado do somatório dos pesos é um valor que deve variar de 1 (um sensor por hectare) a 4 (quatro sensores por hectare).

$$SP = P_{dec} + P_{ddec} + P_{per} \quad (4.2)$$

Onde:

- P_{dec} é o peso referente à declividade média do terreno;
- P_{ddec} é o peso referente ao número de direções de declividade do terreno;
- P_{per} é o peso referente à relação entre o perímetro dos canais de irrigação e a área da lavoura.

Nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 são apresentadas as distribuições dos pesos referentes, respectivamente, à declividade média do terreno, ao número de direções de declividade e, à relação entre o perímetro dos canais de irrigação e a área da lavoura. Cabe ressaltar que a distribuição dos pesos foi definida de acordo com o grau de dificuldade imposta pelos fatores ao monitoramento da água, e que os pesos foram normalizados para que seu somatório varie de um a quatro. O somatório dos pesos representa a quantidade mínima estimada de sensores por hectare.

Tabela 4.1: Declividade média do terreno.

Declividade média do terreno (%)	Peso
0 – 1	0,4
1 – 2	0,8
2 – 5	1,2
> 5	1,6

Tabela 4.2: Número de direções de declividade.

Número de direções de declividade	Peso
1	0,2
2 – 3	0,4
3 – 4	0,6
> 4	0,8

Tabela 4.3: Relação entre o perímetro dos canais de irrigação e a área da lavoura.

Relação entre o perímetro dos canais e a área da lavoura (m/m²)	Peso
> 0,003	0,4
0,002 – 0,003	0,8
0,001 – 0,002	1,2
< 0,001	1,6

Como exemplo de aplicação da proposta apresentada, será estimada a quantidade mínima de sensores para uma lavoura com as seguintes características:

- Solo sistematizado em desnível;

- Área: 250 ha ou 2.500.000 m²;
- Perímetro dos canais: 5000 m;
- Declividade média do terreno: 1%;
- Direções de declividade: 2;

A metodologia proposta para estimar a quantidade mínima de sensores é mostrada na Tabela 4.4, com o número de sensores definido pela equação 4.2.

Tabela 4.4: Aplicação da metodologia para estimativa da quantidade de sensores.

Fator	Valor	Peso
Declividade média do terreno	1%	0,4
Direções de declividade	02	0,4
Perímetro dos canais/Área da lavoura	0,005	0,8
<i>Somatório (SP)</i>		<i>1,6</i>

Aplicando a equação 4.2, tem-se:

$$QMS = 1,6 \cdot 250 = 400 \text{ sensores.} \quad (4.3)$$

A quantidade mínima de sensores estimada para uma lavoura com as características descritas é de 400 sensores. Caso fosse utilizado o método de sistematização em nível, considerando uma lavoura com a mesma área e com 220 quadros de tamanhos que variam de um hectare até dois hectares, a quantidade mínima de sensores seria de 220 sensores; ou seja, um sensor para cada quadro, independente do tamanho.

4.1.2.4 Estimativa dos melhores pontos para instalação

Determinar com exatidão os melhores pontos para instalação dos sensores na lavoura é uma tarefa de alta complexidade, devido à diversidade de características que são intrínsecas a cada lavoura. No entanto, é possível, através de uma série de recomendações, identificar pontos que devem receber prioridade na hora da escolha dos locais para instalação. Para tal, é necessário traçar um perfil da lavoura através do estudo do levantamento topográfico e do processo de sistematização do solo. Além dos dados referentes à declividade e aos canais de irrigação, é preciso buscar informações sobre quantidade de parcelas e como estão distribuídas na lavoura. Ainda na fase de estudo do levantamento topográfico da lavoura é preciso identificar os pontos de maior e de menor declividade no terreno e, também, verificar em

quantos níveis plano-altimétricos a lavoura está dividida, nos dados do processo de sistematização do solo.

De posse destas informações, a primeira etapa para encontrar os locais que devem ser priorizados na escolha dos pontos para instalação dos sensores é classificar as parcelas de acordo com suas posições na lavoura. A proposta desse trabalho é classificar as parcelas de quatro diferentes formas: parcelas de entrada, parcelas de fronteira, parcelas centrais e parcelas de saída. Na Figura 4.4 é apresentada a forma como as parcelas são classificadas quanto à sua posição, onde cada número representa um tipo de parcela, conforme segue:

- *Parcelas de entrada (1)*: são parcelas posicionadas junto aos canais de irrigação. Na Figura 4.4, somente o canal principal é ilustrado, entretanto, parcelas junto aos canais de irrigação secundários também são classificadas como parcela de entrada.
- *Parcelas de fronteira (2)*: são parcelas localizadas nas extremidades da lavoura.
- *Parcelas centrais (3)*: são parcelas que fazem fronteira somente com outras parcelas.
- *Parcelas de saída (4)*: são parcelas localizadas junto aos drenos de captação da água da lavoura.



Figura 4.4 - Classificação das parcelas dentro da lavoura

A divisão dos sensores dentro da lavoura deve ser feita de acordo com a prioridade de cada região da lavoura; essa divisão será feita em quatro níveis de prioridade. Quanto maior a dificuldade para monitorar e/ou controlar a água, maior será a necessidade de instalação de sensores e, por consequência, mais alta será a prioridade.

Prioridade 1:

- Nas regiões onde a declividade do terreno é mais acentuada, a velocidade do escoamento hídrico tende a ser maior do que nas regiões mais planas, o que dá maior dinamismo à lâmina d'água, dificultando o monitoramento.

- Nas parcelas de saída, as perdas de água são potencializadas devido ao fluxo lateral e à percolação.

Prioridade 2:

- Nas parcelas de fronteira, é necessário atentar às perdas por fluxo lateral, pois este tipo de perda reduz a eficiência hídrica da lavoura.

Prioridade 3:

- Nas regiões mais planas, é mais fácil monitorar e controlar a água, devido à baixa velocidade de escoamento hídrico;

- As parcelas centrais apresentam baixo potencial de perdas, pois são totalmente rodeadas por outras parcelas, tornando desprezíveis as perdas por fluxo lateral.

Prioridade 4:

- As parcelas de entrada recebem baixa prioridade, pois são locais onde normalmente existe água em abundância, devido à proximidade dos canais de irrigação;

Após a distribuição das parcelas dentro dos níveis de prioridade, é necessário estimar a quantidade de sensores que será destinada a cada nível, o que depende do número de sensores disponíveis para instalação. A distribuição proposta, entre os níveis de prioridade, é apresentada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Distribuição dos sensores por nível de prioridade.

Prioridade	Distribuição dos Sensores (DS)
1	40% dos sensores disponíveis
2	30% dos sensores disponíveis
3	20% dos sensores disponíveis
4	10% dos sensores disponíveis

Entretanto, para que a distribuição dos sensores seja homogênea, a quantidade de sensores também deve ser proporcional ao número de parcelas existentes em cada nível de priori-

dade. Então a distribuição apresentada na Tabela 4.5 deve ser corrigida pelo número de parcelas existentes em cada nível, conforme apresentado na equação 4.4.

$$DSC_n = NP_n \cdot \frac{DS_n}{100\%} \quad (4.4)$$

Onde:

- DSC é a distribuição dos sensores corrigida pelo número de parcelas existentes no nível de prioridade;
- DS é a distribuição dos sensores sem a correção;
- n é referente ao nível de prioridade.

Finalmente, a quantidade de sensores por nível de prioridade é encontrada pelo produto entre a distribuição dos sensores corrigida e a quantidade total de sensores, dividido pelo somatório das distribuições de sensores corrigidas, conforme equação 4.5.

$$NS_n = \frac{DSC_n \cdot NTS}{\sum_{n=1}^{n=4} DSC_n} \quad (4.5)$$

Onde:

- NS é a quantidade de sensores para o nível n de prioridade;
- NTS é a quantidade total de sensores disponíveis.

Dando continuidade ao exemplo da seção 4.1.2.3 e considerando que existam 1200 parcelas na lavoura, com a seguinte distribuição de parcelas por prioridade:

- Prioridade 1: 250 parcelas;
- Prioridade 2: 150 parcelas;
- Prioridade 3: 600 parcelas;
- Prioridade 4: 200 parcelas;
- Quantidade de sensores disponíveis (NTS) = 400 sensores.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados das distribuições dos sensores corrigidas para cada nível de prioridade.

Tabela 4.6: Distribuições dos sensores corrigidas.

Distribuição dos sensores		
$DSC_1 = NP_1 * \frac{DS_1}{100\%}$	$DSC_1 = 250 * 0,4$	$DSC_1 = 100$
$DSC_2 = NP_2 * \frac{DS_2}{100\%}$	$DSC_2 = 150 * 0,3$	$DSC_2 = 45$
$DSC_3 = NP_3 * \frac{DS_3}{100\%}$	$DSC_3 = 600 * 0,2$	$DSC_3 = 120$
$DSC_4 = NP_4 * \frac{DS_4}{100\%}$	$DSC_4 = 200 * 0,1$	$DSC_4 = 20$

A quantidade de sensores por nível de prioridade é apresentada na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Quantidade de sensores por nível de prioridade.

Quantidade de Sensores		
$NS_1 = \frac{DSC_1 * NTS}{\sum_{n=1}^{n=4} DSC_n}$	$NS_1 = \frac{100 * 400}{285}$	$NS_1 = 140 \text{ sensores}$
$NS_2 = \frac{DSC_2 * NTS}{\sum_{n=1}^{n=4} DSC_n}$	$NS_2 = \frac{45 * 400}{285}$	$NS_2 = 64 \text{ sensores}$
$NS_3 = \frac{DSC_3 * NTS}{\sum_{n=1}^{n=4} DSC_n}$	$NS_3 = \frac{120 * 400}{285}$	$NS_3 = 168 \text{ sensores}$
$NS_4 = \frac{DSC_4 * NTS}{\sum_{n=1}^{n=4} DSC_n}$	$NS_4 = \frac{20 * 400}{285}$	$NS_4 = 28 \text{ sensores}$

Já dentro de cada nível de prioridade, é aconselhável distribuir os sensores da forma mais homogênea possível, de acordo com os níveis plano altimétricos e com a área dos quadros. Nos casos em que houverem grandes diferenças de tamanho entre as parcelas pode-se priorizar aquelas com maior área, devido à sua maior representatividade quanto à necessidade de água.

4.2 Estratégia para o monitoramento da água

Nesta proposta a medida de altura de lâmina d'água considerada pelo controlador deve ser uma média das medidas dos sensores ponderada pela área coberta por eles, conforme equação 4.6. A justificativa para isto é que normalmente existe uma ou duas bombas de irrigação para toda a lavoura e não há, ainda, uma forma de automatizar o direcionamento da água nos canais de irrigação.

$$H_{Lam} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} H_{Sen_i} \cdot A_i}{\sum_{i=1}^{i=n} A_i} \quad (4.6)$$

Onde:

- H_{Lam} é a altura da lâmina d'água que será utilizada no controle do regime de funcionamento da(s) bomba(s) (mm);
- H_{Sen_i} é a medida de altura da lâmina d'água do sensor "i" (mm);
- A_i é a área coberta pelo sensor "i" (m²).

Ressalta-se que no processo de automação que está sendo proposto não é considerada a dispensa dos aguadores, pessoas responsáveis por abrir e fechar as taipas, fazendo o direcionamento manual da água no interior da lavoura. Desta forma, as medidas dos sensores deverão ser enviadas individualmente para o sistema de supervisão, informando ao operador os pontos em que existe excesso ou falta de água na lavoura, o que facilita e agiliza o trabalho dos aguadores.

Um fator importante que deve ser observado é a possibilidade de falha dos sensores, o que pode ocasionar erros nas medidas enviadas ao controlador, ou mesmo o não envio de alguma medida. O erro pode ocorrer por dois motivos: falha no sensor ou falha no sistema de comunicação. Então, é necessário criar uma estratégia para filtrar as possíveis medidas errôneas dos sensores. A proposta para realizar essa filtragem é criar dois vetores com o objetivo de armazenar as duas últimas medidas de cada sensor. O comprimento de cada vetor deve ser igual ao número total de sensores. Desta forma, é possível comparar as duas últimas medidas de cada sensor, e identificar as medidas inválidas. O tempo entre cada atualização das medidas é de um minuto; então, em uma situação de normalidade, não pode haver grandes variações entre as medidas.

A comparação entre as medidas será feita através do módulo da diferença entre a medida atual e a medida anterior, com um erro admitido de até 3mm, conforme a equação 4.7. O valor do erro admitido se deve a precisão dos sensores utilizados.

$$Erro = |Med_{At} - Med_{An}| \quad (4.7)$$

Onde:

- *Erro* é a diferença entre as duas últimas medidas do sensor (mm);
- Med_{At} é a medida atual do sensor (mm);
- Med_{An} é a última medida válida do sensor (mm);

Se o valor do erro for maior que 3mm a medida será descartada e não será considerada no cálculo da altura da lâmina d'água (H_{Lam}). A posição do vetor que representa a medida atual do sensor também não deverá ser atualizada até que o sensor envie uma medida correta (erro inferior a 3mm), e após cinco medidas erradas o sistema enviará um alerta de manutenção ao sistema de supervisão.

A estratégia adotada para realizar o monitoramento da água e atualizar o operador/produzidor sobre as possíveis falhas dos sensores é descrita abaixo e representada no fluxograma da Figura 4.5.

a) A lógica é implementada dentro de um laço 'for', com o número de iterações (i) igual à quantidade de sensores (Nr_{Sens}). A varredura dos sensores é executada em intervalos de um minuto, sendo que o intervalo de leitura entre os sensores é somente o tempo de processamento do controlador.

b) As medidas atuais dos sensores ($H_{Sens}(i)$) são salvas em um vetor ($Med_{At}(i)$) de tamanho Nr_{Sens} .

c) O *Erro* de medida deve ser calculado através da equação 4.7 e, a seguir deve-se testar se o erro é inferior ou igual a 3mm.

c.1) Se o erro for inferior ou igual a 3mm, verifica-se se a medida está dentro dos limites de referência⁵. Caso a medida esteja fora dos limites de referência, um alarme é enviado ao sistema de supervisão informando o índice do sensor e se a medida está acima da referência máxima ($Serv_{Alarm}(i)=2$) ou abaixo da referência mínima ($Serv_{Alarm}(i)=1$).

c.1.1) O vetor $Med_{An}(i)$ recebe a medida atualizada do sensor ($Med_{At}(i)$). A função deste vetor é armazenar a última medida válida dos sensores com o objetivo de verificar a existência de erro nas próximas medidas.

c.1.2) O contador de erros do sensor ($Cont(i)$) deve ser zerado, pois trata-se de uma medida válida.

⁵ As referências de lâmina d'água são abordadas em detalhe na Seção 4.4.

- c.1.3)* A altura da lâmina provisória (H_{Lap}) é calculada pela equação 4.6. A altura da lâmina d'água provisória representa a média das alturas calculadas até a iteração atual.
- c.2)* Se o erro for superior a 3mm, deve-se incrementar o contador de erro ($Cont(i)$) e, a seguir, verificar se o contador de erro é igual a 5.
- c.2.1)* $Cont(i)$ igual a 5 significa que houveram 5 medidas inválidas do sensor, então uma mensagem de erro deve ser enviada ao sistema de supervisão e o contador de erros deve ser reiniciado.
- d)* O índice de iterações (i) é incrementado e, a seguir, deve-se testar se i é igual à quantidade de sensores.
- e)* Se o resultado do teste for verdadeiro, H_{Lam} recebe o valor que está salvo em H_{Lap} . O índice de iterações (i) e o intervalo entre cada varredura são reiniciados.
- f)* Enquanto o índice de iterações (i) for menor que o número de sensores os passos de “ b ” a “ e ” são repetidos.

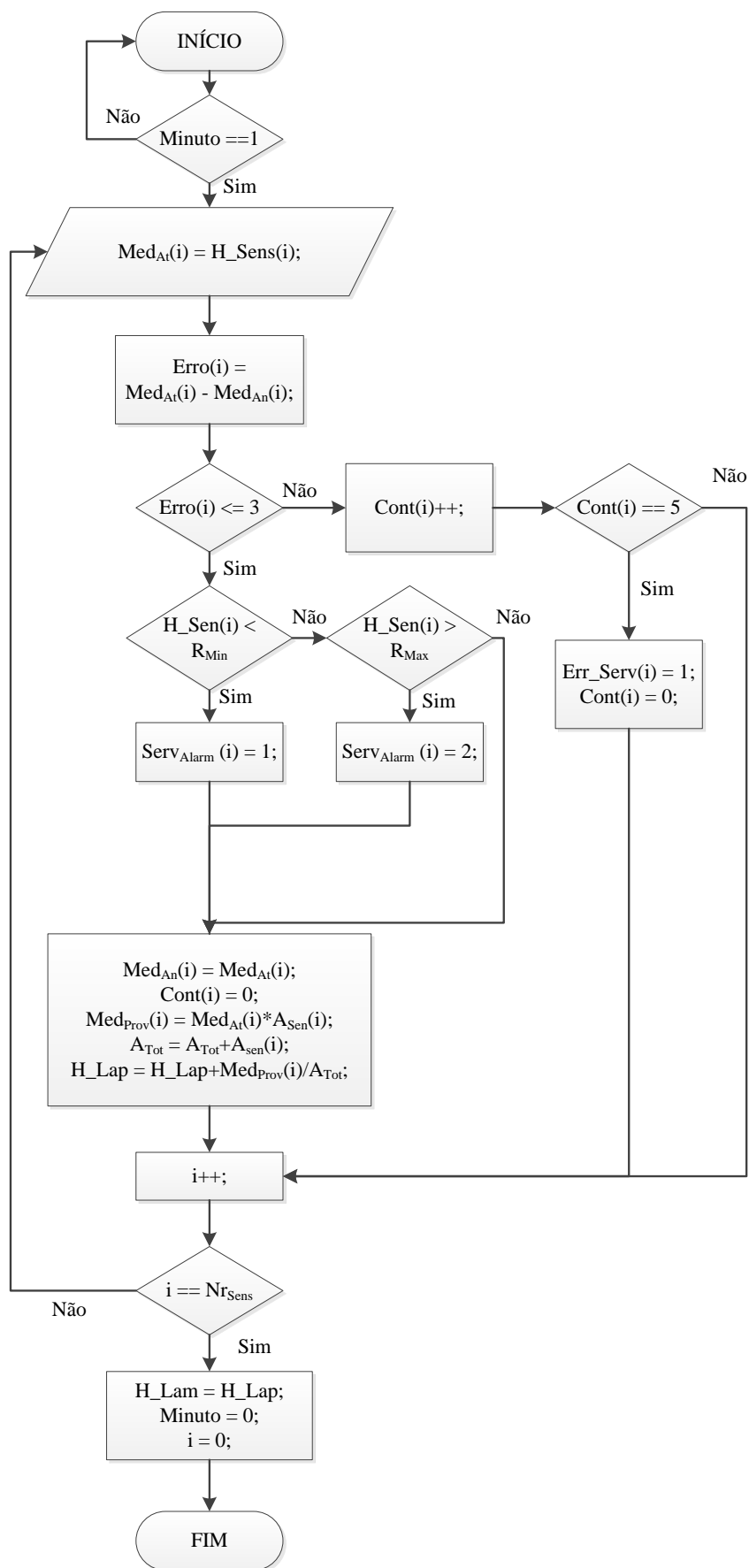


Figura 4.5 – Fluxograma da rotina de monitoramento da água

4.3 Influência do clima no sistema de irrigação

A utilização de informações climáticas no controle de irrigação já é uma prática bastante comum entre os produtores. No entanto, na maioria dos casos, o que se faz é desligar as bombas de irrigação quando o produtor estima que a precipitação de chuvas é suficiente para suprir a necessidade de água da plantação. Então, trata-se de uma decisão tomada empiricamente e de forma totalmente manual.

Todas as informações referentes ao clima são relevantes para um manejo mais preciso da plantação. Além da chuva, outras variáveis climáticas também devem ser monitoradas como, por exemplo, umidade relativa do ar, temperatura, vento e irradiação solar, que são determinantes no controle da evaporação da lâmina d'água e transpiração das plantas. Então, sabendo da importância das observações climáticas para a produção do arroz, nessa seção será apresentada uma metodologia para utilização dos dados climáticos no processo de automação da irrigação das lavouras de arroz.

A precipitação de chuvas durante a safra, exceto naquelas situações em que se necessita do solo seco (plantação e preparação do solo, por exemplo) ou que haja um excesso de precipitação em curtos intervalos de tempo, é uma grande aliada do produtor porque aumenta o nível dos reservatórios e reduz a utilização de água para a irrigação, além de reduzir a energia elétrica que é consumida para manter a lâmina d'água na lavoura.

4.3.1 Aquisição de dados climáticos

A aquisição das informações climáticas proposta será realizada de duas formas. Uma delas é através de uma estação meteorológica local que atualiza o controlador com informações climáticas em tempo real. A segunda é a utilização de dados de previsão do tempo através da internet. A aquisição de dados meteorológicos é feita através da requisição destas informações na internet pelo sistema SCADA. Existem diversas restrições à utilização de informações da internet neste tipo de sistema, principalmente devido à segurança e à confiabilidade dos dados; sendo assim, os dados que serão utilizados pelo sistema serão requisitados no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O INPE disponibiliza uma série de aplicações em XML (eXtensible Markup Language) de previsão tempo e informações climatológicas em tempo real. O XML é uma linguagem de marcação para criação de documentos com dados organizados de forma hierárquica. A requisição dos dados em XML do INPE deve ser feita com a utilização do código da localidade desejada (pode ser encontrado na própria página do serviço) e com o tipo de informação que se quer saber (previsão do tempo, índice de irradiação).

ção solar, tempo real, etc.) (INPE, 2011). Os dados disponibilizados pelo INPE podem ser utilizados livremente para o desenvolvimento de aplicações que necessitem destas informações. No Anexo II é apresentado o código escrito em Script do Visual Basic para fazer a aquisição dos dados climáticos em XML. A Figura 4.6 apresenta um diagrama simplificado deste cenário.

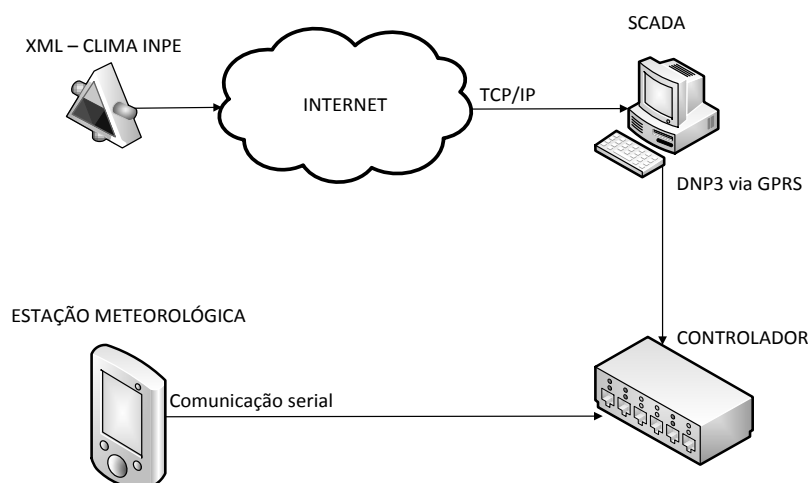


Figura 4.6 - Diagrama de recebimento das informações climáticas

4.4 Proposta de lógica de controle das bombas através do monitoramento da chuva

O regime de funcionamento da(s) bomba(s) de irrigação dependerá da altura das lâminas d'água (H_{Lam}) na lavoura e das informações climáticas recebidas da estação meteorológica e do sistema SCADA. O objetivo é manter a lâmina d'água dentro dos limites de referências que são definidos no projeto. A referência mínima (R_{Min}) é definida como a altura mínima da lâmina d'água. A referência máxima (R_{Max}) representa a altura máxima da lâmina d'água admitida pela aplicação. A referência média (R_{Med}) é a altura ideal da lâmina d'água de acordo com os requisitos da lavoura.

O sistema SCADA enviará ao controlador os dados referentes à previsão de chuvas para o dia, que será recuperado da aplicação XLM do INPE. A estação meteorológica deverá enviar ao controlador a precipitação atual e em tempo real. A lógica do sistema de automação tratará essas informações de forma que se complementem e sejam utilizadas simultaneamente para reduzir o consumo de energia elétrica e desperdício de água.

A previsão de chuva normalmente é formada por duas informações: a quantidade prevista (mm) e a probabilidade de que a chuva realmente ocorra (%). Na lógica de controle proposta,

a previsão de chuva corrigida pela probabilidade de que a precipitação realmente se confirme, apresentada na equação 4.8, deverá atuar sobre as referências mínima e máxima de água do início do dia, reduzindo os valores de referência proporcionalmente ao produto entre quantidade de chuva e a probabilidade de que ela ocorra. A referência média (lâmina média de água necessária para a lavoura), nesse caso, não será alterada. A justificativa para não alterar a referência média é que a previsão de chuva pode ou não se confirmar, mas a necessidade de água da planta não é alterada. Desta forma, as alterações propostas representam um aumento da tolerância do sistema em relação aos níveis de água e um aumento do tempo de espera para acionar as bombas. Uma observação importante para dar base a esta decisão é que durante os experimentos do projeto, nas safras anteriores, observou-se que o sistema apresentou uma resposta às chuvas bastante lenta.

$$Prev_{CH} = CH \cdot \frac{Prob}{100} \quad (4.8)$$

Onde:

- $Prev_{CH}$ é a previsão de chuva corrigida considerada pelo sistema para alteração das referências das lâminas d'água (mm);
- CH é a quantidade de chuva prevista segundo informações da previsão do tempo do INPE enviada pelo sistema SCADA (mm);
- $Prob$ é a probabilidade de que a chuva se confirme, que é aplicada como fator de correção sobre a previsão de chuva, de acordo com a previsão do tempo do INPE (%).

A estratégia adotada para definir os valores das referências máxima e mínima, de acordo com a previsão do tempo, é descrita a seguir:

- a) No início de cada dia, o controlador deverá receber do sistema SCADA as informações de previsão de chuva e probabilidade de chuva, e calcular o valor da previsão de chuva corrigida ($Prev_{CH}$) a partir da equação 4.8;
- b) Testar se a previsão de chuva corrigida é maior que zero;
- c) Se a previsão de chuva corrigida é maior que zero, a mesma deve ser subtraída das referências mínima (R_{Min_0}) e máxima (R_{Max_0}) de projeto; o resultado é salvo nas variáveis de referência mínima (R_{Min}) e máxima (R_{Max});

c.1) Verificar se a referência mínima é maior ou igual a zero, pois em situações em que existe uma previsão de grande precipitação, a diferença entre a referência mínima de projeto e a previsão de chuva corrigida pode retornar um valor negativo. Se o resultado do teste for positivo, o controlador deve encerrar essa rotina sem fazer mais alterações, executando-a somente no dia seguinte;

c.3) Se a referência mínima apresentar um valor negativo, a mesma deve ser definida com o valor zero, e o valor da referência máxima passa a ser igual ao valor da referência média (R_{Med}). Após isto, o controlador deve encerrar esta rotina e tornar a executá-la somente no dia seguinte;

d) Caso o resultado do teste em “*b*” for falso, os valores de referência de projeto são salvos nas variáveis de referências mínima e máxima, e o controlador encerra a lógica, tornando a executá-la somente no início do dia seguinte;

A Figura 4.7 ilustra o fluxograma da lógica proposta para utilização das previsões de chuvas.

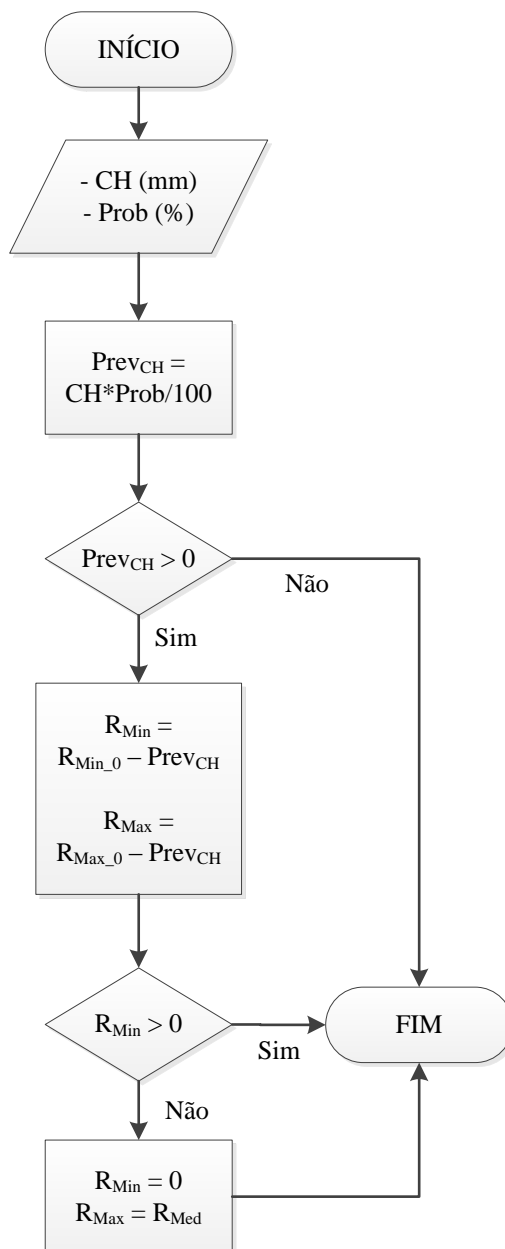


Figura 4.7 - Fluxograma para alteração das referências de acordo com a previsão de chuva

Na Figura 4.8 são apresentados dois gráficos que simulam o comportamento das referências, um em caso de previsão de tempo seco (a) e o outro em caso de previsão de chuva (b). Os valores utilizados para a simulação foram:

- R_{Min} (referência mínima) = 50 mm;
- R_{Med} (referência média) = 60 mm;
- R_{Max} (referência máxima) = 70 mm;
- $Prev_{CH}$ (previsão) = 9 mm (10 mm * 90%).

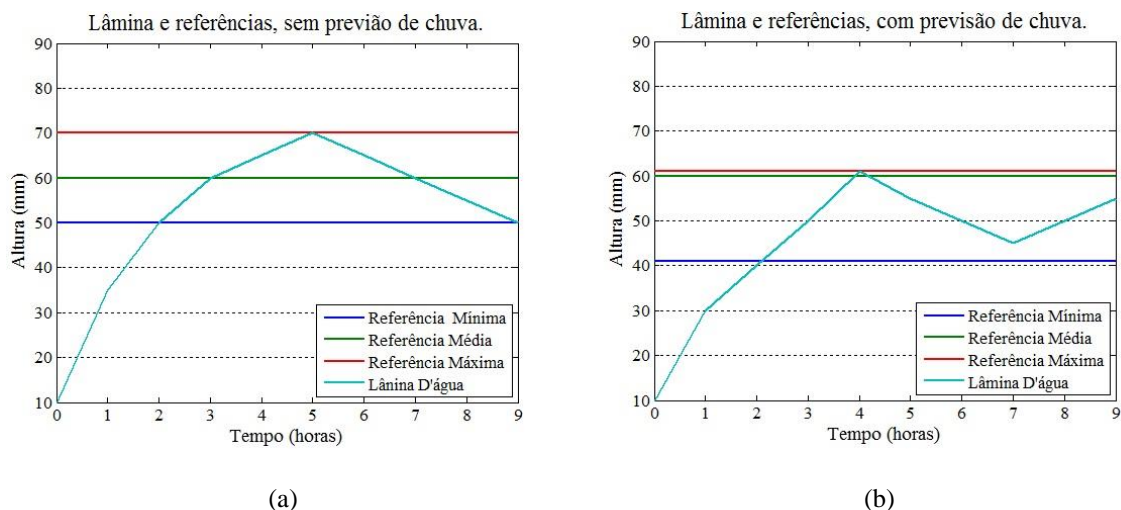


Figura 4.8 - Referência com previsão de tempo seco (a). Referência com previsão de chuva

(b)

Observando a Figura 4.8 (b), nota-se que a altura da lâmina d'água não desceu até a referência mínima para tornar a subir; logo, as bombas não foram acionadas. A justificativa para isto é que a altura da lâmina d'água está sendo elevada devido à precipitação de chuva que está ocorrendo.

A estação meteorológica local é que deverá informar, em tempo real, ao sistema se a chuva prevista pelo INPE se confirmou ou não e, em que quantidade (mm/h). Essa informação combinada à previsão de chuva corrigida deverá atuar sobre o regime de funcionamento das bombas de irrigação. O regime de funcionamento das bombas terá um comportamento diferente para cada combinação de previsão de chuva e quantidade de precipitação que realmente está se confirmando no momento da leitura, de forma a garantir que a lavoura nunca fique com quantidade de água inferior à necessária e que o sistema de bombeamento não trabalhe de forma desnecessária. A filosofia de controle prevê que a lâmina fique sempre oscilando entre a referência mínima e a referência máxima considerando a chuva como parte do sistema.

O controle do regime de funcionamento das bombas de irrigação é feito através da alteração da frequência da tensão aplicada ao conjunto motor-bomba pelo inversor de frequência, conforme visto no Capítulo 3. Em geral, os sistemas de irrigação podem apresentar grandes variações quanto às características do sistema de bombeamento, e também quanto à área a ser irrigada. Desta forma, não é possível determinar com exatidão qual é a melhor rotação para cada um deles. Assim, para que seja possível generalizar a aplicação proposta, o regime de trabalho das bombas será dividido em níveis de frequência. Os valores destes níveis depende-

rão de uma análise da relação entre o sistema de bombeamento e a área a ser irrigada. Na Tabela 4.8, é apresentada a forma como foi definida a divisão dos níveis de frequência.

Tabela 4.8: Divisão dos níveis de frequência.

Descrição	Simbologia
Frequência zero, motor desligado.	f_z
Frequência mínima, 20% da rotação máxima.	f_{min}
Frequência baixa, 35% da rotação máxima.	f_{bx}
Frequência média, 50% da rotação máxima.	f_{med}
Frequência alta, 80% da rotação máxima.	f_{al}
Frequência máxima, 100% da rotação máxima.	f_{max}

A estratégia de controle e os fluxogramas para definir o regime de trabalho das bombas em tempo real, de acordo com a precipitação de chuva, medida através da estação meteorológica local, estão separados por etapas e serão apresentados a seguir.

a) Rotina principal: realiza a leitura dos sensores e define qual sub-rotina executar de acordo com a faixa de referências em que está a altura da lâmina d'água. É necessário destacar que o termo “sub-rotina” está sendo usado como uma forma de simplificação para a apresentação da lógica de controle das bombas e dos fluxogramas que a descrevem.

a.1) Se a altura da lâmina d'água (H_{Lam}) estiver abaixo da referência mínima (R_{Min}), executar a sub-rotina L1, que trata do regime de trabalho nas situações em que a altura da lâmina d'água está abaixo do desejado. Se não, volta ao início da rotina principal. Isto faz com que o programa comece a acionar as bombas somente no instante em que a altura da lâmina d'água esteja abaixo da referência mínima. Desta forma, mantém-se a filosofia de deixar que a lâmina d'água oscile entre as referências mínima e máxima;

a.2) Se a altura da lâmina d'água estiver entre a referência mínima e a referência média (R_{Med}), executar a sub-rotina L2. Senão, voltar a executar a sub-rotina L1, pois a lâmina ainda não atingiu a referência mínima;

a.3) Se a altura da lâmina d'água estiver entre a referência média e a referência máxima (R_{Max}), executar a sub-rotina L3. Senão, voltar a executar sub-rotina L2, pois a lâmina ainda não atingiu a referência média;

a.4) Se a altura da lâmina d'água estiver acima do valor da referência máxima, desligar as bombas e voltar ao início da rotina. Senão, voltar a executar sub-rotina L3, pois a lâmina ainda não atingiu a referência máxima.

O fluxograma apresentado na Figura 4.9 representa a rotina principal desenvolvida. Ressalta-se que a rotina principal apenas define qual sub-rotina executar, de acordo com o nível de água na lavoura.

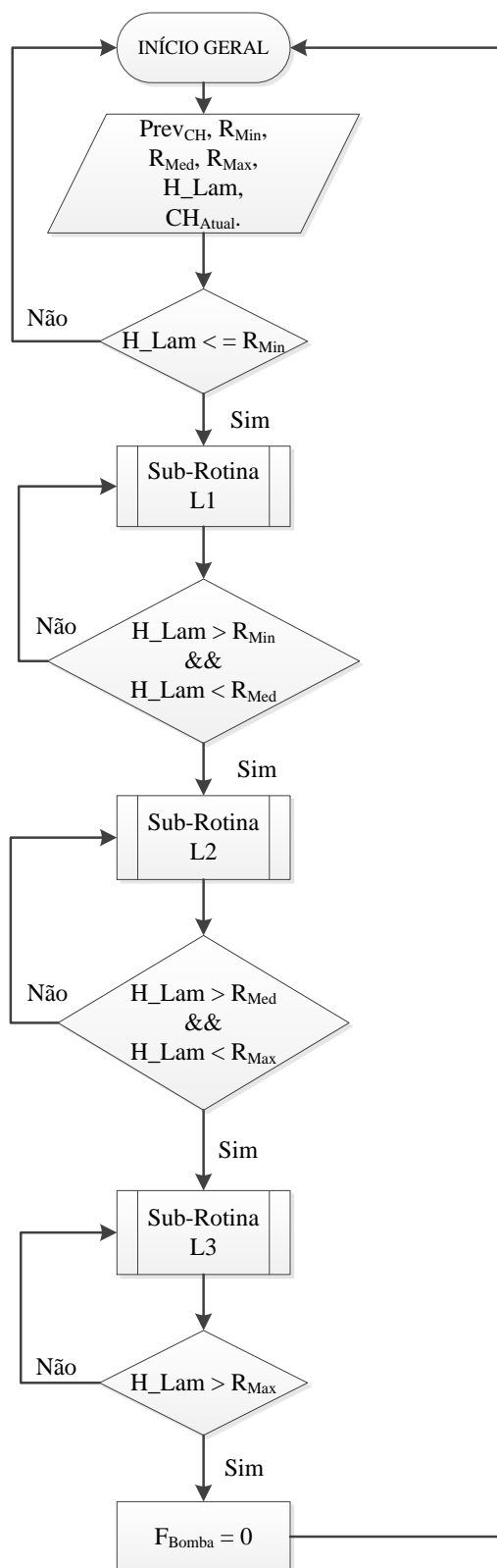


Figura 4.9 - Fluxograma da rotina principal do controle das bombas

b) Sub-Rotina L1: Controla o regime de trabalho das bombas em caso de lâmina d'água inferior à referência mínima. Em uma situação ideal, a altura da lâmina d'água nunca deve estar abaixo da referência mínima, porém é possível que isto ocorra devido a falhas no sistema de energia ou falta de suprimento de água, necessidade do produtor de reduzir a lâmina para realizar algum procedimento na lavoura, ou ainda no início da irrigação. No entanto, em condições normais de funcionamento, a lógica prevê que após a altura da lâmina d'água atingir a referência máxima as bombas são desligadas, voltando a serem acionadas somente quando a altura da lâmina d'água recue à referência mínima.

b.1) Se a previsão de chuva corrigida e a precipitação atual forem iguais a zero, fazer a frequência aplicada à bomba (F_{Bomba}) igual a f_{max} , encerrar a sub-rotina L1 e voltar à rotina principal. Isso faz com que a bomba opere em sua rotação máxima, pois, neste caso, a lavoura está necessitando uma grande quantidade de água do sistema de irrigação. Esta é umas das situações mais críticas do sistema, porque a estimativa é de tempo seco e a altura da lâmina d'água está abaixo da referência mínima;

b.2) Se a previsão de chuva corrigida for igual a zero e a precipitação atual for maior que zero, subtrair a altura da lâmina d'água do valor de referência mínima ($R_{Min}-H_{Lam}$) e armazenar o resultado em uma variável (Dif_{Lam}). A diferença entre a referência mínima e a altura da lâmina d'água é, na realidade, o que falta para a lâmina d'água atingir a referência mínima;

b.2.1) Se a precipitação atual for maior ou igual a Dif_{Lam} , fazer com que a frequência que será aplicada à bomba seja f_{med} , encerrar a sub-rotina L1 e voltar à rotina principal. Apesar da altura da lâmina d'água estar abaixo da referência mínima, existe a perspectiva de que o volume de chuva seja suficiente para elevá-la até esta faixa, pois, neste caso, a precipitação é maior que a diferença entre a referência mínima e a altura da lâmina. Desta forma é possível manter a bomba trabalhando com uma rotação intermediária;

b.2.2) Se a precipitação atual for menor que Dif_{Lam} , ou seja, a precipitação é insuficiente para elevar a lâmina d'água até a faixa da referência mínima, fazer com que a frequência aplicada à bomba seja de f_{al} , encerrar a sub-rotina L1 e voltar à rotina principal. Isto faz com que a lâmina chegue mais rapidamente à faixa da referência míni-

ma, pois mesmo que a chuva esteja se confirmando, o volume é ainda baixo para elevar a altura da lâmina;

b.3) Se a previsão de chuva corrigida for maior que zero e a precipitação atual igual a zero, fazer com que a frequência aplicada a bomba seja de f_{max} , encerrar a sub-rotina L1 e voltar à rotina principal. Esta também é uma das situações críticas do sistema de irrigação, com o agravante de que as referências já estão reduzidas devido à previsão de chuva corrigida.

b.4) Se a previsão de chuva corrigida e a precipitação atual forem maiores que zero, subtrair a altura da lâmina d'água do valor de referência mínima ($R_{Min}-H_{Lam}$) e armazenar o resultado em uma variável (Dif_{Lam}).

b.4.1) Se a precipitação atual for maior ou igual a Dif_{Lam} , fazer com que a frequência que será aplicada à bomba seja f_{al} , encerrar a sub-rotina L1 e voltar à rotina principal. A rotação deve ser alta, pois, apesar da confirmação da chuva em um volume maior que a diferença entre a lâmina d'água e a referência mínima, deve-se considerar que as referências já estão reduzidas devido à previsão de chuva corrigida.

b.4.2) Se a precipitação atual for menor que Dif_{Lam} , fazer com que a frequência aplicada à bomba seja f_{max} , encerrar a sub-rotina L1 e voltar à rotina principal. A diferença deste, para o caso anterior, é que aqui o volume de chuva é inferior à diferença entre a lâmina d'água e a referência mínima, portanto, é necessária uma vazão de água maior para elevar a altura da lâmina até a referência mínima.

O fluxograma representado na Figura 4.10 ilustra a estratégia desenvolvida para tratar o regime de funcionamento das bombas de irrigação em caso de lâmina d'água inferior à referência mínima.

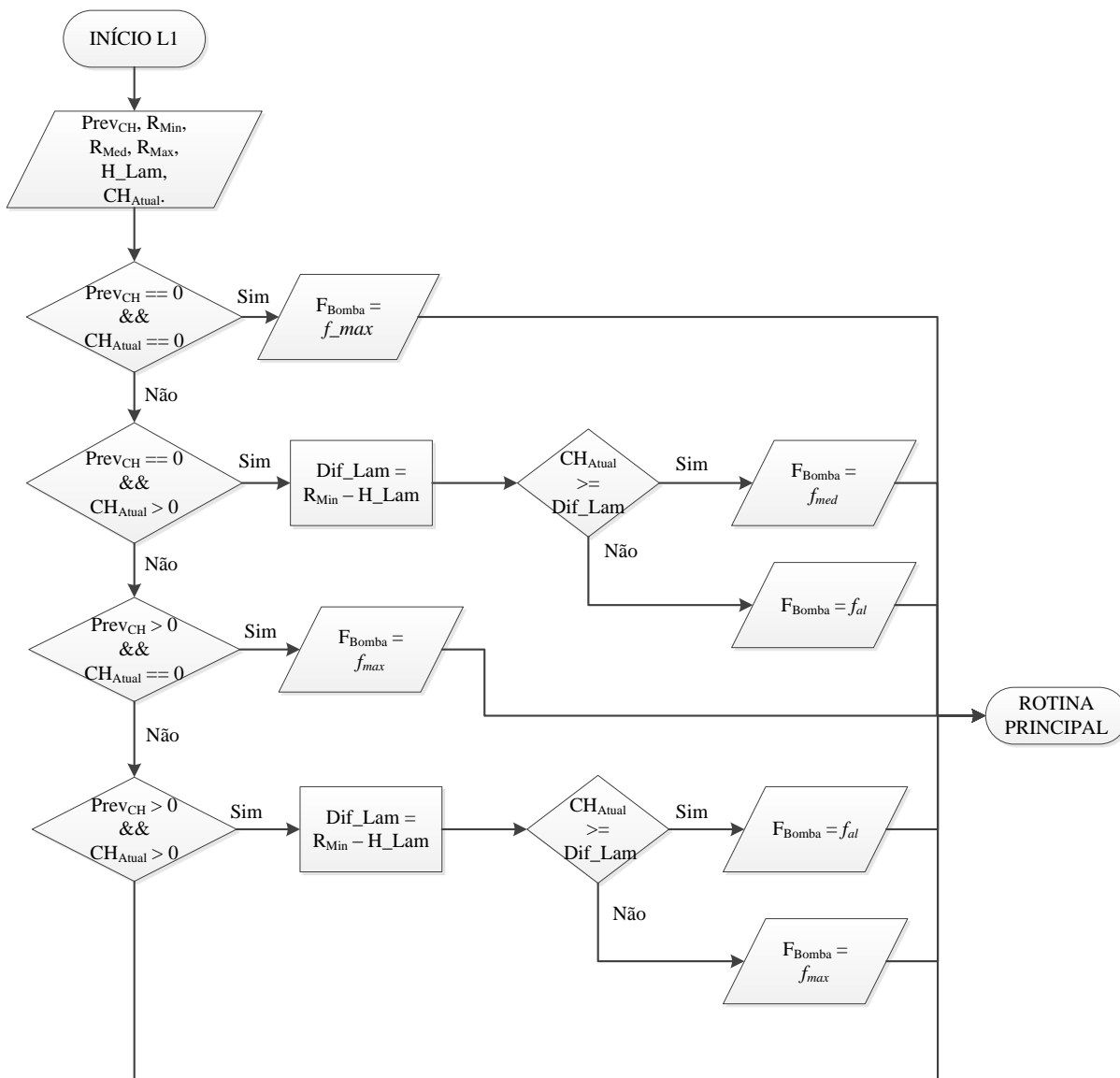


Figura 4.10 - Fluxograma de controle do regime de trabalho das bombas para situação em que a lâmina d'água é inferior à referência mínima (Sub-Rotina L1)

c) *Sub-Rotina L2*: Controla o regime de trabalho das bombas em caso de lâmina d'água superior a referência mínima e inferior à referência média. A Figura 4.11 representa o fluxograma desenvolvido para esta sub-rotina.

c.1) Se a previsão de chuva corrigida e a precipitação atual forem iguais a zero, fazer a frequência aplicada à bomba igual a f_{al} , encerrar a sub-rotina L2 e voltar à rotina principal;

c.2) Se a previsão de chuva corrigida for igual a zero e a precipitação atual for maior que zero, subtrair a altura da lâmina d'água do valor de referência média ($R_{Med} - H_{Lam}$) e

armazenar o resultado em uma variável (Dif_Lam). A diferença entre a referência mínima e a altura da lâmina d'água é o que falta para a lâmina d'água atingir a referência média;

c.2.1) Se a precipitação atual for maior ou igual a Dif_Lam , fazer com que a frequência que será aplicada à bomba seja f_{min} , encerrar a sub-rotina L2 e voltar à rotina principal. Como a previsão de chuva corrigida é igual a zero, ou seja, não houve alteração nos valores das referências, e a precipitação atual é superior diferença entre a lâmina d'água e a referência média, considera-se que o sistema está operando com folga e as bombas podem trabalhar em rotação mínima;

c.2.2) Se a precipitação atual for menor que Dif_Lam , ou seja, a precipitação é insuficiente para elevar a lâmina d'água até a faixa da referência média, fazer com que a frequência aplicada à bomba seja de f_{bx} , encerrar a sub-rotina L2 e voltar à rotina principal. O sistema ainda está operando com folga, apesar de a lâmina estar abaixo da referência média, a precipitação de chuva não prevista auxilia no trabalho das bombas;

c.3) Se a previsão de chuva corrigida for maior que zero e a precipitação atual igual a zero, fazer com que a frequência aplicada a bomba seja de f_{al} , encerrar a sub-rotina L2 e voltar à rotina principal. Deve-se tomar o cuidado para que o nível da lâmina d'água não fique muito abaixo da referência média, pois a referência mínima foi modificada devido à previsão de chuva corrigida;

c.4) Se a previsão de chuva corrigida e a precipitação atual forem maiores que zero, subtrair a altura da lâmina d'água do valor de referência média ($R_{Med}-H_Lam$) e armazenar o resultado em uma variável (Dif_Lam);

c.4.1) Se a precipitação atual for maior ou igual a Dif_Lam , fazer com que a frequência que será aplicada à bomba seja f_{med} , encerrar a sub-rotina L2 e voltar à rotina principal. Apesar de a lâmina estar abaixo da referência média, a expectativa é de que com a precipitação atual seja possível que a lâmina chegue à referência com uma rotação intermediária;

c.4.2) Se a precipitação atual for menor que Dif_Lam , fazer com que a frequência aplicada à bomba seja f_{al} , encerrar a sub-rotina L2 e voltar à rotina principal.

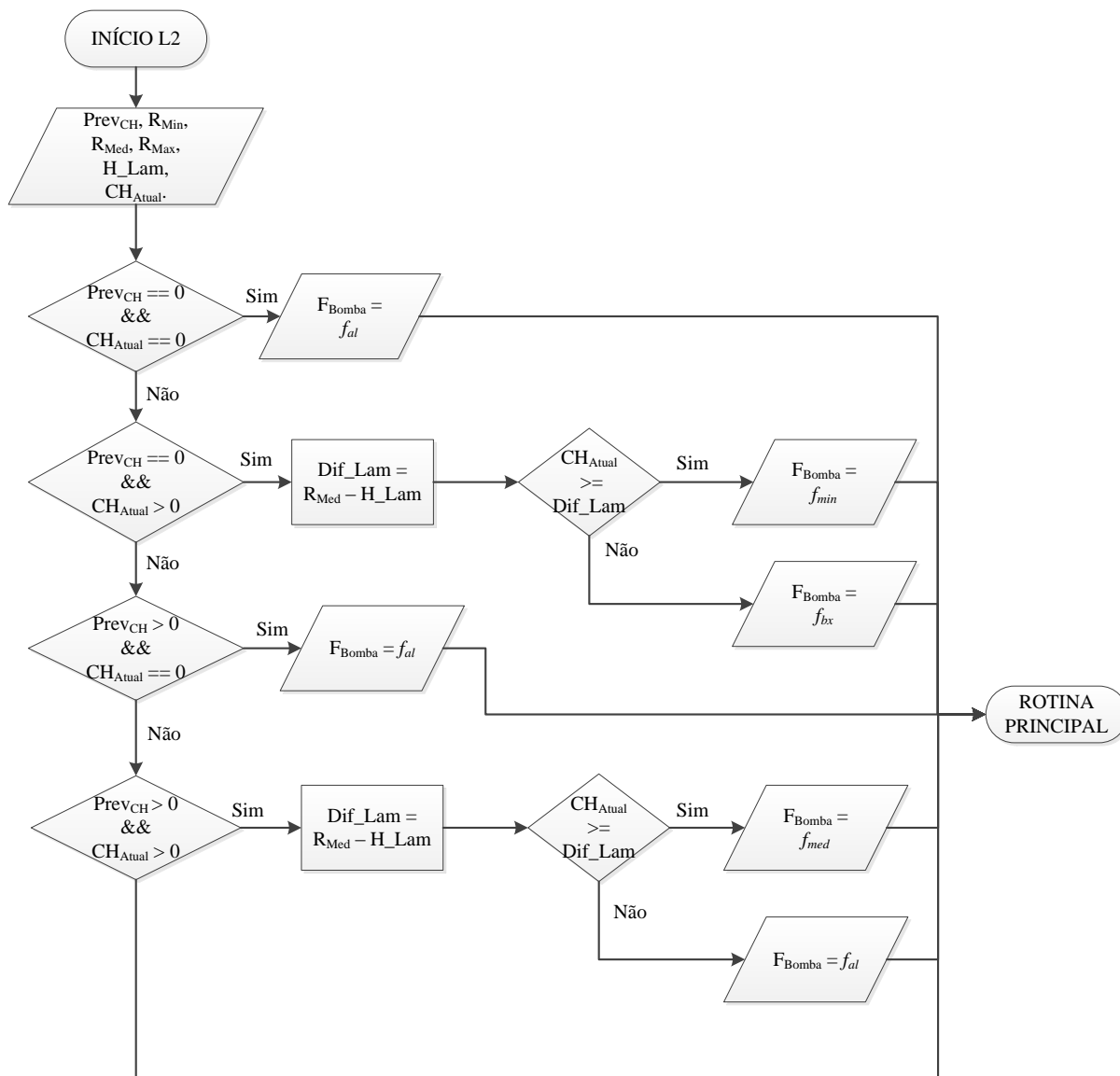


Figura 4.11 - Fluxograma de controle do regime de trabalho das bombas para situação em que a lâmina d'água está na faixa entre a referência mínima e a referência média (Sub-Rotina L2)

d) *Sub-Rotina L3*: Controla o regime de trabalho das bombas em caso de lâmina d'água entre as faixas de referência média e máxima. A Figura 4.12 representa o fluxograma desenvolvido para esta sub-rotina.

d.1) Se a previsão de chuva corrigida e a precipitação atual forem iguais a zero, fazer a frequência aplicada à bomba igual a f_{med} , encerrar a sub-rotina L3 e voltar à rotina principal;

d.2) Se a previsão de chuva corrigida for igual a zero e a precipitação atual for maior que zero, subtrair a altura da lâmina d'água do valor de referência média ($R_{Max} - H_{Lam}$) e

armazenar o resultado em uma variável (Dif_Lam). A diferença entre a referência mínima e a altura da lâmina d'água é o que falta para a lâmina d'água atingir a referência máxima;

d.2.1) Se a precipitação atual for maior ou igual a Dif_Lam , fazer com que a frequência que será aplicada à bomba seja f_z (desligar a bomba), encerrar a sub-rotina L3 e voltar à rotina principal;

d.2.2) Se a precipitação atual for menor que Dif_Lam , ou seja, a precipitação é insuficiente para elevar a lâmina d'água até a faixa da referência máxima, fazer com que a frequência aplicada à bomba seja de f_{min} , encerrar a sub-rotina L3 e voltar à rotina principal;

d.3) Se a previsão de chuva corrigida for maior que zero e a precipitação atual igual a zero, fazer com que a frequência aplicada a bomba seja de f_{med} , encerrar a sub-rotina L3 e voltar à rotina principal;

d.4) Se a previsão de chuva corrigida e a precipitação atual forem maiores que zero, subtrair a altura da lâmina d'água do valor de referência máxima ($R_{Max}-H_Lam$) e armazenar o resultado em uma variável (Dif_Lam);

d.4.1) Se a precipitação atual for maior ou igual a Dif_Lam , fazer com que a frequência que será aplicada à bomba seja f_{bx} , encerrar a sub-rotina L3 e voltar à rotina principal;

d.4.2) Se a precipitação atual for menor que Dif_Lam , fazer com que a frequência aplicada à bomba seja f_{med} , encerrar a sub-rotina L3 e voltar à rotina principal.

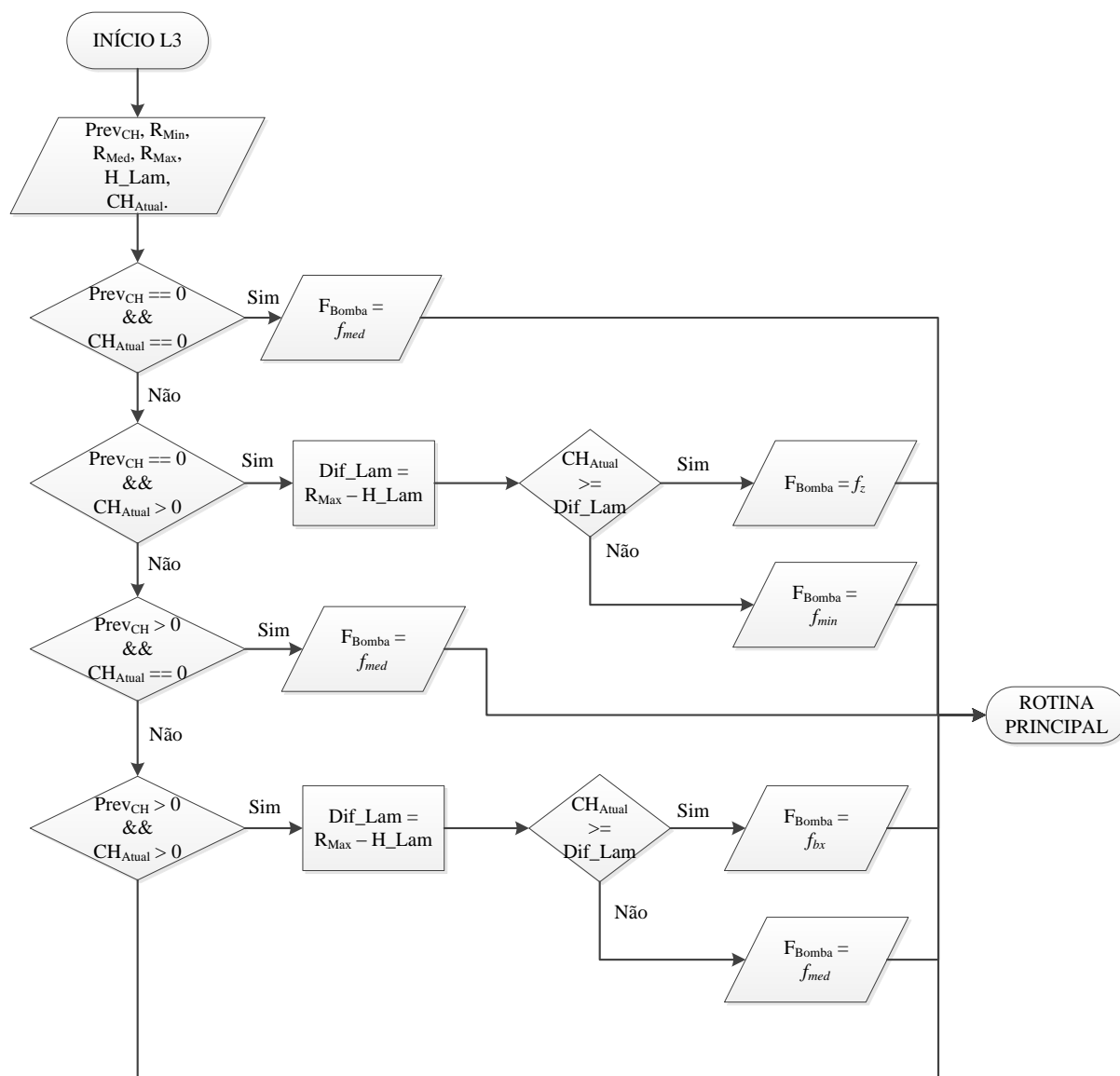


Figura 4.12 - Fluxograma de controle do regime de trabalho das bombas para situação em que a lâmina d'água está na faixa entre a referência média e a referência máxima (Sub-Rotina L3)

Na Figura 4.13 é apresentado um exemplo do comportamento da bomba de irrigação de acordo com o clima as medidas de altura de lâmina d'água. Na simulação foram utilizados os mesmos dados apresentados na Figura 4.8.

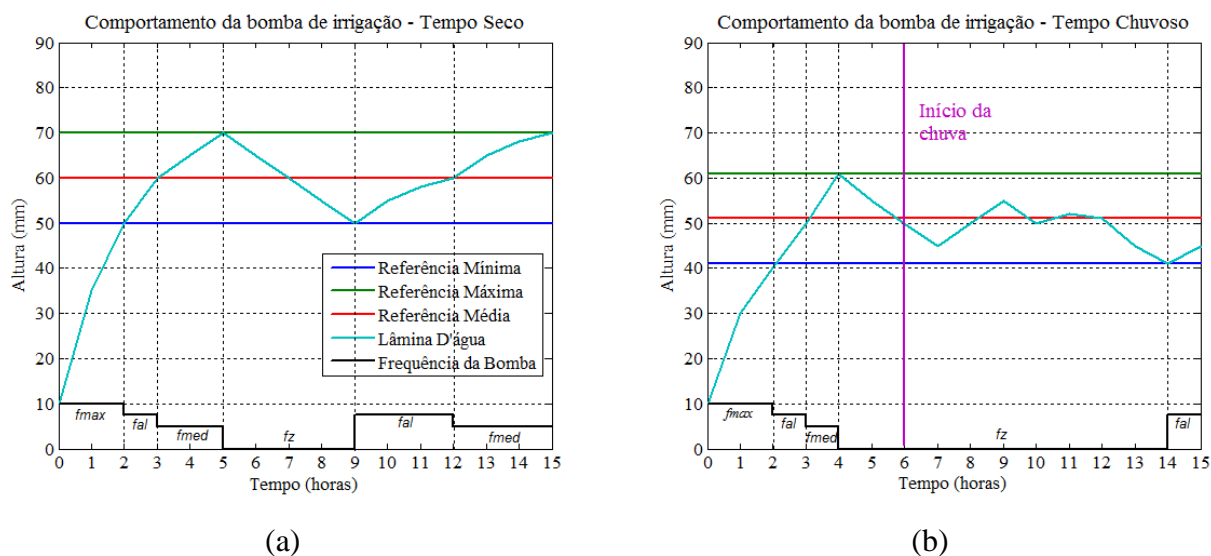


Figura 4.13 – Comportamento da bomba de irrigação em tempo seco (a). Comportamento da bomba de irrigação em tempo chuvoso (b)

Nota-se que com o início da chuva, foi possível manter a bomba desligada por um período maior que na situação com o tempo seco. É possível também identificar que na situação em que há previsão do tempo a bomba é desligada antes. A Tabela 4.9 apresenta uma comparação quanto aos tempos de funcionamento da bomba de irrigação de acordo com q previsão de chuva.

Tabela 4.9: Regime de trabalho da bomba de irrigação (com e sem chuva).

Frequência da Bomba de Irrigação	Horas Acionada	
	Tempo Seco	Tempo Chuvoso
f_z	4 horas	10 horas
f_{min}	-	-
f_{bx}	-	-
f_{med}	5 horas	1 hora
f_{al}	4 horas	2 horas
f_{max}	2 horas	2 horas
<i>Tempo ligada</i>	11 horas	5 horas
<i>Tempo desligada</i>	4 horas	10 horas

Neste cenário, a precipitação de chuva proporcionou um tempo de seis horas a mais com a bomba de irrigação desligada e ainda reduziu os tempos com a bomba ligada em f_{al} e f_{med} . Então, é possível concluir que a utilização da previsão de chuva no controle do regime de funcionamento das bombas de irrigação certamente aumentaria a eficiência energética do sistema de irrigação, e reduziria o uso de água da fonte hídrica da lavoura.

Na região de Uruguaiana, por exemplo, a precipitação de chuva acumulada média nas últimas duas safras foi de aproximadamente 730mm/safra (SINDA, 2013), o que comprova a relevância do monitoramento e utilização desses dados na automação da irrigação para aumentar a eficiência energética.

Existem, ainda, outras variáveis climáticas que podem influenciar nas perdas hídricas da lavoura devido a um fenômeno chamado de evapotranspiração. A evapotranspiração representa a perda de líquido para a atmosfera através da combinação entre a evaporação de água na superfície da lavoura e a transpiração da planta. Desta forma, o monitoramento das condições climáticas para aumentar a inteligência do sistema de automação da irrigação de lavouras de arroz pode ser abordado sob dois aspectos: a economia de energia e água com o correto uso das águas das chuvas, conforme apresentado neste capítulo, e a compensação das perdas de água na lavoura pelo fenômeno da evapotranspiração. É importante destacar que a evapotranspiração não é a única fonte de perdas de água na produção de arroz, porém é a única que é totalmente dependente das condições climáticas. A evapotranspiração, juntamente com os principais agentes causadores de perdas de água na lavoura são abordados na Seção 4.4.2 deste trabalho.

4.5 Proposta de uma estratégia para compensação de perdas de água na lavoura em horário de ponta

O processo de irrigação, da maneira como está proposto nesse trabalho, é feito em duas etapas: inicialmente toda a água enviada à lavoura é utilizada para elevar a lâmina d'água até os valores de referência de projeto; após isto, toda a requisição de água pela lavoura é destinada à compensação das perdas hídricas. Estas requisições são identificadas pelos sensores e são compensadas automaticamente pelo sistema de irrigação, através das medidas enviadas ao controlador e da alteração do regime de funcionamento das bombas. Entretanto, deve-se considerar que a estação de bombeamento é desligada durante três horas por dia, exceto em feriados e finais de semana, devido ao horário de ponta (Seção 4.4.1). Neste período, não é adequado compensar as perdas de água da lavoura devido ao alto preço da energia, mesmo que os sensores continuem monitorando a lâmina. Como o objetivo é manter a lavoura com o mínimo de água necessário e, por consequência, consumindo o mínimo de energia elétrica possível, desligar o sistema de irrigação por um período de três horas e sem compensar as perdas de água torna-se um procedimento inadequado para manter a qualidade da plantação, pois pode causar a ocorrência de lâmina insuficiente para o crescimento ideal da planta. Assim,

torna-se necessário criar uma estratégia para que o horário de ponta não cause maiores prejuízos à produção. Essa Seção apresenta uma solução baseada na utilização dos recursos de automação, e que podem ser utilizados para compensar antecipadamente a falta de irrigação no horário de ponta.

4.5.1 Horário de ponta

Segundo a definição da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), *“horário de ponta é um período definido pela concessionária de energia, composto de três horas consecutivas, com exceção de sábados, domingos e feriados definidos por lei federal, nas quais ocorrem os picos de consumo de energia elétrica. Essa definição é feita de acordo com a curva de carga de cada distribuidora”*. Já o horário fora-ponta corresponde às vinte e uma horas restantes do dia.

No intuito de reduzir o consumo de energia elétrica pelos grandes consumidores nestes períodos, a ANEEL definiu a modalidade tarifária horo-sazonal, na qual o custo da energia se torna muito maior em horário de ponta que o custo em horário fora de ponta. Os consumidores irrigantes, em sua grande maioria classificados no grupo de consumidores A-4, tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV podem escolher o enquadramento entre tarifa horo-sazonal verde ou horo-sazonal azul.

Na tarifa horo-sazonal verde, o custo da demanda não apresenta diferenciação pelo período do dia, ou seja, não são levados em consideração os horários de ponta e fora-ponta; o que se paga, na verdade, é a demanda que foi contratada pelo cliente e o valor correspondente à ultrapassagem de demanda, em casos em que o cliente exceda a demanda contratada. Já o valor da energia é proporcional à soma dos consumos em horário de ponta e horário fora-ponta, que têm valores diferenciados, no intuito de incentivar o consumidor a utilizar o mínimo possível de energia em horário de ponta.

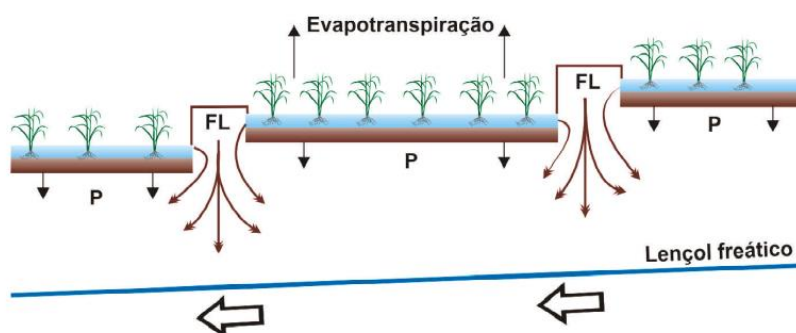
No que tange ao consumo de energia, a tarifa horo-sazonal azul possui as mesmas regras da tarifa verde; o que as difere é a forma como a demanda é contratada. A demanda contratada na tarifa azul é dividida em duas parcelas: demanda contratada de ponta e demanda contratada fora-ponta. Mantendo a mesma filosofia do custo do consumo de energia, a demanda contratada de ponta é consideravelmente mais cara que a demanda contratada fora-ponta.

A concessionária de energia elétrica AES Sul, que atende a área de testes do projeto de automação da irrigação da Unipampa, foi autorizada pela ANEEL a adotar o escalonamento

de horário de ponta para os consumidores irrigantes produtores de arroz do Estado do Rio Grande do Sul, com o objetivo de evitar o carregamento das subestações da concessionária nos períodos de outubro a abril e a ociosidade no período restante. Esta medida, além de melhorar o perfil de tensão e a qualidade da energia fornecida, tem como objetivo postergar investimentos no setor. O escalonamento divide o horário de ponta em oito intervalos de três horas durante o dia. Estes intervalos são distribuídos uniformemente aos consumidores, que deverão aceitar de forma voluntária este procedimento. Como cada conjunto irrigante terá um horário de ponta diferente, as subestações poderão trabalhar de uma forma mais uniforme.

4.5.2 Tipos de perdas de água nas lavouras irrigadas

O volume de água necessário para a produção do arroz é aquele utilizado para a planta crescer e transpirar. Entretanto, uma grande quantidade de água deve ser utilizada na tentativa de compensar as perdas hidráulicas da lavoura. De acordo com a Embrapa, a eficiência hídrica de lavouras de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul pode atingir de 50% a 60%, em condições normais (EMBRAPA, 2005). As perdas de água na produção do arroz se devem principalmente às características físicas do solo, às condições climáticas e à ineficiência das tubulações e canais de irrigação. Os principais agentes causadores de perdas de água na lavoura, expostos na Figura 4.14, são a evapotranspiração, a percolação (P) e o fluxo lateral (FL). Já as perdas hidráulicas nas tubulações e canais de irrigação são inerentes somente ao sistema de condução de água, portanto não são consideradas perdas da lavoura.



Fonte: STONE, 2005

Figura 4.14 - Perdas hídricas na lavoura de arroz

A evapotranspiração representa a combinação da transpiração da planta e a evaporação da água da superfície da lavoura. Estes dois componentes normalmente são estudados juntos devido à dificuldade de separá-los experimentalmente e, também, pois quando se analisa de

forma combinada, o fenômeno deixa de ser função da fase de desenvolvimento da planta e passa a ser regido somente pelo clima. Outra observação importante é que para o manejo da irrigação não é interessante a análise individual dos componentes. Na verdade, importa apenas quantificar a perda de água gerada por eles (STONE, 2005). Apesar de se falar em perdas de água por evapotranspiração, deve-se observar que a transpiração é um fenômeno natural da planta, necessário ao seu desenvolvimento. Já a evaporação da água da superfície da lavoura pode ser classificada como perda de água. Diferentemente de outras formas de perdas hídricas na lavoura, a evapotranspiração não pode ser controlada ou atenuada, por ser função exclusivamente do clima.

A taxa de evapotranspiração está relacionada com a temperatura e umidade do ar, com o movimento dos ventos e com a intensidade e duração da irradiação solar. Estima-se que 48% do total de perdas hídricas em uma lavoura são devido à evapotranspiração (CAUDURO, 1996). No Rio Grande do Sul, os valores de água demandados pela evapotranspiração, para qualquer safra, oscilam entre 4 e 7 mm por dia de acordo com as condições climáticas, podendo chegar a 10 mm por dia (HELFER, 2006). Existem diversas formas para estimar a taxa de evapotranspiração, porém, segundo a FAO (*Food and Agriculture Organization*) o método de Penman-Monteith, apresentado na equação 4.9, é reconhecido como padrão para realizar a estimativa (ULIANA et al., 2011).

$$ETP = \frac{0,408 \cdot s \cdot (R_N - G) + \frac{\gamma \cdot 900 U_2 \cdot (e_s - e_a)}{T + 273}}{s + \gamma} \quad (4.9)$$

$$(1 + 0,34 \cdot U_2)$$

Onde:

- ETP é a taxa de evapotranspiração diária (mm);
- R_N é a radiação líquida total diária ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);
- G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);
- γ é a constante psicrométrica ($0,063 \text{ KPa}^\circ\text{C}^{-1}$);
- U_2 é a velocidade do vento a 2 metros de altura (m s^{-1});
- e_s é a pressão de saturação de vapor (KPa);
- e_a é a pressão parcial de vapor (KPa);
- s é declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar ($\text{KPa }^\circ\text{C}^{-1}$).

Entretanto, devido a grande dificuldade de dispor de todas as variáveis da equação, diversos autores vêm desenvolvendo métodos alternativos para determinar a taxa de evapotranspiração em diferentes condições climáticas. Assim, neste trabalho será usada uma destas alternativas, o método de Benavides e Lopez, que tem como principal característica apresentar uma boa aproximação dos resultados encontrados pelo método de Penman-Monteith para climas subtropicais úmidos através de metodologia bastante simples (BENAVIDES e LOPEZ, 1970). Este método foi desenvolvido em 1970 por Garcia Benavides e Lopez Diaz e é baseado na temperatura média diária e na umidade relativa do ar. A estimativa da evapotranspiração diária é dada pela equação 4.10.

$$ET_{BL} = 1,21 \cdot 10 \cdot \left(\frac{7,45 \cdot T_{med}}{237,4 + T_{med}} \right) \cdot (1 - 0,01 \cdot UR_{med}) + (0,21 \cdot T_{med}) - 2,30 \quad (4.10)$$

Onde:

- ET_{BL} é a taxa de evapotranspiração diária estimada pelo método de Benavides e Lopez (mm);
- T_{med} é a temperatura média diária ou do período da estimativa (°C);
- UR_{med} é a umidade relativa do ar média diária ou do período da estimativa (%).

É necessário corrigir o valor encontrado para estimar as perdas por evapotranspiração apenas para o período de três horas do horário de ponta, já que a taxa estimada considera um período de um dia inteiro. A correção é apresentada na equação 4.11.

$$ET_{HP} = ET_{BL} \cdot \frac{3}{24} \quad (4.11)$$

Onde:

- ET_{HP} é a taxa de evapotranspiração estimada para o horário de ponta (mm).

A percolação, conforme é visto na Figura 4.14, é o movimento da água em direção ao lençol freático, já a percolação lateral (ou fluxo lateral) é o movimento lateral da água subsuperficial através dos quadros até as extremidades da lavoura por onde a água realmente se perde. O destino da água perdida por fluxo lateral pode ser um dreno (um riacho ou um rio), ou ainda, áreas não plantadas vizinhas à lavoura. Na prática é difícil separar os dois fenôme-

nos. As características físicas do solo são determinantes nas perdas por percolação e fluxo lateral. Fatores como condutividade hidráulica do solo, relevo, tipo de solo, distância até o lençol freático, distância até o dreno e relação entre área e perímetro da lavoura são os mais importantes. Diferentemente das perdas por evapotranspiração, as perdas por percolação e fluxo lateral podem ser atenuadas através de um bom planejamento da plantação. Idealmente, a quantidade de água necessária para a plantação é aquela utilizada para saturar o solo, formar a lâmina e compensar a evapotranspiração. Então, quanto maior forem as perdas por percolação e fluxo lateral, maior será o real desperdício de água e energia pela lavoura, e menor será a sua eficiência.

Existem muitos estudos que quantificam as perdas por percolação e fluxo lateral para diferentes tipos de solo, tamanhos de lavouras, tipos de relevo, e etc. No entanto, não existe uma metodologia padrão para realizar esta estimativa. Na Tabela 4.10 é apresentado um exemplo onde as perdas são quantificadas de acordo com a textura do solo por dois autores diferentes, conforme apresentado por (STONE, 2005). Há, ainda, na bibliografia autores que estimam as perdas somente de acordo com a relação entre área e perímetro, ou de acordo com o relevo, ou, ainda, de acordo com a distância entre a lavoura e o dreno. Todas essas estimativas são feitas de forma experimental, ou seja, em condições específicas dos locais onde são executados os experimentos.

Tabela 4.10: Perdas de água por percolação e fluxo lateral de acordo com a textura do solo.

Textura do Solo	Perdas de água ¹ por percolação e fluxo lateral (mm.dia ⁻¹)	
	Autor 1	Autor 2
Argilosa	13	10
Franco-argilosa	15	14
Franca	-	17
Franco-arenosa	-	23
Arenosa	27	27

¹ A evapotranspiração está incluída no resultado.

Fonte: Adaptado de STONE, 2005

Estima-se que o volume de água demandado para as perdas por fluxo lateral e percolação em lavouras de arroz é da ordem de 35,5% da demanda total de água utilizada na produção e que, deste percentual, apenas 0,5% são perdidos por percolação em solos de várzea, caso da grande maioria das lavouras do Rio Grande do Sul (CAUDURO, 1996). Então, como o objetivo é propor uma forma de compensar as perdas por percolação e fluxo lateral durante o horário de ponta, e não uma metodologia para determiná-las precisamente, pode-se fazer uma

ligação entre a evapotranspiração, estimada pela equação 4.10, e as perdas por percolação e fluxo lateral, de acordo com os seus percentuais. Assim, conhecendo a taxa de evapotranspiração diária, estimada pela equação 4.10, e sabendo que a estimativa é que sua representatividade no uso da água seja de, em média, 48 % e, ainda, considerando que é mantida a proporcionalidade entre as perdas, é possível quantificar, de forma aproximada, a percolação e o fluxo lateral a partir da relação apresentada na equação 4.12.

$$PF = ET_{BL} \cdot \frac{0,355}{0,48} \quad (4.12)$$

Onde:

- PF é a estimativa de perdas diária por percolação e fluxo lateral (mm);
- ET_{BL} é a evapotranspiração estimada (mm).

E a estimativa de perdas por percolação e fluxo lateral corrigida para o horário de ponta é apresentada na equação 4.13.

$$PF_{HP} = PF \cdot \frac{3}{24} \quad (4.13)$$

Onde:

- PF_{HP} é a estimativa de perdas por percolação e fluxo lateral em horário de ponta (mm).

Finalmente, somam-se todas as perdas para encontrar a perda total estimada para o período de três horas do horário de ponta, conforme a equação 4.14.

$$Perdas_{HP} = ET_{HP} + PF_{HP} \quad (4.14)$$

Onde:

- $Perdas_{HP}$ é a perda total estimada no período de horário de ponta (mm).

4.5.3 Estratégia proposta

A estratégia proposta para compensar as perdas hídricas em horário de ponta utiliza a mesma filosofia utilizada na seção 4.4, que consiste em alterar as referências mínima e máxima de lâmina d'água, ao invés de modificar o regime de funcionamento das bombas. Entre-

tanto, para compensar as perdas, as referências devem ser elevadas e não reduzidas, como no caso da previsão de chuvas. Na proposta, as informações utilizadas para o cálculo do deslocamento das referências devem ser lidas na estação meteorológica local sempre uma hora antes do início do horário de ponta. Assim, a reposição de água que será perdida no horário de ponta é repostada antes do seu início. Desta forma, o sistema se antecipa às perdas que irão ocorrer no horário de ponta, devido ao desligamento das bombas. Esta estratégia se justifica pelo fato de o sistema estar sempre trabalhando com o mínimo de água possível na lavoura e uma insuficiência de água pode ser altamente prejudicial à plantação. O algoritmo desenvolvido para implementação da estratégia proposta é descrito a seguir, juntamente ao seu fluxograma, que é apresentado na Figura 4.15.

- a) Se o horário atual (*Hora*) é igual ao horário de ponta (*H_Ponta*) menos uma hora, o programa deve fazer a leitura dos dados da estação meteorológica, calcular a taxa de evapotranspiração diária (ET_{BL}) e corrigi-la para o horário de ponta (ET_{HP}), através das equações 4.10 e 4.11. É válido mencionar que o controlador utilizado no projeto deve ter um relógio em tempo real (*RTC, Real Time Clock*) implementado em seu *firmware*, facilitando o desenvolvimento do código proposto;
- b) Com base na evapotranspiração estimada, calcular as perdas por percolação e fluxo lateral (PF) e corrigi-los para o horário de ponta (PF_{HP}), através das equações 4.12 e 4.13;
- c) Somar as perdas por evapotranspiração, percolação e fluxo lateral, através da equação 4.14;
- d) Corrigir os valores das referências mínima e máxima, somando-as às perdas ($Perdas_{HP}$) e manter esses valores de referência até que a hora atual seja maior ou igual ao horário de ponta;
- e) Se a hora atual for maior ou igual ao horário de ponta, ou seja, as bombas já estão desligadas, alterar os valores de referência, fazendo com que voltem aos seus valores iniciais. Encerrar este fluxo e entrar novamente somente quando a condição “a” voltar a ser verdadeira.

No Anexo III deste trabalho é apresentado o código desenvolvido com base nas lógicas e fluxogramas apresentados neste capítulo.

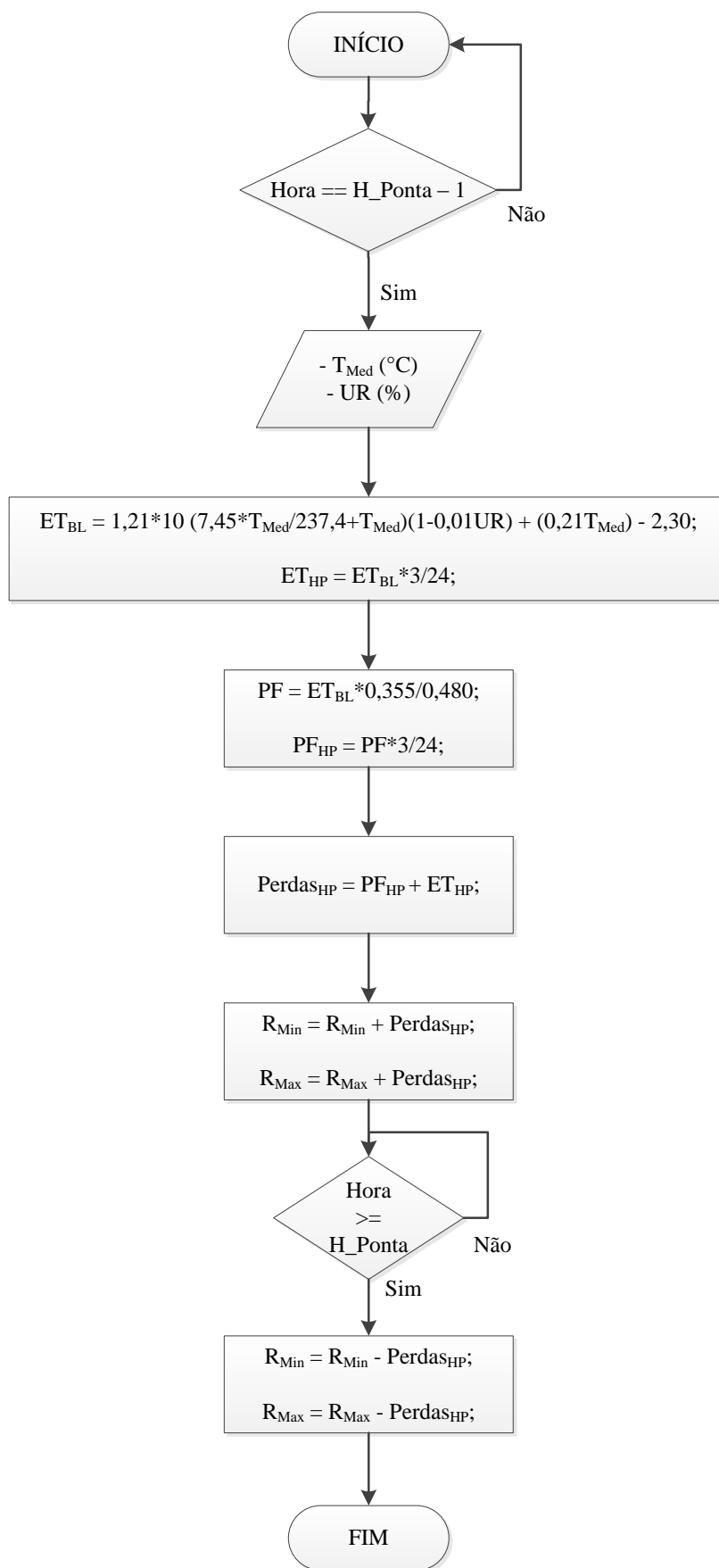


Figura 4.15 - Fluxograma de alteração das referências devido ao horário de ponta

5 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica é um procedimento fundamental para avaliar a aplicabilidade de qualquer projeto. Através desta análise é possível concluir sobre a viabilidade econômica da aplicação e identificar quais fatores podem torná-la inviável. A proposta de automação da irrigação de lavouras de arroz tem o objetivo de melhorar a eficiência energética deste tipo de cultura, proporcionando a redução do custo da produção e desonerando as redes de distribuição de energia elétrica. Além disto, é possível reduzir o uso da água pelo sistema de irrigação, o que, apesar de normalmente não representar custo financeiro ao produtor, tem alto impacto ambiental.

A análise econômica que será realizada deverá considerar apenas as lavouras de arroz irrigado do Estado do Rio Grande do Sul. Para tal, serão avaliados os custos de equipamentos utilizados para implementar uma aplicação típica do projeto, e a estimativa de redução no consumo de energia elétrica proporcionado. A aplicabilidade em âmbito estadual será desenvolvida com base em dados fornecidos pelo IRGA, onde são abordados os custos de produção, a produtividade, a área plantada e a produção de arroz no Estado. Os dados utilizados são referentes à safra 2011/2012.

5.1 Custo de equipamentos

Na Tabela 5.1 são apresentados os equipamentos básicos que devem ser empregados para o desenvolvimento da automação, de acordo com a proposta deste trabalho. Os custos com os equipamentos de potência e de hidráulica não serão abordados, visto que se considera que a aplicação seja aplicada em lavouras que já possuam toda a infraestrutura de potência e tubulações. A quantidade de equipamentos pode variar de duas formas: de acordo com a quantidade de levantes e com o tamanho da lavoura.

Tabela 5.1: Equipamentos utilizados na aplicação.

Equipamento	Quantidade/Variação
Sensores de nível ultrassônicos com transmissão de dados	Variação de acordo com tamanho e características da lavoura
Controlador lógico programável	Variação de acordo com a quantidade de levantes
Sistema de supervisão SCADA	Único para toda a aplicação.
Modem GPRS	Variação de acordo com a quantidade de levantes
Estação meteorológica	Única para toda a aplicação.

Na Tabela 5.2 são apresentados os custos médios para aquisição dos equipamentos empregados na aplicação. Os custos são referentes a equipamentos que possuem as funcionalidades necessárias para o desenvolvimento da aplicação. Com exceção dos sensores, que são equipamentos utilizados para o monitoramento da água, todos os demais equipamentos são utilizados no controle da aplicação. A base de preços tem como referência o ano de 2012.

Tabela 5.2: Custo dos equipamentos empregados na aplicação.

Equipamento	Valor Total
Controlador lógico programável	R\$ 11.000,00
Sistema Supervisório SCADA	R\$ 7.000,00
Modem GPRS	R\$ 600,00
Estação meteorológica	R\$ 2.500,00
Sensores de nível ultrassônicos com transmissão de dados (par) ⁶	R\$ 8.000,00

Utilizando o exemplo da seção 4.1.2.3 em que, para uma lavoura de 250 hectares, foi estimado que fossem necessários 400 sensores para realizar o monitoramento da água considerando o solo sistematizado em desnível e 220 sensores considerando o solo sistematizado em nível, é possível calcular, como mostram as Tabelas 5.3 e 5.4, o custo total da aplicação para a lavoura do exemplo. O exemplo considera, ainda, que toda a área é irrigada por somente um levante.

Tabela 5.3: Custo total da aplicação de exemplo – solo sistematizado em desnível.

Equipamento	Qtde	Valor Unitário	Valor Total
Controlador lógico programável	01	R\$ 11.000,00	R\$ 11.000,00
Sistema Supervisório SCADA	01	R\$ 7.000,00	R\$ 7.000,00
Modem GPRS	01	R\$ 600,00	R\$ 600,00
Estação meteorológica	01	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00
Sensores de nível ultrassônicos com transmissão de dados	200*	R\$ 8.000,00	R\$ 1.600.000,00
Custo Total de Equipamentos			R\$ 1.621.100,00

*Kit de sensores é formatado em pares.

Tabela 5.4: Custo total da aplicação de exemplo – solo sistematizado em nível.

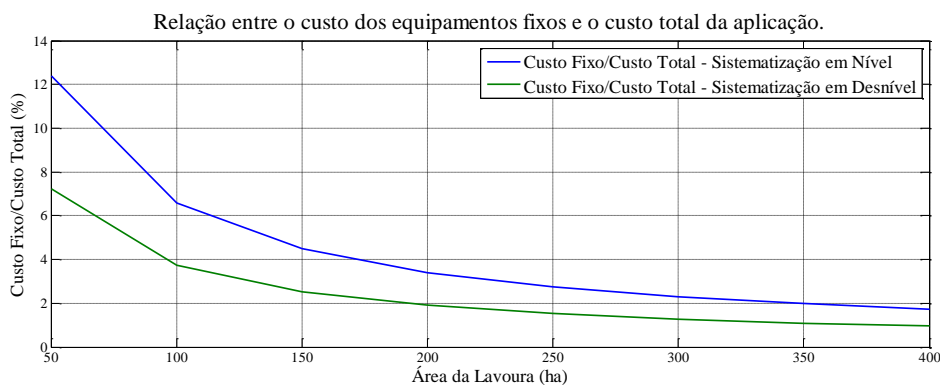
Equipamento	Qtde	Valor Unitário	Valor Total
Controlador lógico programável	01	R\$ 11.000,00	R\$ 11.000,00
Sistema Supervisório SCADA	01	R\$ 7.000,00	R\$ 7.000,00
Modem GPRS	01	R\$ 600,00	R\$ 600,00
Estação meteorológica	01	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00

⁶ O custo é baseado no sensor utilizado no projeto da Unipampa.

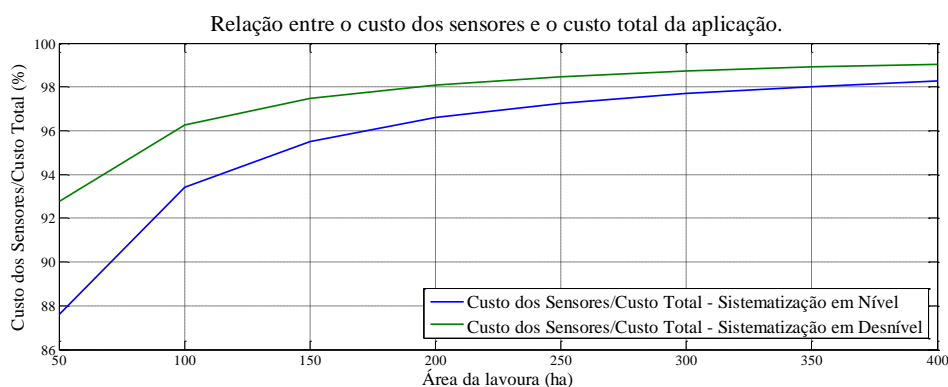
Sensores de nível ultrassônicos com transmissão de dados	110*	R\$ 8.000,00	R\$ 880.000,00
Custo Total de Equipamentos			R\$ 901.100,00

*Kit de sensores é formatado em pares.

Observa-se nas Tabelas 5.3 e 5.4, que do total investido na aplicação, apenas 1,3% é destinado aos equipamentos de controle em lavouras sistematizadas em desnível, e 2,34% para lavouras sistematizadas em nível. O restante do valor é empregado nos sensores que fazem o monitoramento da água. Os gráficos apresentados nas Figuras 5.1(a) e 5.1(b) apresentam, respectivamente, a relação entre o custo dos equipamentos de controle (que é fixo na aplicação) e o custo total da aplicação de acordo com a área, e a relação entre o custo dos sensores (que varia com o tamanho da lavoura) e o custo total da aplicação de acordo com a área. Os dados utilizados para realizar o levantamento dos custos são a estimativa de quantidade de sensores, apresentada na seção 4.1, e os custos dos equipamentos utilizados no projeto.



(a)



(b)

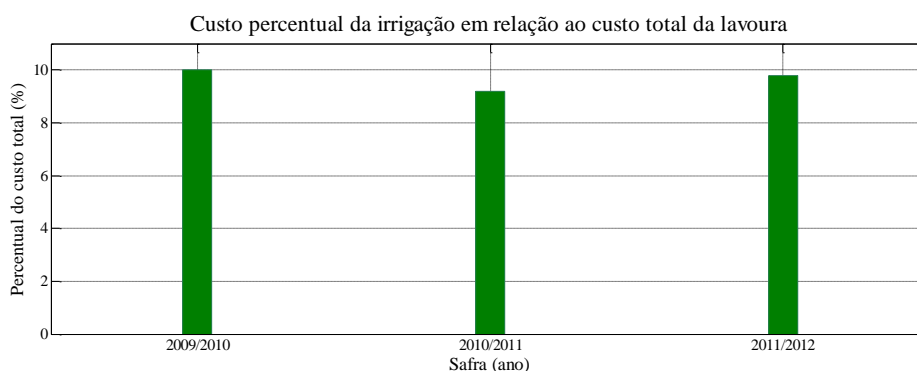
Figura 5.1 - Relação entre o custo dos equipamentos fixos e o custo total da aplicação de acordo com a área (a). Relação entre o custo dos sensores e o custo total da aplicação de acordo com a área (b)

É possível observar pelas ilustrações das Figuras 5.1(a) e 5.1(b) que os sensores são os maiores responsáveis pelo alto custo da aplicação, e que quanto maior a área da lavoura mais significativa fica a diferença entre o custo empregado nos sensores e o custo dos equipamentos de controle. O custo dos equipamentos de controle pode ser considerado fixo, pois não varia com o tamanho da lavoura; entretanto, pode variar de acordo com a quantidade de estações de bombeamento utilizada para elevar a água até a plantação. Além disto, existem diversas alternativas para reduzir o custo com os equipamentos de controle como, por exemplo, substituir a aplicação SCADA por uma interface desenvolvida em *software* livre.

5.2 Custos com energia elétrica

5.2.1 Custo da energia elétrica de acordo com o IRGA

De acordo com o Departamento Comercial e Industrial – Seção Política Setorial, do IRGA, a irrigação têm sido responsável por cerca de 10% do custo total da produção do arroz no Estado do Rio Grande do Sul nas últimas safras. Na safra 2011/2012 o custo da irrigação por hectare foi de R\$ 415,37 e representou 9,91% do custo total da produção. No Anexo IV está disponível uma tabela com todos os custos da produção de arroz no Estado. A Figura 5.2 apresenta um gráfico com a evolução dos custos da irrigação nas ultimas três safras em relação ao custo total da produção. É possível concluir que os custos percentuais com a irrigação nos últimos anos têm se mantido praticamente constante.

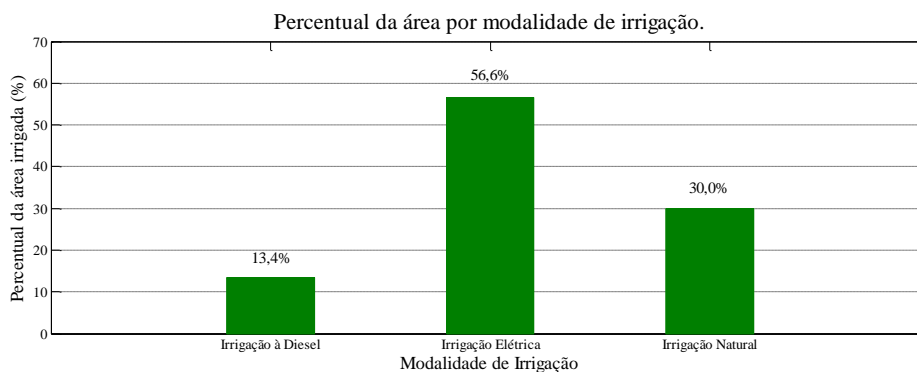


Fonte: Adaptado de IRGA, 2012

Figura 5.2 - Custo da irrigação em relação ao custo total da produção

O sistema de irrigação por inundação contínua compreende três modalidades de irrigação: a irrigação mecânica a diesel, a irrigação natural por gravidade e a irrigação mecânica elétrica, sendo que a última será o principal objeto do estudo. A estimativa é de que mais da metade da

área total plantada no Rio Grande do Sul utiliza eletricidade para irrigação. A Figura 5.3 apresenta a divisão percentual da área plantada na safra 2011/2012, de acordo com a modalidade de irrigação adotada pelo produtor.



Fonte: Adaptado de IRGA, 2012

Figura 5.3 - Percentual de área por modalidade de irrigação

O custo total da irrigação por hectare e por safra refere-se ao somatório dos custos com as três modalidades de irrigação existentes no Estado, conforme apresentado na Tabela 5.5, com destaque para o custo da irrigação elétrica.

Tabela 5.5: Custo por modalidade de irrigação.

Modalidade de Irrigação	Percentual da Área (%)	Custo (R\$/ha)
1. Irrigação à diesel	13,4	138,71
<i>2. Irrigação elétrica</i>	<i>56,6</i>	<i>232,11</i>
3. Irrigação natural	30,0	44,55
Total (1+2+3)	100	415,37

Fonte: Adaptado de IRGA, 2012 – Custos da Produção do Arroz Irrigado.

Finalmente, o custo com energia elétrica, estimado na planilha de custos de um conjunto elétrico do IRGA, por safra e por hectare, é apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Custos com energia elétrica.

Item	Custo (R\$/ha)
1. Consumo de energia elétrica	83,82
2. Demanda de energia elétrica	45,08
Total (1+2)	128,90

Fonte: Adaptado de IRGA, 2012 – Custos da Produção do Arroz Irrigado.

5.2.2 Medições em uma lavoura real

A lavoura que será tomada como referência para os cálculos do retorno financeiro possui uma área de aproximadamente 500 hectares, e é irrigada por um sistema de bombeamento eletromecânico com partida eletrônica através de um inversor de frequência com uma potência de 200CV. A área foi escolhida por apresentar características de terreno semelhantes às do projeto desenvolvido pela Unipampa. A modalidade tarifária desta lavoura é a verde, porém, os dados de contrato de demanda não serão objeto deste estudo. A Tabela 5.7 apresenta o consumo de energia elétrica da lavoura no período de 03 a 28 de dezembro de 2012, e a estimativa do consumo por um período de 100 dias. O custo do quilowatt-hora considerado é o mesmo que foi utilizado nas planilhas de custos fornecidas pelo IRGA (R\$ 0,12877 por KWh). O equipamento utilizado na medição é um analisador de energia *PowerNet P600*®, fabricado pela empresa IMS.

Tabela 5.7: Medição de uma lavoura real.

Período	Consumo (kwh)	Valor (R\$)	Consumo (kwh/ha)	Valor (R\$/ha)
25 dias (medição)	63.905,89	8.229,16	127,81	16,46
100 dias (estimativa de safra)	345.771,06	44.524,94	691,54	89,05

É possível observar pelas Tabelas 5.6 e 5.7 que o custo do consumo de energia elétrica por hectare é quase o mesmo nas duas análises.

5.2.3 Retorno do investimento

Na estimativa do tempo para o retorno do investimento na aplicação serão considerados apenas os custos dos sensores empregados, dado que, como visto na seção 5.1, o custo dos equipamentos usados no controle se tornam desprezíveis ao passo que aumenta o tamanho da lavoura. Na análise será utilizado o pior caso de melhoria de eficiência energética obtida nos resultados preliminares no projeto desenvolvido pela Unipampa, apresentados na Seção 3.4. Assim, o menor índice de redução no consumo de energia elétrica proporcionado pela aplicação foi de 66,4%, para o quadro de lâmina d'água fixa em 3 cm.

Uma avaliação preliminar simples, considerando apenas o custo dos sensores e o tempo necessário para que o investimento seja compensado através da redução do consumo de energia elétrica é apresentada na Tabela 5.8. Como parâmetros serão usados os dados do exemplo da seção 4.1.2.3, desenvolvido ao longo desse trabalho.

Tabela 5.8: Retorno do investimento da aplicação.

Item	Unidade	Valor
1. Área da lavoura	ha	250
2. Quantidade de sensores (desnível)	-	400
3. Custo da aplicação (total)	R\$	1.621.100,00
4. Custo da energia por hectare	R\$	83,82
5. Índice de redução no consumo de energia	%	66,4
6. Economia proporcionada (1*4*5/100)	R\$	13.914,12
Tempo para o retorno do investimento (3/6)	Anos	117

Devido ao alto custo dos sensores que são utilizados para monitorar a água na lavoura, a aplicação pode ser considerada inviável economicamente. Cabe ressaltar ainda que não foram analisadas as taxas de depreciação dos sensores, que provavelmente aumentaria ainda mais este tempo. Então, apesar dos resultados promissores em termos de eficiência energética e redução do uso da água, a solução proposta ainda não pode ser considerada aplicável do ponto de vista financeiro, necessariamente pelo alto custo dos sensores que são utilizados.

Desta forma, torna-se compulsório o investimento para o desenvolvimento de sensores de baixo custo para fazer o monitoramento da água na lavoura. O custo desses sensores pode ser estimado considerando um tempo de retorno do investimento aceitável de acordo com a vida útil dos sensores. Como exemplo, será analisado um cenário em que os sensores tenham uma vida útil de dez anos. A análise proposta, apresentada na Tabela 5.9, será feita com base nos resultados da Tabela 5.8. Dois períodos de retorno do investimento serão considerados: três anos e cinco anos.

Tabela 5.9: Estimativa do custo dos sensores com base no tempo para o retorno do investimento.

Item	Unidade	Valor
1. Área da lavoura	ha	250
2. Quantidade de sensores (desnível)	-	400
3. Tempo para retorno do investimento 1	anos	3
4. Tempo para retorno do investimento 2	anos	5
4. Custo da energia por hectare	R\$	83,82
5. Índice de redução no consumo de energia	%	66,4
6. Economia proporcionada (1*4*5/100)	R\$	13.914,12
Custo estimado dos sensores para retorno do investimento em três anos (6*3/2)	R\$	105,00
Custo estimado dos sensores para retorno do investimento em cinco anos (6*4/2)	R\$	174,00

5.3 Aplicabilidade no Estado do Rio Grande do Sul

Segundo dados do mais recente Relatório Final de Colheita do Arroz Irrigado do Rio Grande do Sul (IRGA, 2012), a área semeada na safra 2010/2011 foi de 1.170.538 hectares, com uma produção de 179.102.464 sacos e uma produtividade de 7.675 Kg/ha. Em relação aos dados da safra anterior, ocorreu um crescimento de 7,5% na área total semeada, 31% na produção e 18% na produtividade. Portanto, percebe-se um aumento significativo da produção e produtividade, mesmo com um pequeno aumento na área semeada. Isto é justificado pelo investimento em pesquisa para melhoria das técnicas de produção utilizadas.

Da área total plantada, 1.170.538 hectares, e de acordo com os valores apresentados no gráfico da Figura 5.3, os sistemas mecânicos elétricos são responsáveis pela irrigação de uma área de 662.524,51 hectares, ou 56,6% da área total semeada. O impacto na redução do consumo de energia elétrica no Estado será estimado com base nos resultados apresentados na Seção 3.4, considerando o pior caso. A Tabela 5.10 apresenta, em síntese, o impacto financeiro que seria causado pela aplicação nas lavouras de arroz do Estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 5.10: Impacto financeiro da aplicação em lavouras do Rio Grande do Sul.

Item	Und	Valor
1. Área total plantada no Estado	ha	1.170.538
2. Percentual de área irrigada por sistemas mecânicos elétricos	%	56,6
3. Área irrigada por sistemas mecânicos elétricos (1*2/100)	ha	662.524,51
4. Custo da Energia por Hectare*	R\$/ha	83,82
5. Custo total por safra (3*4)	R\$	55.532.804,43
6. Redução do consumo proporcionado pela aplicação**	%	66,4
7. Custo total com aplicação (5*(1-(6/100)))	R\$	18.659.022,29
Economia proporcionada pela aplicação em uma safra	R\$	36.873.782,14

*Mesmo valor considerado nas planilhas de IRGA, 2012.

**Pior resultado, parcela de lâmina fixa em 3 cm.

A estimativa do impacto financeiro gerado pela aplicação, ou seja, o quanto seria economizado pelo produtor em caso de adoção do processo de automação proposto é bastante promissora. Estes resultados, além de beneficiar diretamente aos produtores, certamente, seriam refletidos nos custos do arroz que chega ao consumidor final.

Quanto à economia de energia proporcionada pela aplicação, os resultados são descritos na Tabela 5.11.

Tabela 5.11: Redução do consumo de energia elétrica proporcionado pela aplicação no Rio Grande do Sul.

Item	Und	Valor
1. Área irrigada por sistemas mecânicos elétricos	ha	662.524,51
2. Potência por ha*	KW/ha	0,325
3. Potência total da área plantada (1*2)	KW	215.627,88
4. Redução do consumo proporcionado pela aplicação**	%	66,4
5. Potência total com a aplicação	kW	72019,71
Economia de energia proporcionada pela aplicação	kW	143.608,17

*Mesmo valor considerado nas planilhas de IRGA, 2012.

**Pior resultado, parcela de lâmina fixa em 3 cm.

A redução da potência utilizada nos sistemas de irrigação permite desonerar as redes de distribuição da concessionária de energia elétrica, postergando a necessidade de investimentos na ampliação destas redes, além de permitir a redistribuição desta energia para outros clientes sem a necessidade de sobrecarregar os sistemas de geração e transmissão de energia elétrica.

Outro fator que deve ser observado é a significativa redução do uso da água proporcionado pela aplicação tendo em vista o crescente apelo ambiental na atualidade. O problema da utilização da água não é o seu consumo, pois parte-se do princípio que a irrigação apenas altera o microciclo da água. A grande questão abordada pelos ambientalistas é a contaminação da água utilizada na produção do arroz, devido aos diversos tratamentos que a planta recebe durante o período de crescimento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram propostas metodologias com o objetivo de contribuir para melhoria do processo de automação da irrigação de lavouras de arroz, buscando aumentar a eficiência energética destes tipos de cargas e, por consequência, reduzir o uso de água pela cultura. Inicialmente, foi apresentada uma estratégia para estimar a quantidade e os melhores pontos para instalação dos sensores ultrassônicos que fazem o monitoramento da água na lavoura. Em seguida, uma proposta para utilização de variáveis climáticas no controle do regime de funcionamento das bombas de irrigação foi apresentada. Finalmente, foi feita uma avaliação da viabilidade econômica da aplicação em âmbito estadual, considerando os custos dos equipamentos utilizados e a redução no consumo de energia proporcionado.

A quantidade e os melhores pontos para instalação dos sensores é estimada considerando as características físicas da lavoura e o tipo de sistematização a que o solo foi submetido. Nas lavouras plantadas em solos sistematizados em nível, a quantidade de sensores é proporcional ao número de quadros da lavoura. Já naquelas lavouras plantadas em solos sistematizados em desnível, os fatores considerados para realizar a estimativa são a declividade do terreno e a relação entre o perímetro dos canais de irrigação e a área total da lavoura. A distribuição dos sensores na plantação, nos casos de solo sistematizado em desnível, deve ser feita a partir da análise do levantamento topográfico da área e das informações obtidas do processo de sistematização.

Uma adaptação importante quanto à estratégia de monitoramento da água foi proposta com o objetivo de tornar o projeto desenvolvido pela Unipampa aplicável em lavouras reais. Nesta proposta, as informações dos sensores são tratadas individualmente para informar o produtor/operador quanto às demandas do sistema por água ou manutenção. A altura da lâmina d'água que é utilizada no controle das bombas de irrigação é uma média de todas as medidas dos sensores ponderadas pela área coberta por eles. Com isto, torna-se possível a aplicação com diversos sensores e apenas uma ou duas estações de bombeamento.

Os dados climáticos, utilizados no controle do regime de funcionamento das bombas de irrigação proposto, são buscados de duas fontes diferentes: INPE (previsão do tempo) e estação meteorológica local (tempo real). Em um primeiro momento, os dados de precipitação de chuvas foram utilizados no controle das bombas e na alteração de referências de altura de lâmina d'água. A umidade relativa do ar e a temperatura ambiente foram usadas na estimativa

das perdas hídricas em horário de ponta, o que possibilita a compensação antecipada destas perdas.

Os resultados apresentados Tabela 4.9, desenvolvida a partir de uma simulação do comportamento das bombas de irrigação de acordo com as condições climáticas, mostram que a estratégia de utilização do clima, proposta neste trabalho, pode trazer bons resultados na melhoria da eficiência energética. A compensação das perdas hídricas que ocorrem em horário de ponta reduz a possibilidade de falta de água na lavoura, permitindo que o sistema trabalhe sempre com as menores referências possíveis, reduzindo a necessidade de água e o consumo de energia elétrica do sistema.

As lógicas propostas podem facilitar o desenvolvimento dos códigos de controle em qualquer linguagem, pois é baseada em laços e testes condicionais simples. Entretanto, em lavouras de grande porte a quantidade de equipamentos de monitoramento pode se tornar um complicador, devido ao aumento do tempo de processamento das informações e à maior demanda de memória do controlador por parte destes equipamentos. Outro ponto importante é a troca de informações com o sistema de supervisão, quando a comunicação é realizada por uma rede não particular (GSM/GPRS) podem surgir limitações de banda e de custo de dados, dificultando a telemetria em tempo real do sistema de produção.

Na análise da viabilidade econômica foi visto que os custos com os equipamentos de controle tornam-se desprezíveis na medida em que aumenta a área plantada. Em contrapartida, o custo dos sensores empregados no monitoramento da água ainda é o principal obstáculo para implantação da aplicação desenvolvida.

A utilização do conhecimento das condições climáticas na agricultura tem tido um apelo cada vez maior por parte dos pesquisadores. Entretanto a abordagem proposta neste trabalho para o controle do regime de funcionamento das bombas de irrigação pode ser considerada inovadora, se comparada com os trabalhos existentes na bibliografia. A metodologia proposta para quantificação e alocação dos sensores na plantação também é bastante original, visto que não foi encontrado na literatura nenhum procedimento para solucionar este tipo de questão.

As informações obtidas nas entrevistas e em relatos informais, principalmente com agrônomos e produtores, foram fundamentais para o desenvolvimento das metodologias apresentadas. Todas as decisões e estimativas feitas neste trabalho foram baseadas, principalmente, na experiência destes profissionais.

Como sugestões para continuidade do trabalho, destacam-se:

- Validação da metodologia para estimar a quantidade e os melhores pontos de instalação dos sensores ultrassônicos na lavoura, através da aplicação dos procedimentos em lavouras reais de diferentes configurações. Para isto, é necessário obter a autorização dos produtores e todas as informações do projeto da lavoura, do levantamento topográfico e do processo de sistematização do solo;
- Validação da metodologia para utilização das informações climáticas no controle da automação, através de testes dos códigos desenvolvidos. A estrutura para realizar estes testes pode ser a mesma montada no desenvolvimento da aplicação;
- Proposta de uma metodologia para estimar o tempo de resposta da lavoura, com base em técnicas de inteligência artificial, características físicas da lavoura e do sistema de irrigação como um todo. Uma das alternativas analisadas é o emprego de treinamento de redes neurais;
- Desenvolvimento de um sensor de baixo custo que possua características semelhantes às dos que são utilizados no projeto desenvolvido pela Unipampa. Os três principais requisitos destes sensores devem ser: possuir autonomia suficiente para todo o período de safra, precisão de pelo menos 1mm, e um sistema de comunicação *wireless* para envio das informações à estação de controle.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANNER. **SureCross™ U-GAGE® T30UF Sensor**, 2012. Disponível em <<http://info.bannerengineering.com/xpedio/groups/public/documents/literature/137254.pdf>>. Acesso em 5 de janeiro de 2013.

BENZEKRI, A.; MEGHRICHE, K.; REFOUFI, L.. **PC- Based Automation of a Multi-Mode Control an Irrigation System**. In: Symposium on Industrial Embedded Systems, pg 310-315, 2007.

CAUDURO, F. A.. **Apontamentos de Irrigação**. In: IPH/UFRGS – Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pg 1-186, 1996.

DILLENBURG, M. R.. **Alternativas de Aplicação do Serviço GPRS da Rede Celular GSM em Telemetria pela Internet**, In: Novus Produtos Eletônicos LTDA, 2008. Disponível em: <<http://www.novus.com.br>>. Acesso em: 04 de novembro de 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Cultivo do Arroz Irrigado no Brasil, Manejo da Água em Arroz Irrigado**, 2005. Disponível em <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrrigadoBrasil/cap10.htm#drenagem>>. Acesso em 18 de setembro de 2012.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; DA PAZ, R.L.; AMORIM, A. O.. **Evapotranspiração: Uma revisão sobre os métodos empíricos**. In: Embrapa Arroz e Feijão (Documentos / Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1678-9644 ; 263), pg 1-44, 2010.

GARCIA BENAVIDES, J.; LOPEZ DIAZ, J. **Formula para el calculo de la evapotranspiracion potencial adaptada al tropico (15° N - 15° S)**. Agronomia Tropical, Maracay, v. 20, n. 5, p. 335-345, 1970.

HELPER, F.. **Demandas e Disponibilidades Hídricas da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo (RS) nos Cenários Atuais e Futuro para Diferentes Sistemas de Produção de Arroz Irrigado**. In: Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Agropecuário**, 2006. Disponível em <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_estatisticas.htm>. Acesso em 10 de outubro de 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Previsão do Tempo em XML**, 2011. Disponível em <<http://servicos.cptec.inpe.br/XML/>>. Acesso em 28 de outubro de 2012.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ – IRGA. **Área Produção e Produtividade, Custos de Produção**, 2012. Disponível em <<http://www.irga.rs.gov.br/index.php?principal=1&secao=999&id=120&menuP=120&key=3>>. Acesso em 28 de novembro de 2012.

NUNES, J. L. da S.. **Solo do Arroz**, 2007. Disponível em < <http://www.agrolink.com.br/culturas/arroz/solo.aspx> >. Acesso em 05 de dezembro de 2012.

OREGON SCIENTIFIC. **Manual do Usuário WMR928NX**, 2004. Disponível em: <<http://www.oregonscientific.com.br/manual/WMR928NX.pdf>>. Acesso em 05 de janeiro de 2013.

PFITSCHER, L. L.; BERNARDON, D. P.; KOPP, L. M., HECKLER, M. V. T.; BEHRENS, J.; MONTANI, P. B.. **Automatic Control of Irrigation Systems Aiming at High Energy Efficiency in Rice Crops**. In: ICCDCS – International Caribbean Conference on Devices, Circuits and Systems, pg 1-4, 2012.

SISTEMA NACIONAL DE DADOS AMBIENTAIS – SINDA/INPE. **Meta Dados Precipitação Acumulada – Uruguaiana, Aeroporto Ruben Berta**, 2013. Disponível em: < <http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/metadados.jsp?uf=20&id=32753&tipo=HIDRO&idVariavel=6&dia=24&mes=02&ano=2013&Submit2.x=10&Submit2.y=8&Submit2=Enviar> >. Acesso em 24 de fevereiro de 2013.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO – SOSBAI. **Arroz Irrigado: Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil**. In: XXIX Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado, pg 1-177, 2012.

SORIANO, M. M.; BAUMHARDT, U. B.; GUIMARÃES, J. C.; PATTA, J. C.. **A Agricultura de Informação e as Estações de Bombeamento para o Cultivo do Arroz por Inundação**. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – Norte e Centro Oeste. Pg 1-15, 2007.

SOUZA, F. N. P.; BARROSO, G. C.; TEIXEIRA, A. S.; SANTOS, C. C. dos. **Automação de Sistemas de Irrigação Utilizando Rádio Sensores e Rádio Controle**. In: IV CBEE – Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, pg 1-7, 2011.

STEINDORFF, A. P.. **Sistematização do Solo**, 2005. In: Agência de Informação Embrapa. Disponível em < <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arroz/arvore/CONT000fojwodcg02wyiv80bhgp5phpdvm0p.html> >. Acesso em 14 de novembro de 2012.

STONE, L. F.. **Eficiência do uso da água na cultura do arroz irrigado**. In: Embrapa Arroz e Feijão (Documentos / Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1678-9644 ; 176), pg 1-48, 2005.

ULIANA, E. M.; DA SILVA, J. G. F.; DOS REIS, E. F.; MARTINS, A. S.. **Estimativa da EPT pelo Método de Penman-Monteith Utilizando Estimativas Obtidas pelos Métodos de Camargo (1971) e Thornthwaite (1948)**. In: XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, pg 1-5, 2011.

VASCONCELLOS, A. B.; CARVALHO, B. C.; BRIDI, A. B.; ANABUKI, E. T.; NOVELO, F.. **Análise da Qualidade e Eficiência de Energia Elétrica em um Sistema de Bombeamento de Água Acionado Através do Conversor de Frequência**. In: CBQEE 2011 – Congresso Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica, pg 33-38, 2011.

YANG, G.; WEN, B.; GAO, G.. **Devices for Automatic Irrigation Based on GSM Network and Radio Communication**. In: 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, pg 1-5, 2006.

YUNSEOP KIM, J.; EVANS, R. G; IVERSEN, W. M.. **Remote Sensing and Control of an Irrigation System Using a Distributed Wireless Sensor Network**. In: Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on Volume 57, Issue: 7, pg 1379-1387, 2008.

ANEXO I

Tabela dos custos dos equipamentos utilizados no projeto desenvolvido pela Unipampa.

Equipamento	Qtde	Valor Unitário	Valor Total
Bomba d'água trifásica 0,5CV	04	R\$ 309,00	R\$ 1.236,00
Motor trifásico 0,5CV	04	R\$ 316,00	R\$ 1.264,00
Acoplamento moto-bomba	04	R\$ 244,00	R\$ 976,00
Caixa d'água 3000 litros	02	R\$ 618,00	R\$ 1236,00
Inversor de Frequência 0,5CV WEG	04	R\$ 936,00	R\$ 3.744,00
Sensores de nível ultrassônicos com transmissão de dados	03	R\$ 8.412,81	R\$ 25.237,53
Controlador programável BCM2085	01	R\$ 10.166,00	R\$ 10.166,00
Medidor de vazão ultrassônico	01	R\$ 28.350,00	R\$ 28.350,00
Medidor de grandezas portátil RE4000	01	R\$ 4.590,35	R\$ 4.590,35
Medidor de grandezas elétricas Smart Meter 1Mb	04	R\$ 1.300,00	R\$ 5.200,00
Rotina DNP (controlador BCM)	01	R\$ 1.800,00	R\$ 1.800,00
SCADA (licença protocolo DNP3) Elipse	01	R\$ 11.118,00	R\$ 11.118,00
Modem GPRS UTW-C	02	R\$ 691,10	R\$ 1.382,20
Estação meteorológica	01	R\$ 2.377,10	R\$ 2.377,10
Custo Total de Equipamentos			R\$ 98.677,18

ANEXO II

Script em Visual Basic utilizado para fazer a aquisição da página em XML com os dados de previsão do tempo do INPE.

```

Sub CommandButton1_Click()
on error resume next

    set docxml = createobject("microsoft.xmlDOM")
    docxml.async = false
    docxml.Load("http://servicos.cptec.inpe.br/XML/estacao/SBUG/condicoesAtuais.xml
")

'Busca Data e hora da atualização
set el_data = docxml.getElementsByTagName("atualizacao").Item(0)
set el_data = el_data.firstChild
data = el_data.nodeValue

'Busca temperatura
set el_temp = docxml.getElementsByTagName("temperatura").Item(0)
set el_temp = el_temp.firstChild
temp = el_temp.nodeValue

'Direção do Vento
set el_vent_dir = docxml.getElementsByTagName("vento_dir").Item(0)
set el_vent_dir = el_vent_dir.firstChild
vent_dir = el_vent_dir.nodeValue

'Velocidade do Vento
set el_vent_vel = docxml.getElementsByTagName("vento_int").Item(0)
set el_vent_vel = el_vent_vel.firstChild
vent_vel = el_vent_vel.nodeValue

'Umidade
set el_umid = docxml.getElementsByTagName("umidade").Item(0)
set el_umid = el_umid.firstChild
umid = el_umid.nodeValue

'Pressão Atmosférica
set el_pres = docxml.getElementsByTagName("pressao").Item(0)
set el_pres = el_pres.firstChild
pres = el_pres.nodeValue

'Clima
set el_clima = docxml.getElementsByTagName("tempo_desc").Item(0)
set el_clima = el_clima.firstChild
clima = el_clima.nodeValue

End Sub

```

ANEXO III

Código que implementa as lógicas propostas no Capítulo 4, referentes utilização da chuva no sistema de irrigação e compensação das perdas em horário de ponta. O desenvolvimento do código foi feito em linguagem descritiva da BCM, considerando o controlador já utilizado no projeto em que o trabalho é baseado. É importante mencionar que os códigos utilizados na recepção e envio de dados aos periféricos foram suprimidos deste anexo.

```

=====
MALHA 0:          ; INICIALIZAÇÃO DO CONTROLADOR
=====

```

```

CLP=CPU8
INTERFACE1(19200)=1 (PROTOCOLO=BCM2)
INTERFACE2(19200)=1 (PROTOCOLO=BCM2)
DISPLAY=DPA20
EVENTOS RELOGIO
NEST=500
RTC

```

```

=====
MALHA 1:          ; MEDIDAS DOS SENSORES
=====

```

```

ESTADO 0:
DIM MEDAT(NSEN)          ;Vetor que recebe as medidas atuais dos sensores
DIM MEDAN(NSEN)          ;Vetor que salva as penúltimas medidas dos sensores
DIM ASEN(NSEN)           ;Vetor que recebe a área monitorada por cada sen-
sor...deve ser setado em projeto
DIM CONT(NSEN)           ;contador de erros por sensor
DIM MPROV(NSEN)          ;Vetor que recebe o produto entre medida e área de cada
sensor
RESET IND                ;índice dos sensores

```

VA PARA 1

```

.*****
;
; CONFIGURAÇÃO MODBUS INICIO
;*****
ESTADO 1:
RESET SEC,CERR
FACA* OFFS=0             ;Offset
FACA* ENDR=1            ;Endereço do equipamento modbus
FACA* FUNC=3            ;Função 3: Read Holding Registers
FACA* NREG=1            ;Endereço de leitura no equipamento
FACA* VALR=80           ;Número de variáveis a serem lidas
FACA* STAT1=1

```

FACA* EVAR=&VAR
SE SEC=1 ENTAO 2

ESTADO 2:
ESCMIS1* OFFS EM \$9D02
VA PARA 3

ESTADO 3:
ESCMIS1* ENDR EM \$9D04
VA PARA 4

ESTADO 4:
ESCMIS1* FUNC EM \$9D06
VA PARA 5

ESTADO 5:
ESCMIS1* NREG EM \$9D08
VA PARA 6

ESTADO 6:
ESCMIS1* VALR EM \$9D0A
VA PARA 7

ESTADO 7:
ESCMIS1* STAT1 EM \$9E00
VA PARA 8

ESTADO 8:
RESET SEC
LEMIS1* \$9E00 EM VAR1
SE SEC=1 ENTAO 9

.*****
,
; RECEPÇÃO DAS MEDIDAS DOS SENSORES
;*****

ESTADO 9:
LEMIS1* \$9E22 EM MEDAT(IND)
;lemisi: leitura na porta serial
VA PARA 10

ESTADO 10:
FACA* ERR(IND)=MEDAT(IND)-MEDAN(IND) ;calcula o erro
SE ERR(IND)<3 OU ERR(IND)=3 ENTAO 11 ;medida válida
VA PARA 12 ;medida inválida

ESTADO 11:
FACA* MEDAN(IND)=MEDAT(IND) ;salva a medida atual no
vetor de armazenamento para que o vetor de medidas atuais seja atualizado
RESET CONT(IND) ;reseta o contador de erro

FACA* MPROV(IND)=MEDAT(IND)*ASEN(IND) ;medida provisória recebe a
 medida do sensor x a area do sensor
 FACA* ATOT=ATOT+ASEN(IND) ;area total monitorada
 FACA* H_LAP=H_LAP*MPROV(IND)/ATOT ;lâmina d'água provisó-
 ria...quando sair do laço ser lâmina final "H_LAM"
 VA PARA 14

ESTADO 12:
 INCREMENTA CONT(IND) ;incrementa o contador de
 erro com indice de erro 'inder'
 SE CONT(IND)=5 ENTAO 13
 VA PARA 14

ESTADO 13:
 FACA* BFEA(IND) = 1 ;BFEA é um registrador
 usado pelo protocolo DNP para Enviar atualização ao SCADA
 RESET CONT(IND)
 VA PARA 14 ;neste caso está informando
 a falha de do sensor "ind"

ESTADO 14
 INCREMENTA IND
 VA PARA 15

ESTADO 15: ;sai do laço ao terminar as
 leituras.
 SE IND=NSEN ENTAO 16
 VA PARA 9

ESTADO 16:
 RESET IND
 FACA* H_LAM=H_LAP ;usada no controle da rota-
 ção.
 VA PARA 8 ;novas medidas em 1 se-
 gundo

```
=====
;
MALHA 22:          ; CONTROLE DAS BOMBAS
;
=====
```

```
*****
;
;   ROTINA PTINCIPAL - INICIO
;
*****
```

ESTADO 0:
 SE H_LAM<RMIN OU H_LAN=RMIN ENTAO 1
 VA PARA 7

ESTADO 1:
 VA PARA 10 ; sub-rotina L1

ESTADO 2:
SE H_LAN>RMIN E H_LAN<RMED ENTAO 3
VA PARA 1

ESTADO 3:
VA PARA 30 ; sub-rotina L2

ESTADO 4:
SE H_LAN>RMED E H_LAN<RMAX ENTAO 5
VA PARA 3

ESTADO 5:
VA PARA 50 ; sub-rotina L3

ESTADO 6:
SE H_LAN>RMAX ENTAO 7
VA PARA 5

ESTADO 7:
FACA* FBOMB=0
VA PARA 0

```

;*****
;
;      SUBROTINA L1 - INICIO
;*****

```

ESTADO 10:
SE PRECH=0 E CH_AT=0 ENTAO 11
VA PARA 12

ESTADO 11:
FACA* FBOMB=FMAX
VA PARA 2

ESTADO 12:
SE PRECH=0 E CH_AT>0 ENTAO 13
VA PARA 17

ESTADO 13:
FACA* VAR=RMIN-H_LAN
VA PARA 14

ESTADO 14:
SE CH_AT>VAR OU CH_AT=VAR ENTAO 15
VA PARA 16

ESTADO 15:
FACA* FBOMB=FMED
VA PARA 2

ESTADO 16:
 FACA* FBOMB=FAL
 VA PARA 2

ESTADO 17:
 SE PRECH>0 E CH_AT=0 ENTAO 18
 VA PARA 19

ESTADO 18:
 FACA* FBOMB=FMAX
 VA PARA 2

ESTADO 19:
 SE PRECH>0 E CH_AT>0 ENTAO 19
 VA PARA 2

ESTADO 20:
 FACA* VAR=RMIN-H_LAN
 VA PARA 21

ESTADO 21:
 SE CH_AT>VAR OU CH_AT=VAR ENTAO 22
 VA PARA 23

ESTADO 22:
 FACA* FBOMB=FAL
 VA PARA 2

ESTADO 23:
 FACA* FBOMB=FMAX
 VA PARA 2

```

;*****
;
;      SUBROTINA L2 - INICIO
;*****

```

ESTADO 30:
 SE PRECH=0 E CH_AT=0 ENTAO 31
 VA PARA 32

ESTADO 31:
 FACA* FBOMB=FAL
 VA PARA 4

ESTADO 32:
 SE PRECH=0 E CH_AT>0 ENTAO 33
 VA PARA 37

ESTADO 33:
 FACA* VAR=RMED-H_LAN
 VA PARA 34

ESTADO 34:
SE CH_AT>VAR OU CH_AT=VAR ENTAO 35
VA PARA 36

ESTADO 35:
FACA* FBOMB=FMIN
VA PARA 4

ESTADO 36:
FACA* FBOMB=FBX
VA PARA 4

ESTADO 37:
SE PRECH>0 E CH_AT=0 ENTAO 38
VA PARA 39

ESTADO 38:
FACA* FBOMB=FAL
VA PARA 4

ESTADO 39:
SE PRECH>0 E CH_AT>0 ENTAO 39
VA PARA 4

ESTADO 40:
FACA* VAR=RMED-H_LAN
VA PARA 41

ESTADO 41:
SE CH_AT>VAR OU CH_AT=VAR ENTAO 42
VA PARA 43

ESTADO 42:
FACA* FBOMB=FMED
VA PARA 4

ESTADO 43:
FACA* FBOMB=FAL
VA PARA 4

```
.*****  
;  
;      SUBROTINA L3 - INICIO  
;*****
```

ESTADO 50:
SE PRECH=0 E CH_AT=0 ENTAO 51
VA PARA 52

ESTADO 51:
FACA* FBOMB=FMED

VA PARA 6

ESTADO 52:
SE PRECH=0 E CH_AT>0 ENTAO 53
VA PARA 57

ESTADO 53:
FACA* VAR=RMAX-H_LAN
VA PARA 54

ESTADO 54:
SE CH_AT>VAR OU CH_AT=VAR ENTAO 55
VA PARA 56

ESTADO 55:
FACA* FBOMB=FZ1
VA PARA 6

ESTADO 56:
FACA* FBOMB=FMIN
VA PARA 6

ESTADO 57:
SE PRECH>0 E CH_AT=0 ENTAO 58
VA PARA 59

ESTADO 58:
FACA* FBOMB=FMED
VA PARA 6

ESTADO 59:
SE PRECH>0 E CH_AT>0 ENTAO 59
VA PARA 6

ESTADO 60:
FACA* VAR=RMAX-H_LAN
VA PARA 61

ESTADO 61:
SE CH_AT>VAR OU CH_AT=VAR ENTAO 62
VA PARA 63

ESTADO 62:
FACA* FBOMB=FBX
VA PARA 6

ESTADO 63:
FACA* FBOMB=FMED
VA PARA 6

```

=====
MALHA 23:           ;LÓGICA DE COMPENSAÇÃO DE PERDAS EM HP
=====

```

ESTADO 0:

```

FACA* HCO=H_PON-1           ; hora em que as referências devem ser alteradas
SE HOR=HCO ENTAO 1
VA PARA 9

```

ESTADO 1:

```

FACA* ETBL=7.45*TMED/237.4 ; implementação da equação de benavides e lopez
FACA* ETBL=ETBL+TMED
FACA* ETBL=ETBL*1.21*10
FACA* X01=0.01*UR1
FACA* X01=1-X01
FACA* ETBL=ETBL*X01
FACA* X02=0.21*TMED
FACA* ETBL=ETBL+X02-2.3
VA PARA 2

```

ESTADO 2:

```

FACA* ETHP=ETBL*3/24       ; corrige evapo para horário de ponta
VA PARA 3

```

ESTADO 3:

```

FACA* PF1=ETBL*0.355/0.480 ; estimativa das perdas por fluxo lateral
FACA* PFHP=PF1*3/24       ; corrige para horário de ponta
VA PARA 4

```

ESTADO 4:

```

FACA* PHP=PFHP*ETHP       ; cálculo das perdas em horário de ponta
VA PARA 5

```

ESTADO 5:

```

FACA* RMIN=RMIN+PHP       ; ajuste das referências
FACA* RMAX=RMAX+PHP
VA PARA 6

```

ESTADO 6:

```

SE HOR=H_PON OU HOR>H_PON ENTAO 7
VA PARA 8

```

ESTADO 7:

```

FACA* RMIN=RMIN-PHP       ; normaliza as referências novamente
FACA* RMAX=RMAX-PHP
VA PARA 9

```

ESTADO 8:

```

VA PARA 6

```

ESTADO 9:
VA PARA 0

```
=====
;
MALHA 24:          ;DEFINIÇÃO DAS FREQUENCIAS
;
=====
```

```
ESTADO 0:
FACA* FZ1=0
FACA* FMIN=1000    ; 15HZ
FACA* FBX=1500    ; 23HZ
FACA* FMED=2000   ; 30HZ
FACA* FAL=3000    ; 45HZ
FACA* FMAX=4000   ; 60HZ
VA PARA 1
```

ESTADO 1:
VA PARA 0

ANEXO IV

Custo da produção detalhado por operações.

Itens	R\$/ha	%	US\$/ha	scs/ha
Item 01 - Terra de cultivo	535,18	12,77%	301,91	22,19
Item 02 - Desmonte de taipas	5,88	0,14%	3,31	0,24
Item 03 – Discagem	102,17	2,43%	57,63	4,23
Item 04 – Aplainamento	93,06	2,22%	52,49	3,85
Item 05 – Drenagem	118,04	2,81%	66,59	4,89
Item 06 - Adubo de base e cobertura	571,55	13,64%	322,43	23,70
Item 07 – Semente	132,60	3,16%	74,80	5,49
Item 08 - Aplicação de base e semeadura	82,53	1,96%	46,55	3,42
Item 09 – Rolagem	5,13	0,12%	2,89	0,21
Item 10 – Irrigação	415,37	9,91%	234,32	17,22
Item 11 - Canais e condutos	102,42	2,44%	57,77	4,24
Item 12 – Taipas	69,79	1,66%	39,37	2,89
Item 13 – Aguador	81,29	1,94%	45,85	3,37
Item 14 - Aplicação adubação de cobertura	44,50	1,06%	25,10	1,84
Item 15 - Controle de invasoras, pragas e moléstias	320,29	7,64%	180,69	13,28
Item 16 - Colheita	403,60	9,63%	227,68	16,73
Item 17 - Transportes internos	101,20	2,41%	57,09	4,19
Item 18 - Fretes	198,93	4,74%	112,22	8,25
Item 19 - Secagem	233,41	5,57%	131,67	9,68
Item 20 - Administração	115,99	2,76%	65,43	4,81
Item 21 - Estradas	25,31	0,60%	14,27	1,04
Item 22 - Instalações agrícolas	62,30	1,48%	35,14	2,58
Item 23 - Taxas (CDO, FunRural, Lic. Ambiental)	141,38	3,37%	79,75	5,86
Item 24 - Juros do financiamento custeio agrícola	149,98	3,57%	84,61	6,22
Item 25 - Juros sobre capital próprio do custeio agrícola	77,51	1,85%	43,72	3,21
TOTAL	4.189,42	100,00%	2.363,42	173,76

Fonte: Custos da Produção, IRGA, 2012.