

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**CRITÉRIOS PARA O AUMENTO DO ÍNDICE DE
EFICIÊNCIA NOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO
TIPO PIVÔ CENTRAL**

TESE DE DOUTORADO

Ricardo Luis Schons

Santa Maria, RS, Brasil

2010

**CRITÉRIOS PARA O AUMENTO DO ÍNDICE DE
EFICIÊNCIA NOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO TIPO PIVÔ
CENTRAL**

por

Ricardo Luis Schons

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Agrícola.**

Orientador: Prof. Dr. Adroaldo Dias Robaina

Santa Maria, RS, Brasil.

2010

S371c

Schons, Ricardo Luis, 1974-

Critérios para o aumento do índice de eficiência nos sistemas de irrigação tipo pivô central / Ricardo Luis Schons. - 2010.

139 f.; il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2010.

“Orientador: Prof. Dr. Adroaldo Dias Robaina”

1. Engenharia agrícola 2. Irrigação 3. Pivô central 4. Eficiência energética I. Robaina, Adroaldo Dias II. Título

CDU: 631.67

Ficha catalográfica elaborada por
Patrícia da Rosa Corrêa – CRB 10/1652
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**CRITÉRIOS PARA O AUMENTO DO ÍNDICE DE EFICIÊNCIA NOS
SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO TIPO PIVÔ CENTRAL**

Elaborada por
Ricardo Luis Schons

Como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA:

Adroaldo Dias Robaina, Dr. (UFSM)
Presidente/Orientador

Márcia Xavier Peiter, Dra. (UFSM)

Liane de Souza Weber, Dra. (UFSM)

Marcelo Calgaro, Dr. (Embrapa)

Paulo Roberto da Costa, Dr.
(CTISM/UFSM)

Santa Maria, 27 de Janeiro de 2010.

Agradecimentos

A Universidade Federal de Santa Maria que oportuniza um ensino público e gratuito, com qualidade, e que me acolheu com sua estrutura física e humana, oportunizando espaço para este trabalho.

Ao CNPq pelo custeio, em forma de bolsa de auxílio, para que pudesse desenvolver o trabalho.

A Deus, por toda a motivação que alcanço quando o procuro.

Ao professor Adroaldo Dias Robaina, tutor desta caminhada, pela amizade e companheirismo nas discussões e dilemas que se apresentam.

A esposa e filhas, que tiveram a paciência necessária para auxiliar o trabalho, e que por vezes me serviram de recarga.

A família, pelo apoio recebido, mesmo sem estar presente em todos os momentos.

Ao professor Alfredo Mendes D'ávila e ao professor João Baptista da Silva, da UFPel, pelo que representam para mim como o início da caminhada de pesquisa e de apreciação dos problemas que nos cercam.

Aos meus pais, primeiros professores, mas não inferiores aos demais, que me auxiliaram, principalmente no início de minha caminhada, e que ainda hoje contribuem para meu crescimento.

Aos amigos e colegas do Centro de Ciências Rurais da UFSM, em especial, aos meus amigos do Laboratório de Engenharia de Irrigação: Adriana Gindi Salbego, Ana Rita Costenaro Parizi, Ana Carla dos Santos Gomes, Fátima Cibele Soares, Gisele Aparecida Vivan, Mário Santos Nunes, Rafael Camargo Ferraz, Angélica Rossana Castro de Souza, Marcela Vilar Sampaio, Natália Schwab, pela colaboração e amizade.

A coordenação do curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, por conduzir as questões pertinentes ao curso com empenho e dedicação.

Aos membros da comissão examinadora, pela valiosa contribuição no engrandecimento deste trabalho com suas sugestões.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

CRITÉRIOS PARA O AUMENTO DO ÍNDICE DE EFICIÊNCIA NOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO TIPO PIVÔ CENTRAL

Autor: Ricardo Luis Schons

Orientador: Adroaldo Dias Robaina

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 27 de janeiro de 2010.

Este trabalho teve por objetivo aprimorar o estudo acerca do desenvolvimento de indicadores de eficiência para serem utilizados em equipamentos de irrigação por pivô central. Inicialmente procurou-se realizar alguns esclarecimentos sobre o estado atual da técnica de irrigação, e como a sociedade a percebe. Em relação a discussão sobre avaliação técnica, buscou-se discutir a concepção de projetos, desde sua fundamentação teórica, até a melhor maneira de implementação dos mesmos, com o objetivo de agregar conhecimento nesta área. O equipamento pivô central também foi motivo de apresentação, atendendo ao objetivo do esclarecimento de termos e inovações. A principal questão abordada neste trabalho diz respeito à fundamentação teórica e a discussão em torno da busca da eficiência técnica. Para discutir a implementação de medidas de eficiência energética em sistemas de irrigação por pivô central, iniciou-se com a metodologia utilizada para a avaliação destes sistemas. Após, foram calculados indicadores de eficiência e adequados os equipamentos em um padrão de eficiência, de forma a englobar as condições de desempenho energético e agrícola da irrigação. As avaliações atualmente utilizadas para sistemas de irrigação são realizadas principalmente por meio da Eficiência de Aplicação, com auxílio de coeficientes de uniformidade e com a avaliação da potência instalada. Com esta nova concepção de indicador, tem-se um mesmo parâmetro para comparação de sistemas instalados em condições diferenciadas; os dados tem maior aplicabilidade para as avaliações que são realizadas nos equipamentos. Os indicadores foram aplicados em 39 sistemas de irrigação por pivô central, em duas regiões do Rio Grande do Sul: Região de Cruz Alta e Região de Santo Augusto, onde a maioria dos equipamentos de porte médio (40 a 100 ha), tinham desnível geométrico total médio de 47,4 metros. Os rendimentos dos conjuntos motobomba variaram de 58 a 81%, com potencial máximo de redução de potência em equipamento na Região de Cruz Alta de 29,41 cv, e na Região de Santo Augusto de 31,32 cv. Pôde-se concluir que, segundo o Padrão de Eficiência Energética, o Consumo Específico Normalizado na Irrigação, proposto por Lima (2008), 72% dos equipamentos da Região de Cruz Alta estavam acima do padrão ($8,68 \text{ kWh} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 100\text{m}^{-1}$), e na Região de Santo Augusto 64,28% dos equipamentos estavam com o consumo acima do padrão.

Palavras-chave: irrigação; pivô central; eficiência energética

ABSTRACT

Doctoral Thesis in Agricultural Engineering
Graduate Program in Agricultural Engineering
Federal University of Santa Maria

CRITERIA FOR THE INCREASE OF EFFICIENCY IN SYSTEMS CENTER PIVOT IRRIGATION

Author: Ricardo Luis Schons
Advisor: Adroaldo Dias Robaina
Santa Maria, 2010 January 27th

This work proposes improve the study about the efficiency indicators development, to be use in irrigation equipment for pivot. At first, it sought to make some clarifications about the current state of the irrigations technical, and how the society perceives it. In relation to the discussion of the technical evaluation, it sought to deliberate about the design project, since it theoretic reason, even the best way of implementation thereof, with the goal to add knowledge to the area. The pivot equipment also was reason for presentation, answering the goal to clarify the terms and innovations. The main question discussed in the thesis concerns the theoretical foundation and the discussion on the question around the pursuit of technical efficiency. To discuss the implementation of energy efficiency measures in irrigation systems for pivot, it began with the methodology used for the evaluation of these systems. Right after, were calculated the performance indicators, and suitable the equipments in a standard efficiency, so to encompass the conditions of the energy and agricultural performance of the irrigation. The evaluation nowadays used to irrigation systems, is mainly carried over the Application Efficiency, with the help of uniformity indicators and with the installed potency evaluation. With this idea of indicator, it has a same parameter to compare installed systems in different conditions; this data has bigger applicability to assessments that are performed on equipment. The indicators were applied in 39 irrigation systems for pivot, in two regions of Rio Grande do Sul: Cruz Alta and Santo Augusto Region. With most medium-sized equipment (40 to 100 ha), with gap geometric mean total of 47,4 meters. The incomes of motorpump set ranged from 58% to 81%, with maximum potential reduction of power equipment in the Region of Cruz Alta of 29,41cv, and in the Region of Santo Augusto of 31,32cv. It was possible to complete that, according to the standard Energy Efficiency, The Specific Consumption Standard for irrigation, proposed by Lima (2008), 72% of the facilities from Region of Cruz Alta are above the standard ($8,68 \text{ kWh} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 100\text{m}^{-1}$), and in the Region of Santo Augusto 64,28% are with the Consumption above standard.

Keywords: irrigation; center pivot; energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Produção agro-vegetal (peso seco das 16 principais culturas) e consumo de nutrientes no Brasil (1969-1970 a 2005-2006).....	17
FIGURA 1.2 – Produtividades médias brasileiras comparadas com culturas irrigadas.....	20
FIGURA 1.3 – Distribuição percentual das culturas irrigadas no mundo.....	21
FIGURA 1.4 – Consumo de água para diferentes usos no Brasil.....	24
FIGURA 1.5 – Consumo médio de água para produzir um quilograma de massa de produto em Campinas, SP.....	25
FIGURA 1.6 – Consumo médio de água para produzir um quilograma de massa de produto na Califórnia, EUA.....	25
FIGURA 1.7 – Consumo de grãos por habitante e equivalente em água.....	26
FIGURA 2.1 – Utilização das terras no Brasil 1970 – 2006.....	36
FIGURA 2.2 – Representação dos índices das áreas irrigadas para o caso das áreas de terras aráveis mais as áreas com culturas permanentes, nos países do Continente Americano.....	41
FIGURA 2.3 – Representação dos índices das áreas irrigadas para o caso das áreas de terras aráveis mais as áreas de culturas permanentes, nos países da União Européia, no Mundo e no Brasil.....	42

FIGURA 2.4 – Frequência observada referente às áreas dos pivôs utilizados nas áreas estudadas durante os anos agrícolas 1998/99 a 2002/03, no Estado do RS. Santa Maria 2006.....	46
FIGURA 2.5 – Frequência observada referente às áreas dos pivôs em estudo nas Regiões de Cruz Alta, RS e Santo Augusto, RS.....	47
FIGURA 2.6 – Frequência observada em função das classes de áreas dos pivôs em estudo nas regiões de Cruz Alta, RS e Santo Augusto, RS.....	48
FIGURA 2.7 – Valores de área medida e desnível geométrico total dos equipamentos por pivô central, ordenados de forma crescente pela área medida, nas regiões de Cruz Alta, RS e Santo Augusto, RS.....	49
FIGURA 2.8 – Média dos valores das potências calculadas e medidas nos pivôs em estudo nas regiões de Cruz Alta, RS e Santo Augusto, RS.....	50
FIGURA 3.1 – Classificação dos principais tipos de bomba.....	57
FIGURA 3.2 – Gráfico de pré-seleção de uma bomba.....	58
FIGURA 3.3 – Carcaça e rotor de bomba que apresentaram problemas.....	60
FIGURA 3.4 – Perdas em um motor de indução.....	61
FIGURA 3.5 – Comparativo entre métodos de partida de motores.....	65
FIGURA 4.1 – Etapas de um procedimento de acordo com a engenharia de sistemas.....	70
FIGURA 4.2 – Modelo de procedimento da engenharia de sistemas para as diferentes fases do ciclo de vida (fases de concretização).....	71

FIGURA 4.3 – Esquema das inter-relações dos fatores que viabilizam a irrigação.....	76
FIGURA 5.1 – Frequência relativa percentual de ocorrência do CUC dos sistemas de irrigação por pivô central na Região de Cruz Alta e Região de Santo Augusto.....	89
FIGURA 5.2 – Perfis de distribuição das lâminas coletadas e lâmina média no pivô 14 Região de Cruz Alta.....	90
FIGURA 5.3 – Frequência relativa percentual de ocorrência do CUD, em sistemas de irrigação por pivô central, na Região de Cruz Alta e na Região de Santo Augusto.....	91
FIGURA 5.4 – Percentual de defeitos apresentados nos equipamentos na Região de Cruz Alta e na Região de Santo Augusto.....	92
FIGURA 6.1 – Esquema da perda de eficiência pelo sistema de irrigação por pivô central.....	94
FIGURA 6.2 – Rendimento de bombas de acordo com sua rotação específica.....	99
FIGURA 6.3 – Curvas de rendimento, altura manométrica e potência pela vazão nos conjuntos motor e bomba ensaiados na Região de Cruz Alta.....	108
FIGURA 6.4 – Curvas de rendimento, altura manométrica e potência pela vazão nos conjuntos motor e bomba ensaiados na Região de Santo Augusto.....	108
FIGURA 6.5 – Potência elétrica dissipada na adutora e potência elétrica recalculada com a adequação do diâmetro da adutora em cada equipamento.....	114
FIGURA 6.6 – Fluxo energético em alguns dos equipamentos de irrigação ensaiados na Região de Cruz Alta – RS.....	119

FIGURA 6.7 – Fluxo energético em alguns dos equipamentos de irrigação ensaiados na Região de Santo Augusto – RS.....	120
FIGURA 6.8 – Consumo específico do sistema de aspersão dos equipamentos estudados nas duas Regiões. Cruz Alta – RS (equipamento 1 ao 25) e Região de Santo Augusto – RS (equipamento 26 ao 39).....	122
FIGURA 6.9 – Consumo específico da tubulação lateral dos equipamentos estudados nas duas Regiões. Cruz Alta, RS (equipamento 1 ao 25) e Região de Santo Augusto, RS (equipamento 26 ao 39).....	122
FIGURA 6.10 – Consumo específico do sistema de adução dos equipamentos estudados nas duas Regiões. Cruz Alta, RS (equipamento 1 ao 25) e Região de Santo Augusto, RS (equipamento 26 ao 39).....	123
FIGURA 6.11 – Consumo específico do sistema de bombeamento dos equipamentos estudados nas duas Regiões. Cruz Alta, RS (equipamento 1 ao 25) e Região de Santo Augusto, RS (equipamento 26 ao 39).....	123
FIGURA 6.12 – Consumo específico normalizado e consumo específico dos equipamentos de irrigação estudados nas duas Regiões. Cruz Alta, RS (equipamento 1 ao 25) e Região de Santo Augusto, RS (equipamento 26 ao 39).....	126

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 – Consumo de energia e eficiência média para diferentes métodos de irrigação.....	27
TABELA 2.1 – Potencial de solos para desenvolvimento sustentável da irrigação em mil hectares – Brasil.....	37
TABELA 2.2 – Áreas irrigadas em cada região do Brasil por seus métodos.....	38
TABELA 5.1 – Classificação da uniformidade de distribuição de água em pivô central de acordo com a norma NBR 14244 (1998) da ABNT.....	88
TABELA 6.1 – Valores do coeficiente “K” da fórmula de Bresse para diversos valores de velocidade de escoamento.....	102
TABELA 6.2 – Rendimento nos conjuntos motor e bomba dos pivôs ensaiados na Região de Cruz Alta.....	106
TABELA 6.3 – Rendimento nos conjuntos motor e bomba dos pivôs ensaiados na Região de Santo Augusto.....	107
TABELA 6.4 – Rendimentos dos conjuntos motobomba máximos e aqueles encontrados nos equipamentos na Região de Cruz Alta - RS.....	109
TABELA 6.5 – Rendimentos dos conjuntos motobomba máximos e aqueles encontrados nos equipamentos na Região de Santo Augusto - RS.....	110
TABELA 6.6 – Indicadores de eficiência energética na adutora dos pivôs ensaiados.....	111

TABELA 6.7 – Indicadores de eficiência energética na adutora dos pivôs ensaiados.....	112
TABELA 6.8 – Indicador de eficiência das linhas laterais dos pivôs ensaiados.....	115
TABELA 6.9 – Indicador de eficiência das linhas laterais dos pivôs ensaiados.....	116
TABELA 6.10 – Indicador de eficiência do sistema de aspersão Região de Cruz Alta - RS.....	117
TABELA 6.11 – Indicador de eficiência do sistema de aspersão Região de Santo Augusto – RS.....	118
TABELA 6.12 – Consumo específico e eficiência nos equipamentos de irrigação na Região de Cruz Alta, RS.....	125
TABELA 6.13 – Consumo específico e eficiência nos equipamentos de irrigação na Região de Santo Augusto, RS.....	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANDA	Associação nacional para difusão de adubos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
N	Nitrogênio
ABIMAQ	Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos
PROAGRO	Programa de Garantia da Atividade Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization
ONU	Organização das Nações Unidas
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
PROFIR	Programa de Financiamento a Equipamentos de Irrigação
PROVARZEA	Programa Nacional de Valorização e Utilização de Várzeas Irrigáveis
PROINE	Programa de Irrigação do Nordeste
PRONI	Programa Nacional de Irrigação
LEPA	low energy precision application
IEC	International Electrotechnical Commission
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
CSA	Canadian Standards Association
CUC	Coeficiente de uniformidade de Christiansen
UH	Uniformidade de Hart
NBR	Norma Brasileira
CUD	Coeficiente de uniformidade de distribuição
ED	Eficiência de distribuição
ICEASE	Irrigation cost estimator and system evaluator
IWA	International Water Association
C _{ENI}	Consumo específico normalizado na irrigação

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	15
1. O CONTEXTO	15
1.1 Introdução	15
1.2 O cenário da irrigação	16
1.2.1 A irrigação no agronegócio	16
1.2.2 A sustentabilidade da produção	18
1.2.3 O aumento de produtividade e a qualidade das culturas	19
1.2.4 A irrigação no desenvolvimento econômico e social	21
1.2.5 A irrigação e a questão ambiental	23
1.2.5.1 A irrigação e a demanda de água	23
1.2.5.2 A irrigação e a demanda de energia	26
1.2.5.3 A irrigação e os recursos naturais	28
1.2.5.4 A irrigação e o desenvolvimento tecnológico	29
1.3 Características de projeto de sistemas irrigados por pivô central	30
1.4 Análise da eficiência do projeto	30
1.5 Objetivos	31
1.5.1 Objetivo geral	32
1.5.1.1 Objetivos específicos.....	32
1.6 Contribuição da tese	32
1.7 Estrutura da tese	33
CAPÍTULO II	35
2. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS EM ESTUDO	35
2.1 Introdução	35
2.2 O contexto da irrigação no mundo	35
2.2.1 Situação brasileira	36
2.2.2 Situação mundial	40
2.3 Caracterização dos dados em estudo	43
2.3.1 Procedimento do levantamento de campo	44
2.4 Características ambientais que condicionam os projetos de irrigação	45
2.4.1 Estudo de caso: região de Cruz Alta – RS e região de Santo Augusto - RS	46
CAPÍTULO III	51
3. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO DO TIPO PIVÔ CENTRAL	51
3.1 Caracterização do equipamento de irrigação tipo pivô central	51
3.1.1 O equipamento pivô central	51
3.1.2 Sistema de aspersão em pivôs	54
3.1.3 Canhão final em pivôs	55
3.2 Sistemas de recalque	55
3.2.1 Bombas hidráulicas	56
3.2.1.1 Curvas características	57
3.2.1.2 Cavitação	59
3.2.2 Motores de indução trifásicos.....	60
3.2.2.1 Motor de alto rendimento	62
3.2.3 Métodos de acionamento de um motor de indução	63
3.3 Adutora	65
3.4 Discussão e análise	66

CAPÍTULO IV	67
4. PROJETOS EM IRRIGAÇÃO: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE PROJETOS	67
4.1 Introdução	67
4.2 Procedimento metódico para o desenvolvimento de um projeto	68
4.2.1 Requisitos e necessidades.....	68
4.2.2 Engenharia de sistemas	69
4.2.3 O engenheiro projetista	71
4.2.4 Projeto	72
4.3 Projetos de sistemas irrigados	73
4.3.1 Fatores envolvidos no projeto de sistemas de irrigação	73
4.3.2 Eficiência e desempenho de sistemas irrigados	76
4.3.2.1 Equipamentos de qualidade.....	77
4.3.2.2 O planejamento e o projeto adequado dos sistemas de irrigação.....	77
4.3.2.3 O manejo racional da irrigação pelo produtor.....	78
4.3.2.4 A operação dos equipamentos de irrigação.....	79
CAPÍTULO V	81
5. AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO	81
5.1 Introdução	81
5.2 Avaliação de sistemas de irrigação	83
5.3 Metodologia e instalação do trabalho	85
CAPÍTULO VI	93
6. INDICADORES DE EFICIÊNCIA	93
6.1 Introdução	93
6.2 Eficiência e consumo de energia em irrigação	94
CAPÍTULO VII	129
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	129
7.1 Considerações finais	129
7.2 Recomendações para trabalhos futuros	133
BIBLIOGRAFIA	134

CAPÍTULO I

1. O CONTEXTO

1.1 Introdução

A preocupação crescente com a demanda mundial de alimentos, e o baixo estoque em que se encontram as reservas mundiais, está presente em todas as iniciativas governamentais para melhoria e expansão no agronegócio.

No Brasil, boa parte da população não tem uma alimentação satisfatória e, mesmo nesta condição, como a mesma está situada em centros urbanos, não tem a noção correta da importância da agricultura e pecuária na economia do país e na sua própria vida. De certa forma, este fator contribui para a falta de valorização destas atividades por parte da sociedade e, em consequência, dos governantes.

Com as recentes discussões envolvendo a questão ambiental e as percepções da sociedade com os efeitos decorrentes, principalmente com as rápidas alterações climáticas e a preocupação envolvendo os recursos hídricos; a agricultura, associada ao uso da água, está sofrendo duras críticas, mais propriamente a agricultura irrigada. Por ser uma grande usuária do recurso hídrico e de energia, ações referentes à racionalização e sustentabilidade dos projetos instalados devem ser amplamente estudadas.

Com o entendimento da importância que a técnica de irrigação possui, no contexto socioeconômico do agronegócio brasileiro, a sociedade pode compreender que a sustentabilidade dos projetos agrícolas está mais dependente do uso da própria irrigação do que a inexistência da mesma. A incerteza de produção, em áreas que já sofreram a ação em seu meio e, com os altos investimentos em insumos realizados para o cultivo, impactam mais no meio ambiente do que o próprio uso da técnica de irrigação.

O conhecimento da necessidade energética e hídrica para os projetos de irrigação estão, por vezes, condicionados às características do projeto do equipamento, características regionais do meio que estão ou serão instalados e as características de uso nas propriedades, sendo assim fundamental o conhecimento e a discussão dos dados em cada região. Neste contexto, e com disponibilidade de dados de duas regiões do Rio Grande do Sul, são

estudados os dados característicos para os projetos de irrigação por aspersão com pivôs centrais nas mesmas.

1.2 O cenário da irrigação

1.2.1 A irrigação no agronegócio

Uma das necessidades humanas é a alimentação, e são os cultivos agrícolas que suprem a mesma. A maneira como se estrutura a sociedade hoje, com uma parcela muito grande da população distante do ambiente de produção, faz com que o setor agropecuário tenha que aumentar sua eficiência na produção de alimentos.

Com uma necessidade cada vez maior de eficiência, para atingir a demanda, o setor agropecuário necessita uma série de trabalhos complementares, que formam o agronegócio, estabelecido na produção agrícola, mas que abrange uma cadeia grande de fornecedores e consumidores, para atingir o fim desejado.

Dentro de toda a relação comercial e industrial envolvendo a cadeia produtiva agrícola ou pecuária, chamado agronegócio, a irrigação se insere e ocupa seu espaço como uma técnica presente na produção vegetal, que também gera atividades fora deste campo específico. Em setores industriais, tanto na produção dos equipamentos utilizados para a irrigação, quanto nas indústrias de transformação de alimentos, com a garantia de produto para seu funcionamento.

Segundo Lopes et al. (2007), analisando dados de consumo de fertilizantes, um aspecto que chama a atenção é o aumento considerável no consumo aparente de nitrogênio (N), quando se comparam os dados de 1,18 milhões de toneladas em 1994 e 2,24 milhões de toneladas em 2004, conforme Figura 1.1.

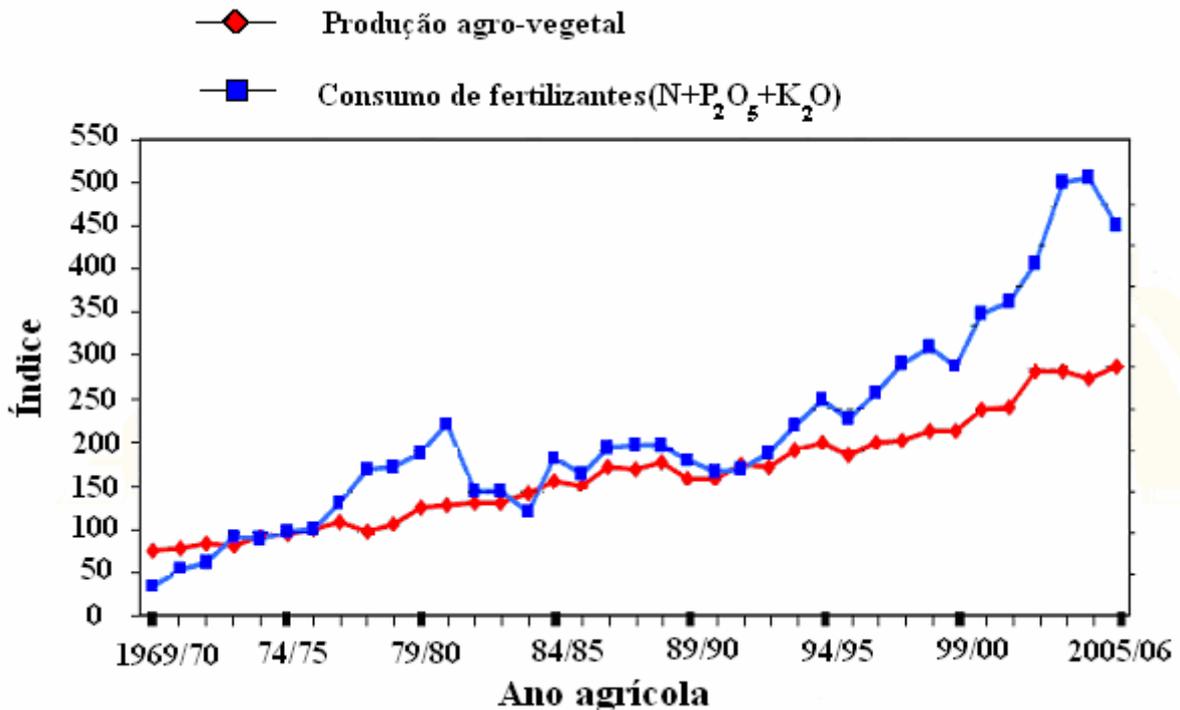


Figura 1.1 – Produção agro-vegetal (peso seco das 16 principais culturas) e consumo de nutrientes no Brasil (1969-1970 a 2005-2006) (Índice 100: Produção = 67,2 milhões de toneladas; Consumo de fertilizantes = 1,89 milhões de toneladas).
 Fonte: adaptado de Lopes et al. (2007).

No ano de 1974/75 o índice da produção agro-vegetal e o consumo de fertilizantes era próximo de 100, já em 2005/06 o índice para o consumo de fertilizantes estava próximo de 450, enquanto que o índice de produção vegetal próximo de 300. Houve um grande incremento na aquisição de fertilizantes, pela agropecuária, nos últimos dez anos, na intenção de melhorar a produtividade e intensificar a produção, para atender toda a demanda de alimentos, o agronegócio se estabelece de forma sólida.

O agronegócio se estabelece dentro de uma esfera mundial, realizando estratégias e trocas para atender não somente o país em que está inserido como também o mundo, que está necessitando de produtos agrícolas. O País se beneficia desta demanda mundial em torno dos alimentos e faz uso do agronegócio para estabelecer uma força política internacional.

Toda esta situação também expõe a agricultura nacional e a induz a se adaptar a circunstâncias impostas por diversos mercados, buscando eficiência e competência para competir com este mercado maior.

Neste caminho, segundo a Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (ABIMAQ) (2002), dentre os recursos tecnológicos disponíveis, a técnica de irrigação, sempre que utilizada de forma racional, tanto nos aspectos técnicos quanto econômicos, pode contribuir de forma importante para o bom desempenho do agronegócio.

1.2.2 A sustentabilidade da produção

Diversas são as informações, internas e externas, analisadas quando existe a intenção de fazer o investimento em áreas irrigadas, sendo que algumas delas destacam mais os benefícios relacionados à técnica e o crescimento do setor agrícola.

A irrigação pode ser planejada para suprir toda a necessidade hídrica de uma cultura ou projetada para atender somente uma parcela de déficit entre a quantidade precipitada e a necessidade da cultura. Em ambas as situações, seu papel fundamental é a redução do risco de perdas na produção.

A redução dos riscos de quebra de safras, com a implantação de sistemas irrigados, é um benefício atrativo e importante para a análise do investimento em áreas já em produção, e nas áreas com previsão de implantação de produção agropecuária.

A irrigação deve ser tratada como um dos fatores que influenciam na produção, sendo de suma importância o conhecimento dos outros elementos com seu grau de influência no produto final.

Barreto et al. (2004) demonstram alguns dos fatores que estão envolvidos no rendimento das culturas, cada um com uma parcela de contribuição para a máxima produção. Bernardo (2005), também comenta sobre estes elementos e, cita a água e a adubação como os que mais limitam o rendimento das culturas, quando se considera um bom material genético e um adequado controle fitossanitário.

O apoio dado ao produtor pelo governo tem contado com programas de crédito para investimento em equipamentos e investimento na cultura, entre eles o crédito rural, o Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (PROAGRO), e o seguro rural. Também foi criado o programas de apoio à política agrícola, que restringe o cultivo em áreas com restrições climáticas, o zoneamento agrícola. Mediante o mapeamento de áreas ou regiões do país, com características climáticas adequadas para a semeadura das culturas, zoneadas por municípios, e relacionado com o tipo da cultura, o ciclo da semente, o tipo de solo e a oferta hídrica existente em cada região, é possível reduzir os riscos climáticos para uma determinada cultura, desde a semeadura até a colheita.

O zoneamento agrícola aliado à utilização de novas técnicas de produção, com ajuda da irrigação, será sempre elemento importante para auxiliar a obtenção de boas safras e, por conseguinte, para estimular o agronegócio no Brasil.

A irrigação complementar, utilizada nas regiões que a precipitação pluviométrica permite o cultivo, proporciona um maior desenvolvimento das culturas com menor quantidade de água aplicada pelo sistema de irrigação. Com os eventos de precipitação intercalados aos de irrigação, minimiza-se as influências da falta de uniformidade dos equipamentos de irrigação, exige-se equipamentos de menor capacidade de aplicação de água e com isso, menor investimento.

Quando é estabelecida uma área de cultivo, investe-se em energia, mão-de-obra, insumos, e hoje o que pode ser mais atenuante, a ocupação da área. Como ainda não se conseguem prognósticos de precipitação para o período integral da cultura com ótima aproximação, sem a segurança da irrigação tem-se o risco de, além de não obter lucro da exploração, ter ainda prejuízo do investimento realizado, e aumentar o dano ambiental gerado pela atividade.

1.2.3 O aumento de produtividade e a qualidade das culturas

Vários são os estudos comparando as produtividades em culturas que sofrem algum tipo de stress hídrico, em relação aqueles que tem disponibilidade total de água no seu desenvolvimento. Esta redução na produção, muitas vezes inviabiliza cultivos em determinadas regiões do país, como no nordeste brasileiro, pela total falta de precipitação em determinadas épocas do ano; e em outras regiões também pode inviabilizar, mas pelos períodos de veranicos cada vez mais comuns.

Vários fatores referentes ao solo, à planta e à atmosfera interagem entre si, determinando a produtividade das culturas agrícolas. Certamente existe uma relação funcional entre esses fatores e a produção das culturas, característica de cada condição ambiental. A resposta das culturas à irrigação pode variar em diferentes solos, climas e também em decorrência da quantidade e frequência de aplicação de água.

A produtividade de algumas culturas brasileiras sob condições de cultivo irrigado, comparadas com a produtividade média de sequeiro, que podem ser vistas na Figura 1.2, com os respectivos percentuais de incremento de produtividade.

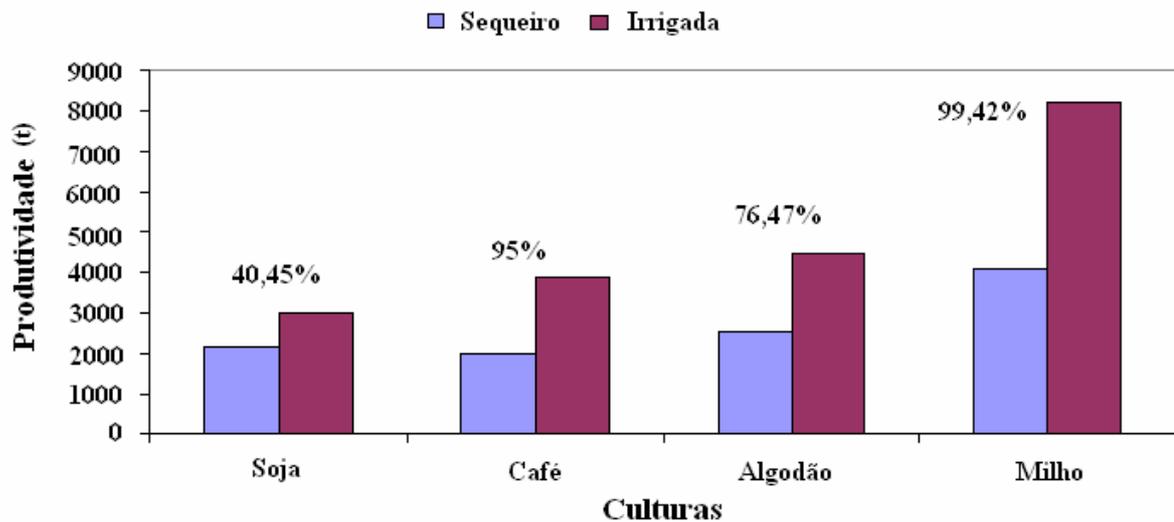


Figura 1.2 – Produtividades médias brasileiras comparadas com culturas irrigadas.

Fonte: IBGE (2009).

O incremento de produtividade e a participação da irrigação na produção de alimentos ficam evidenciados quando se constata, através de dados, da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2000), que apenas uma parcela de 1/6 da área mundial cultivada é irrigada, sendo responsável por 2/5 da produção de alimentos.

Cristofidis (2006) estima que no mundo, 18% da área de agricultura está com cultivo irrigado e a mesma produz 44% da produção total agrícola, enquanto a agricultura de sequeiro responde pelo restante. Ainda segundo o autor, existem no mundo cerca de 800 milhões de pessoas em condições de insegurança alimentar.

Analisando estes dados, verifica-se que uma decisão a qual limita o uso da irrigação pode afetar enormemente a disponibilidade de alimentos, com conseqüências sociais, econômicas e principalmente ambientais.

Segundo a FAO (1990 apud BARRETO et al., 2004), a distribuição percentual das culturas irrigadas no mundo aproxima-se da mostrada na Figura 1.3.

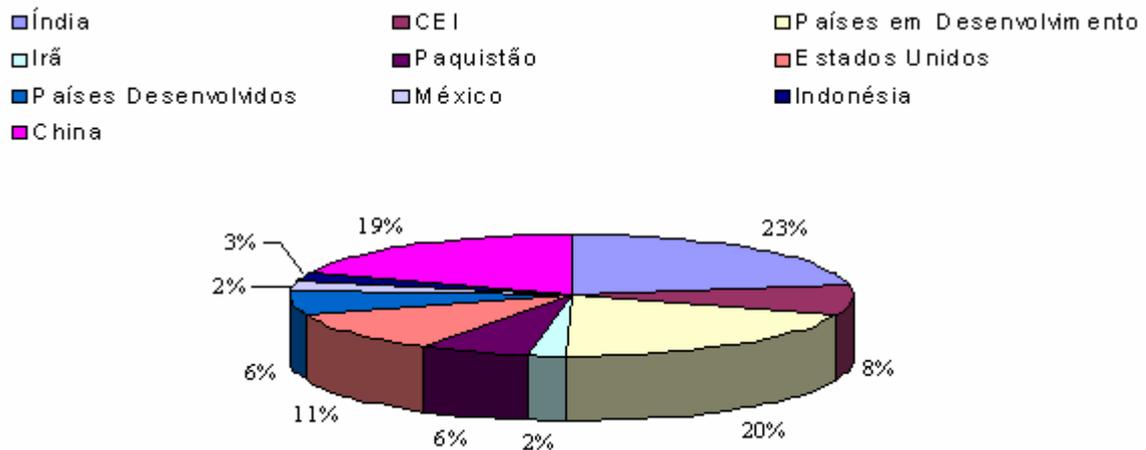


Figura 1.3 – Distribuição percentual das culturas irrigadas no mundo.
 Fonte: FAO, IRRI, CYMMYT (1990).

Como um fator positivo da irrigação, ainda pode-se ressaltar que algumas espécies de plantas, sob o regime controlado de irrigação e de fertilizantes, apresentam melhoria de qualidade no produto final. É o caso, principalmente, de frutas e legumes, cujas qualidades para o consumo, como tamanho e teor de açúcar, podem ser conduzidas pela irrigação.

Segundo Barreto et al. (2004), o aumento do índice anual de uso da terra, que mede o número de safras ou colheitas por ano numa mesma área de cultivo, é outro aspecto vantajoso para o agronegócio quando se utiliza a irrigação como prática agrícola. No entanto, a probabilidade de auferir maiores lucros somente é possível quando há gerenciamento técnico eficiente, visando otimizar o rendimento das culturas dentro dos potenciais de resposta dos diversos fitossistemas envolvidos na cadeia de produção.

1.2.4 A irrigação no desenvolvimento econômico e social

A Lei 8.171/91, que dispõe sobre a Política Agrícola, corretamente define a irrigação como fator de bem-estar social de comunidades rurais. Então, legalmente, a irrigação é considerada como elemento fomentador do desenvolvimento socioeconômico. Em outros países a irrigação também é vista como indutora de atividades industriais e comerciais, capaz de contribuir para o progresso da economia, com geração de empregos e responsável pela circulação de riquezas.

Dentro do enfoque social, os empreendimentos voltados para a agricultura irrigada nas regiões áridas e semi-áridas têm gerado alimentos para milhões de seres humanos desde tempos remotos até hoje e melhorado as condições de vida de numerosas populações, segundo Barreto et al. (2004).

Segundo Bernardo et al. (2005), é importante ter em mente a importância da agricultura irrigada, que apresenta muitas vantagens, destacando-se a maior produção (mais de um cultivo por ano), produtividade (melhores condições de desenvolvimento da cultura) e geração de empregos permanentes com os menores níveis de investimento comparativamente a outros setores da economia, promovendo o aumento da renda e a diminuição do êxodo rural e melhorando sensivelmente as condições de vida dos produtores e suas famílias.

Segundo Christofidis (2006), a melhoria da qualidade da irrigação possibilita auxiliar a reverter a situação de um grupo com cerca de 30 milhões de pessoas no Brasil que se situa na condição de pobreza, com uma renda mensal, por pessoa, inferior a R\$ 80,00. Há outro grupo, ainda, em pior situação: cerca de 23 milhões de miseráveis, em estado de indigência, pois não tem acesso aos alimentos mínimos necessários à manutenção saudável de uma vida produtiva, algo em torno de 2.000 calorias.

Sobre o assunto, Bernardo et al. (2005), trazem informações referentes às regiões onde foi implantada a agricultura irrigada e, indicam mudanças socioeconômicas importantes, como: criação de empregos diretos; aumento da renda per capita; crescimento considerável da demanda de bens de consumo e serviços, com aumento de estabelecimentos comerciais e industriais e do emprego nestes setores; diminuição do êxodo rural e; melhoria das condições de saúde, educação, habitação e lazer dos irrigantes.

A viabilização da produção de alimentos com redução de riscos, gerando empregos e aumento de renda para o setor rural faz da irrigação uma técnica que deveria ter a sua utilização fomentada de forma racional para permitir o desenvolvimento sócio-econômico de regiões brasileiras pouco favorecidas.

A adoção da agricultura irrigada pode significar o aumento sustentado da produção e produtividade agrícolas, a elevação dos níveis de renda e a conquista de melhoria das condições de vida da população rural, sendo fator importante para manutenção do homem no campo.

1.2.5 A irrigação e a questão ambiental

Um dos grandes paradigmas vividos na atualidade é o combate à fome mundial, e para isto o setor agrícola procura com eficiência o aumento da produção de alimentos. Essa busca leva à utilização cada vez maior dos recursos naturais por parte da agricultura, causando muitas vezes a degradação ou modificação em ambientes naturais, e quando existem problemas de manejo, o comprometimento dos recursos naturais utilizados.

A irrigação, constituindo uma técnica que participa intensamente do processo de produção de alimentos pode se tornar um fator de potencialização dos efeitos adversos oriundos da atividade agrícola. A aplicação freqüente de água sobre a cultura determina um padrão de produção diferenciado, podendo intensificar os impactos gerados pela atividade agrícola e que, muitas vezes, são incorretamente imputados somente à irrigação.

Segundo Paz et al.(2000), assegurar a produção de alimentos dentro dos limites da natureza significa utilizar os recursos de maneira eficiente, ou seja, converter os recursos limitados em produtos úteis, viáveis economicamente, porém diminuindo as repercussões sobre o meio ambiente durante a produção, manuseio e comercialização.

O uso da irrigação tem sofrido sérias críticas ultimamente, principalmente quando relacionadas com os problemas de escassez de água e de energia. Assim, tornam-se necessários esclarecimentos técnicos fundamentados para que ações não sejam concretizadas na tentativa de resolver os problemas de falta de água, resultando em dificuldades ainda maiores à utilização dessa técnica pelos agricultores.

Ainda segundo Paz et al. (2000), o desenvolvimento da agricultura irrigada exige procedimentos tecnológicos e econômicos para otimizar o uso da água, para a melhoria de eficiência de aplicação e ganhos de produtividade baseados na resposta da cultura à aplicação de água e outros insumos sem, contudo, comprometer a disponibilidade e qualidade do recurso.

1.2.5.1 A irrigação e a demanda de água

Na Figura 1.4, o gráfico da distribuição do consumo de água no Brasil salienta a participação de cada usuário na utilização do recurso hídrico em nosso país.

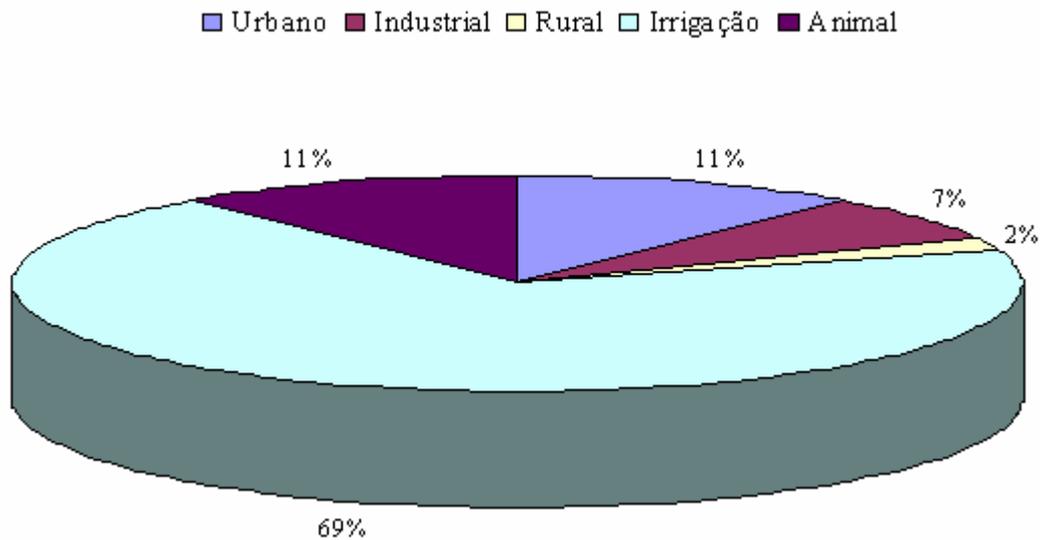


Figura 1.4 – Consumo de água para diferentes usos no Brasil.

Fonte: Adaptado de ANA (2004).

Seguindo a tendência mundial, o setor da agricultura irrigada, no Brasil, também utiliza a maior fatia do total de água. Este grande volume está associado normalmente à utilização com desperdício ou perda, e desta forma a agricultura é considerada como responsável pelo consumo excessivo de água.

A produção de alimentos é uma atividade essencial para a existência humana que demanda efetivamente muita água. A chuva é a sua principal fonte e, na falta desta, a irrigação supre essa necessidade, de forma parcial ou integral, dependendo da região do país.

Para uma planta atingir o potencial produtivo, é requerido um volume de água para o respectivo metabolismo que pode ser considerado extremamente alto quando comparado com outros tipos de usos.

A Figura 1.5 apresenta o consumo médio de água requerido, em litros, para se produzir um quilograma de diferentes produtos agrícolas, nas condições climáticas normais do município de Campinas, SP. Esses valores de consumo de água por unidade produzida irão variar para as regiões brasileiras, pois dependem da produtividade obtida e das condições climáticas existentes.

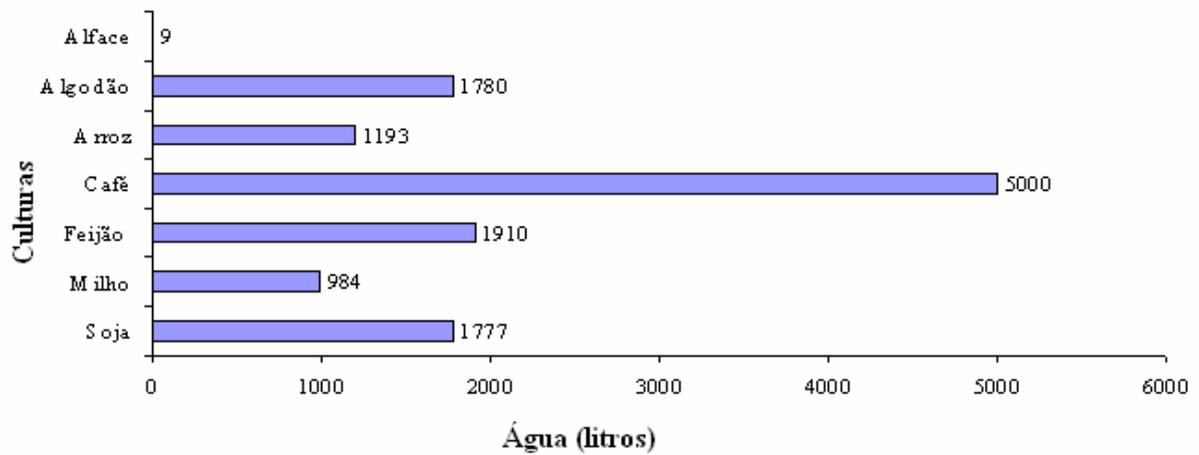


Figura 1.5 – Consumo médio de água para produzir um quilograma de massa de produto em Campinas, SP.

Fonte: Adaptado de Brown (1990).

O volume, em litros, de água necessários na Califórnia, EUA, para produzir 1 quilo de alimento é apresentado na Figura 1.6.

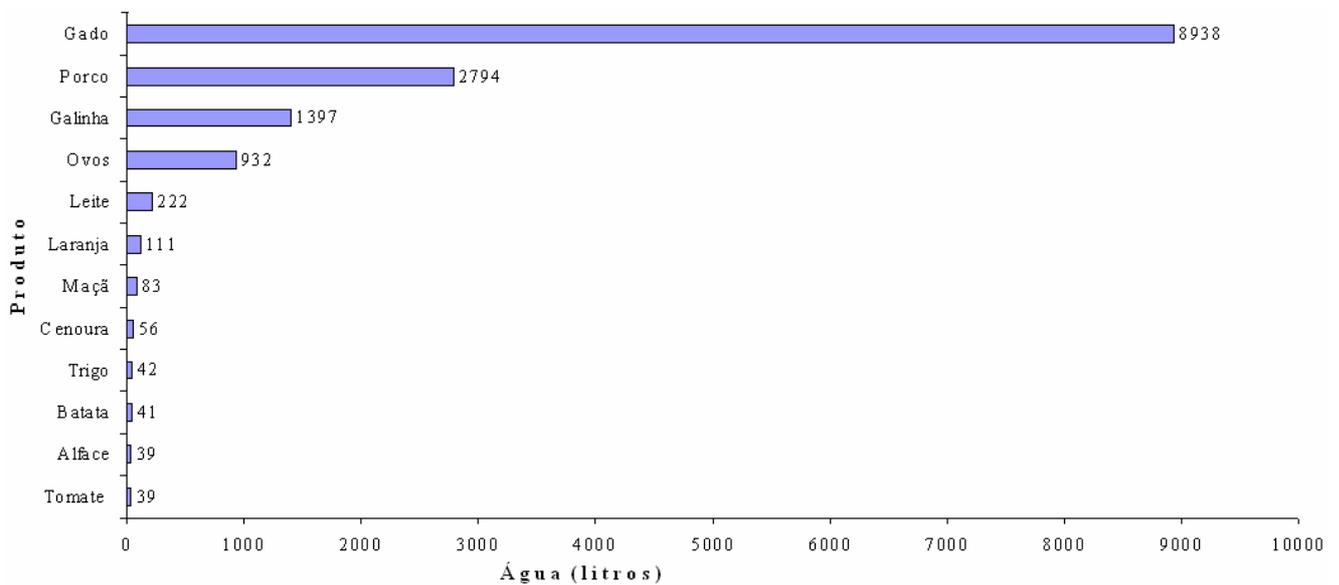


Figura 1.6 – Consumo médio de água para produzir um quilograma de massa de produto na Califórnia, EUA.

Fonte: Adaptado de Brown, 1990.

Os números, apresentados por Brown (1990) nas Figuras 1.5 e 1.6, são elevados, entretanto, não se deve esquecer que, para a maioria das regiões do Brasil, a chuva é a

principal fonte dessa água.

A dieta alimentar básica, de alguns países, indica a existência de alta discrepância no consumo per capto de grãos consumidos direta e indiretamente pela utilização de produtos de origem animal, o que repercute no consumo de água necessária a alcançar a produção dos correspondentes cultivos que servem de ração. Na Figura 1.7 visualiza-se o consumo de grãos e o valor correspondente de água em diversos países.

PAÍSES	GRÃOS			ÁGUA	
	Origem Animal	Origem Vegetal	Total kg/ano	Litros/ano	Litros/dia
Canadá	521	450	971	971.000	2.660
EUA	445	415	860	860.000	2.356
Itália	235	175	410	410.000	1.123
Mundo	263	123	386	386.000	1.057
China	192	108	300	300.000	821
Brasil	178	99	277	277.000	758
Índia	118	82	200	200.000	547
Haiti	65	35	100	100.000	273

Figura 1.7 – Consumo de grãos por habitante e equivalente em água.

Fonte: Lester Brown (1990), Christofidis (1998)

O consumo de grãos equivalentes tem alta repercussão no consumo de água para a produção dos alimentos vegetais e na produção das rações dos animais, pela conversão da ração necessária aos animais de acordo com seu porte para produzir os alimentos utilizados na dieta humana.

1.2.5.2 A irrigação e a demanda de energia

O Brasil sendo um dos países considerados em desenvolvimento tem sua área de irrigação ampliada a cada ano, e com ela também a necessidade de energia, principalmente a

elétrica, pois aumenta a viabilidade do projeto. Percebe-se que, em algumas regiões do país, existe uma falta de capacidade de atendimento em determinadas épocas do ano, e ocorre justamente no período do ano quando existe a maior necessidade de se complementar a demanda de água das culturas irrigadas.

Essa relação entre a existência da água e a produção de energia é uma característica brasileira que começou com o Código das Águas de 1934. Mais de 82% da energia elétrica atualmente consumida é de origem hídrica, o que torna o sistema elétrico brasileiro extremamente concentrado e dependente desta fonte energética (ANEEL, 2001).

De acordo com a CEMIG (1993), o consumo médio de energia de uma área irrigada é de 2.714 kWh.ha⁻¹.ano⁻¹. Assumindo que toda a área irrigada brasileira utiliza energia elétrica, o que não é uma realidade, pode-se estimar o consumo de energia elétrica para irrigação no Brasil em 7.789 GWh.ano⁻¹, correspondendo a 1,40% da capacidade instalada de geração hidráulica do país. Esses números mostram claramente que, como consumidora de energia, a irrigação participa muito pouco da energia disponível no país.

Marouelli e Silva (1998) apresentaram os valores do consumo médio de energia por método de irrigação, sendo a comparação entre eles mostrada na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Consumo de energia e eficiência média para diferentes métodos de irrigação.

Método de Irrigação	Eficiência de Irrigação (%)	Uso de Energia (kWh/m³)
Superfície	40 a 75	0.03 a 0.3
Aspersão	60 a 85	0.2 a 0.6
Localizada	80 a 95	0.1 a 0.4

Fonte: Marouelli. e Silva (1998).

Mesmo sendo constatado o baixo valor de consumo energético pela atividade irrigada, sua importância e seu potencial de crescimento constituem um setor com bom potencial de economia de energia. Técnicas de manejo da irrigação e o conhecimento das características do desempenho dos equipamentos de irrigação, também constituem fatores de garantia de economia de água e energia, desejada no processo produtivo da agricultura irrigada.

1.2.5.3 A irrigação e os recursos naturais

Tecnicamente consideramos os equipamentos de irrigação como mecanismos de desenvolvimento e sustentabilidade para a produção agrícola, mas é necessário esclarecer que sistemas de irrigação inadequadamente projetados e manejados de forma não apropriada podem gerar impactos negativos que comprometam o seu desenvolvimento. Geralmente, esses impactos afetam primeiramente os recursos naturais e os seus efeitos terão conseqüências tanto sociais como para a atividade econômica propriamente dita.

Devido ao progressivo esgotamento dos recursos naturais e aos efeitos visíveis da deterioração ambiental, o conceito de desenvolvimento sustentável refere-se à capacidade de se obter maiores níveis de bem-estar, sem comprometer a base que sustenta a população atual, mas satisfazendo a necessidade das gerações futuras (Valenzuela et al., 1994).

O recurso hídrico que irá suprir a área irrigada terá o primeiro impacto com mudança principalmente em seu volume, com um projeto adequado e manejo correto, os efeitos negativos da técnica são minimizados.

Na área irrigada, o solo também pode sofrer o impacto de aplicações excessivas de água, causando tanto a compactação como a desagregação de suas partículas. O escoamento superficial pode transportar sedimentos e nutrientes, retirando a camada superficial e expondo horizontes mais profundos inférteis, ocasionando o efeito da erosão.

Segundo Paz et al. (2000), diversas manifestações de deterioração ambiental conspiram contra a possibilidade de incrementar a produção alimentar e, sobretudo, assegurá-la às futuras gerações. É necessário que se revertam certas tendências, como processos de desertificação, que ameaçam 70% das áreas secas produtivas e devastação florestal, que têm convertido ecossistemas naturais em áreas de pecuária, inundação e salinização, erosão e perdas de solos e rebaixamento dos níveis freáticos subterrâneos, entre outros.

A aplicação de lâminas excessivas que ultrapassem a capacidade de infiltração do solo pode causar a lixiviação, tanto das partículas menores do solo como dos nutrientes, para camadas mais profundas, ficando fora do alcance do sistema radicular. O resultado de aplicações excessivas de água e a lixiviação podem ainda causar a contaminação de águas superficiais e subterrâneas, trazendo sérios prejuízos e comprometendo a flora e a fauna característica da região.

Entretanto, esses efeitos adversos podem ser solucionados se ações forem tomadas de forma a minimizar as respectivas causas.

Algumas ações podem ser recomendadas para otimizar o uso e minimizar os impactos: equipamentos devem ser projetados e fabricados atendendo normas de qualidade e adaptados às condições brasileiras; os dimensionamentos dos sistemas de irrigação devem estar adequados às necessidades da cultura e às condições da propriedade; o manejo de água deve ser realizado racionalmente, atendendo as necessidades da cultura e as limitações do solo da propriedade; a operação dos equipamentos deve atender as especificações de projeto e as técnicas de cultivo devem ser apropriadas à lavoura irrigada.

A irrigação precisa ser operada de forma eficiente e adequada, sob o ponto de vista ambiental, por todos os agentes que se relacionam à técnica, como irrigantes, projetistas, fabricantes, pesquisadores, para não se tornar um elemento gerador de problemas oriundos da produção intensiva.

1.2.5.4 A irrigação e o desenvolvimento tecnológico

Conhecer a técnica e sua aplicação possibilita a minimização dos impactos negativos ao ambiente, por isso é necessário o desenvolvimento de soluções tecnológicas que provoquem melhorias, viabilizando a atividade agrícola irrigada, de forma adequada. Tornar a técnica um pilar de sustentabilidade para a produção de alimentos, deve ser o objetivo almejado, pois os efeitos positivos parecem ser maiores, e a capacidade de produção de alimentos tem necessidade de ser ampliada com sustentabilidade para o produtor e para o ambiente.

A evolução da irrigação nos últimos anos introduziu uma série de inovações tecnológicas que possibilitam aos equipamentos controlar de forma mais adequada e automatizada a aplicação da água. Isto se traduz em um processo mais eficiente, permitindo manejar de forma mais precisa as demandas hídricas das culturas, de forma a possibilitar, assim, aumentos importantes na quantidade e melhorias da qualidade dos produtos explorados.

Segundo Paz et al. (2000), nos últimos anos tem-se registrado uma revolução na ciência e na arte da irrigação; tem-se alcançado, também, alto conhecimento das relações interativas entre os solos, cultivos e água, decorrentes do clima e dos métodos de aplicação de água.

Esses avanços tecnológicos coincidem com uma série de inovações com recursos computacionais que permitiram a adoção de práticas mais eficazes de aplicação de água, adubos, controle de umidade no solo e estimativa da necessidade de água das culturas, a partir de complexos modelos agroclimatológicos.

1.3 Características de projeto de sistemas irrigados por pivô central

Inserido na técnica de irrigação, o sistema de irrigação por aspersão do tipo pivô central é condicionado a um projeto técnico, para que obtenha êxito na aplicação de água; nas situações em que não é considerado, normalmente ocorrem problemas de sustentabilidade da área irrigada, em função da energia consumida ou do manejo do mesmo. O projeto do sistema irrigado pode ser determinado de diversas maneiras, em uma mesma situação encontrada.

A uniformização dos projetos é difícil de ser obtida, pela quantidade de variáveis envolvidas, segundo Frizzone (2003) o projeto de irrigação compreende informações internas e externas, coletadas e processadas com o objetivo de analisar uma decisão de investimento.

Com o uso da informática, o projeto do sistema se tornou mais rápido de ser calculado, e quando não é tomado o cuidado necessário, ocorrem erros lógicos nos projetos, em função do programa computacional utilizado. A necessidade de um projetista com cuidado e experiência é fundamental para o sucesso do projeto.

A falta de informações técnicas relacionadas ao projeto hidráulico, mecânico e elétrico, que podem ser utilizadas como base na elaboração dos mesmos, principalmente quando na área de instalação existem limitações, é uma deficiência encontrada na revisão bibliográfica realizada, onde são resgatadas equações empíricas e, estas ajustadas de acordo com a necessidade em cada situação.

1.4 Análise da eficiência do projeto

Em todas as regiões, são encontrados equipamentos com deficiências de projeto e instalação, comprometendo a eficiência de conversão de energia e água em produto para consumo podendo, com isso, comprometer o uso da técnica para algumas culturas.

Normalmente o produtor não está ciente destas deficiências, utiliza equipamentos impróprios ou ineficientes para produção, obtendo resultados de rentabilidade baixos ou mesmo negativos.

A definição de níveis de uniformidade também afeta as decisões de projeto. A aquisição, ou instalação de um sistema caracterizado por alta uniformidade de aplicação de água, e, portanto, maior eficiência de aplicação, pode ser postergada, por requerer substancialmente maiores investimentos iniciais e operacionais do que um sistema menos satisfatório.

Segundo Lima (2008), para os órgãos governamentais e privados ligados à irrigação, existe uma grande deficiência em relação aos índices apropriados para estabelecer o conceito de eficiência sobre projetos ou sistemas de irrigação, ficando estes, normalmente, direcionados a aspectos quantitativos de consumo.

A condição de comercialização de produtos com uma menor margem de ganho, associado à necessidade da sociedade em aumentar a eficiência energética e a eficiência da água para produção agrícola, fortalece a necessidade da criação e utilização de uma ferramenta de apoio ao técnico, ao produtor e à sociedade. Esta ferramenta objetiva medir a eficiência de sistemas irrigados e direcionar as medidas corretivas para melhoria dos mesmos.

Considerando a falta de uma legislação específica para etiquetagem ou padronização da eficiência energética de sistemas de irrigação e a busca pela redução do seu custo em detrimento de sua eficiência, bem como problemas com a manutenção e modernização, nos sistemas de irrigação existe um elevado potencial para implantação de medidas de eficiência energética. Para tal, é necessária a quantificação de alguns parâmetros para que se forme uma base para os trabalhos de efficientização.

1.5 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são fundamentados na importância da avaliação dos equipamentos de irrigação e principalmente em relação aos seus projetos técnicos.

1.5.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em fornecer critérios de projeto para equipamentos de irrigação do tipo pivô central, que possam elevar o índice de eficiência dos equipamentos a serem instalados, e com isso otimizar a técnica de irrigação dentro da sustentabilidade de cultivos irrigados.

1.5.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos que contribuem para o objetivo geral da tese são:

- Caracterizar as regiões de estudo e identificar fatores externos ao projeto que possam interferir no mesmo;
- Conceituar a técnica de elaboração de projeto, identificar e quantificar os elementos do projeto de sistemas irrigados com equipamentos do tipo pivô central;
- Apresentar as principais características de eficiência em sistemas irrigados;
- Quantificar e ajustar indicadores de eficiência desenvolvidos para sistemas de irrigação tipo pivô central.

1.6 Contribuição da tese

No levantamento bibliográfico realizado, pôde-se perceber que os sistemas irrigados instalados normalmente não possuem um acompanhamento periódico em relação aos seus desempenhos econômicos de utilização de água e energia. Este desempenho deve ser estimado já em seu projeto, sendo este muitas vezes realizado sem o uso de critérios técnicos apropriados.

Existem vários critérios de projeto que podem ser utilizados, de acordo com suas características, sendo, muitas vezes, estas também não são levadas em consideração. Uma questão importante também é a falta de literatura sobre as características específicas dos projetos de sistemas irrigados, muitas vezes restritos somente aos fabricantes de equipamentos, sendo indisponíveis ao público.

Quando já em funcionamento, o equipamento de irrigação, deve também passar por avaliações periódicas, e caracterizações em termos de consumo de energia e água. Alguns critérios devem ser criados, para servirem de pontos referenciais para a avaliação. Conhecer os equipamentos instalados e fazer a verificação em cada região de suas características, nos dá informações para construir estes pontos referenciais de projetos, cada vez mais adaptados e orientados a determinadas condições.

Em face do exposto, acredita-se que, primeiramente a discussão das características regionais encontradas nos dados, e em segundo plano a discussão das características de projeto que devem ou podem ser utilizadas facilita a elaboração e instalação de equipamentos cada vez mais sustentáveis para a agricultura em cada uma das regiões. Também os critérios de avaliação estudados, podem contribuir para uma caracterização mais específica dos dois pontos fundamentais nos projetos, o consumo de energia e água dos equipamentos.

1.7 Estrutura da tese

O conteúdo da tese está estruturado em sete capítulos, descritos a seguir:

No Capítulo I, são destacadas as motivações para o tema da pesquisa e também para o contexto de aplicação, o problema e os objetivos.

No Capítulo II, é exposto o ambiente da irrigação nas regiões estudadas, com características básicas de áreas irrigadas, desníveis encontrados, e potências exigidas, sendo ao final ampliada a quantidade de informações sobre irrigação nas regiões trabalhadas.

No Capítulo III, é conceituado o sistema de irrigação por pivô central, características hidráulicas e aspectos construtivos. A identificação de problemas encontrados em diversas montagens, decorrentes de problemas de projeto, montagem ou operação.

No Capítulo IV, são apresentados fundamentos sobre um projeto, e o projeto de sistemas irrigados. A identificação de pontos críticos na construção do projeto e a clareza na montagem do mesmo são fatores de auxílio para os projetistas de sistemas irrigados; tratados também neste capítulo.

No Capítulo V, são discutidas as eficiências nos projetos de irrigação, as distribuições de uniformidade dos equipamentos, entre outros aspectos relacionados ao seu manejo.

No Capítulo VI, são apresentados indicadores de eficiência relacionados aos equipamentos de irrigação por pivô central, testados com os dados disponíveis para cada uma

das regiões estudadas. No final do capítulo existe a tentativa de aumentar a confiabilidade dos indicadores e também sugerir melhoria nos mesmos.

Por fim no Capítulo VII, são apresentadas as considerações finais do trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

Este capítulo procura caracterizar a irrigação no contexto mundial, nacional, atingindo também as regiões estudadas, com características básicas de áreas irrigadas, desníveis encontrados, e potências exigidas, sendo ao final ampliada a quantidade de informações sobre irrigação nas regiões trabalhadas.

2. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS EM ESTUDO

2.1 Introdução

A preocupação com o desenvolvimento do agronegócio, com uma base de sustentação econômica, ambiental e social, deve ser o motivo de busca em todas as regiões do país. Existem características próprias de cada região em cada uma das esferas, e a busca pelo equilíbrio, é o grande desafio.

O conhecimento sobre os mecanismos de produção, e principalmente os potenciais de produção da região, com os equipamentos e o balanço energético e de consumo de água utilizado na região traz à sociedade informações para que a produção possa ser diversificada e ao mesmo tempo economicamente viável ao produtor. Esta é a busca da agricultura sustentável, compatibilizar informações e procedimentos de controle da disponibilidade e qualidade dos recursos disponíveis.

2.2 O contexto da irrigação no mundo

A evolução da superfície dominada com sistemas de irrigação e drenagem destinadas à agricultura, no Brasil, indica que, no período de 27 anos (1975/2004), houve a incorporação de área da ordem de 2,4 milhões de hectares (CHRISTOFIDIS, 2006).

Mesmo conhecendo a contribuição positiva da irrigação ao setor agroindustrial brasileiro, participando em 16% da produção, nota-se que o Brasil possui uma área irrigada pequena quando comparada com a área cultivada, ou com sua área potencialmente irrigável, ou ainda com os dados de outros países do mundo. Cabe então realizar uma análise do caminho natural de desenvolvimento em que o país segue, suas implicações e riscos por conta do impacto social, econômico e ambiental que a técnica pode trazer.

Como este desenvolvimento é mais recente que nos outros países, pode-se afirmar que essa expansão se dará de forma mais eficiente, se forem tomados alguns cuidados no projeto e aplicação dos equipamentos utilizados, até mesmo no manejo da irrigação, visando o aumento das disponibilidades alimentares e o desenvolvimento econômico nacional, conservando ao máximo o ambiente em que estão inseridos.

2.2.1 Situação brasileira

Atualmente, o Brasil ocupa lugar de pouca expressão entre os países que utilizam a irrigação intensivamente. Apesar de possuir uma superfície territorial de 851 milhões de hectares, o país utiliza com agricultura, segundo o IBGE (2006), cerca de 249 milhões de hectares, dos quais 76,7 milhões com lavouras e 172,3 milhões com pecuária. A Figura 2.1 apresenta, de acordo com o IBGE, a ocupação das terras brasileiras no censo de 2005/2006.

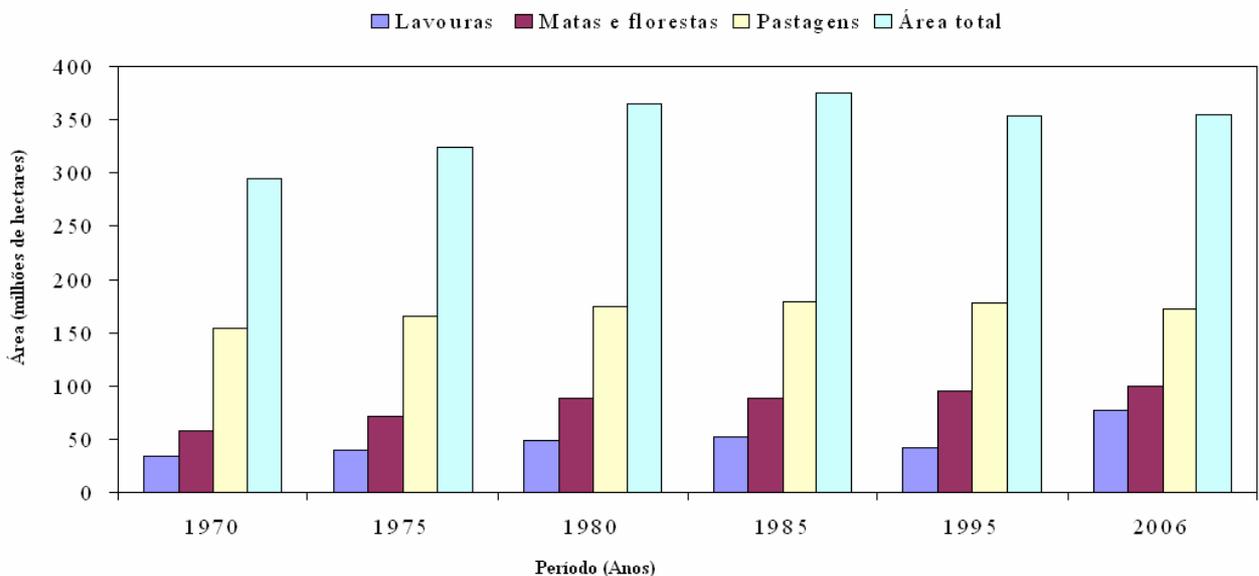


Figura 2.1 – Utilização das terras no Brasil 1970 – 2006.

Fonte: Adaptado de IBGE (2006).

Entre 1995 e 2006, os estabelecimentos agropecuários registraram redução de suas áreas de florestas (-11%) e de pastagens naturais (-26,6%), e aumento nas áreas de pastagens plantadas de 1,7 milhão de hectares (1,8%), sobretudo na região Norte (39,7%), enquanto aquelas dedicadas à agricultura cresceram 19,4%, sendo que o maior aumento ocorreu no Centro-Oeste (63,9%).

Segundo números do IBGE (2009) em relação à nossa agricultura irrigada e quanto ao uso de irrigação, 6,3% dos estabelecimentos declararam utilizar esta técnica, acusando um aumento de 39% no número de estabelecimentos agropecuários praticantes, em relação ao Censo anterior (1995), apontando um aumento de 1,3 milhão de hectares (42%).

A área irrigada compreendia em 2006 era de 4,45 milhões de hectares (7,4% da área total em lavouras temporárias e permanentes), com a seguinte distribuição: 24% da área irrigada no método de inundação; 5,7% por sulcos; 18% sob pivô central; 35% em outros métodos de aspersão; 7,3% com métodos localizados e 8,3% com outros métodos ou molhação.

Os especialistas estimam que, no Brasil, existam cerca de 110 milhões de hectares adicionais de solos aptos para expansão e desenvolvimento anual de agricultura em bases sustentáveis, dos quais aproximadamente 72% estão localizados na área do Cerrado.

No que diz respeito aos solos aptos para o desenvolvimento da agricultura irrigada, de forma sustentável, o potencial brasileiro é estimado em 29,5 milhões de hectares, dos quais cerca de dois terços ocorrem nas regiões Norte e Centro-Oeste, Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Potencial de solos para desenvolvimento sustentável da irrigação em mil hectares – Brasil

Região	Várzeas	Terras Altas	Total	Percentual
Norte	9.298	5.300	14.598	49,4
Nordeste	104	1.200	1.304	4,4
Sudeste	1.029	3.200	4.229	14,3
Sul	2.207	2.300	4.507	15,2
Centro-Oeste	2.326	2.600	4.926	16,7
Totais	14.964	14.600	29.564	100

Fonte: Estudos desenvolvidos pelo MMA/SRH/DDH (1999) apud Christofidis (2006).

Quando são relacionadas áreas de cada uma das regiões do país e a área irrigada por cada método de irrigação, encontram-se características regionais. Um bom exemplo é a região sul, com sua maior área irrigada por superfície, mais precisamente por inundação, claro que isto está fortemente relacionado com a orizicultura, a topografia e a disponibilidade de água encontrada. Apesar disto, os outros métodos de irrigação também ampliam sua área instalada. Alguns dados fornecidos por Christofidis (2006) mostram como estão distribuídas as áreas irrigadas pelos métodos em cada região do país, Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Áreas irrigadas em cada região do Brasil por seus métodos.

Brasil / Regiões e Estados	Ano 2003/04 – Método de Irrigação (hectares)				
	Superfície	Aspersão	Pivô	Localizada	Total
Brasil	1.729.834	662.328	710.553	337.755	3.440.470
Norte	84.005	9.125	2.000	4.550	99.680
Nordeste	207.358	238.223	110.503	176.755	732.840
Sudeste	219.330	285.910	366.630	116.210	988.080
Centro-oeste	63.700	35.060	193.880	25.570	318.210
Sul	1.155.440	94.010	37.540	14.670	1.301.660
Paraná	21.240	42.210	2.260	6.530	72.240
Santa Catarina	118.200	21.800	280	3.140	143.420
Rio Grande do Sul	1.016.000	30.000	35.000	5000	1.086.000

Fonte: Adaptado de Christofidis (2006).

Alguns métodos, ao longo do tempo, terão suas áreas estagnadas, enquanto outros irão aumentar sua participação; assim como também algumas regiões serão mais propícias a ampliar a área irrigada que outras. Essas alterações serão função principalmente da disponibilidade de energia e da disponibilidade de recursos hídricos.

O Rio Grande do Sul aparece como o estado com maior área irrigada no Brasil, sobretudo em virtude de sua grande área de irrigação por superfície, mas também aparece com uma área apreciável de aspersão por pivô central.

De acordo com Mendes (2000, apud BARRETO et al., 2004), alguns fatos listados a seguir contribuíram para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil:

- em 1950 houve incentivo à importação de sistemas de irrigação por aspersão mediante a isenção do imposto e, com taxas cambiais especialmente favoráveis, unindo a esse fato, a necessidade de aumentar a produção de café;

- a partir de 1955, algumas empresas iniciaram a fabricação de componentes para irrigação, inclusive aspersores;

- surgimento de novas indústrias, produzindo motores diesel, elétricos, bombas de grande vazão, válvulas e acessórios, como parte do processo de industrialização, principalmente na região Sudeste;

- por volta de 1965, surgem mais indústrias de equipamentos para irrigação, em razão do desenvolvimento da horticultura sob regime de irrigação junto aos centros urbanos;

- na década de 70, com o aumento dos preços do petróleo, ocorreu uma efetiva expansão da utilização de energia elétrica para fins de irrigação;

- em 1975 iniciou-se a produção dos primeiros equipamentos de irrigação mecanizados, do tipo autopropelido, para irrigar lavouras de batata, feijão, tomate, pomares e cana-de-açúcar. No final desta década foram instalados os primeiros sistemas de irrigação por gotejamento com a utilização de componentes importados;

- em 1978 foi iniciada, no Brasil, a fabricação de equipamentos automatizados de irrigação por aspersão;

- a partir de 1982, com o lançamento de programas federais de estímulo à agricultura irrigada (PROFIR/PROVÁRZEA), houve significativa expansão de áreas, principalmente nos Cerrados e no Nordeste;

- em 1986, com a criação do Ministério Extraordinário para assuntos de irrigação e dos programas de desenvolvimento das áreas irrigadas, PROINE e PRONI, surgiram diversas empresas fabricantes de materiais componentes de sistemas de irrigação;

- o início da década de 1990 marcou a abertura definitiva do mercado brasileiro às importações de componentes de irrigação com impacto no setor produtivo nacional. Várias empresas foram desativadas, houve fusões e modificações que mudaram o perfil das empresas locais. Empresas israelenses, americanas e européias, principalmente no segmento de irrigação localizada, passaram a dominar o mercado brasileiro por meio de representações próprias ou de rede de distribuição no país.

O potencial de áreas irrigáveis estimado para o Brasil pode conceber oscilações quantitativas, dependendo do enfoque e das variáveis que se usa para o trabalho, se dispomos um olhar baseado mais no conceito de “desenvolvimento sustentável”, a dimensão qualitativa, a área potencial a ser desenvolvida com irrigação pode alterar, afirmação esta de Cristofidis (2006).

2.2.2 Situação mundial

Cerca de 1,54 bilhão de hectares de solos estão em produção agrícola no Planeta, dos quais cerca de 277 milhões sob o domínio de infra-estrutura hídrica de irrigação. No princípio do século XX, a área total irrigada mundial estava em torno de 40 milhões de hectares, em 1950, esse valor se elevou para 160 milhões de hectares e, segundo a FAO (2000), a área irrigada mundial em 1998 era de 271 milhões de hectares.

A área de 18,0% sob cultivo irrigado produz cerca de 44% da produção total agrícola, enquanto a agricultura de sequeiro responde pelo restante. Há uma estimativa de que o máximo possível de crescimento de forma sustentável da superfície irrigada seja de mais 195 milhões de hectares, segundo Cristofidis (2006). Diversos autores trazem dados parecidos para a situação da irrigação no mundo, e todos aproximam o percentual de produção que representam as áreas irrigadas.

A fim de que seja possível obter uma idéia, no contexto internacional, acerca da importância das áreas irrigadas, efetuou-se uma análise comparativa utilizando países do Continente Americano, da União Européia e, pela importância que podem representar quanto ao assunto, Japão e Israel. Foram relacionados os dados (referentes às médias dos anos 1997, 1998 e 1999) de terras irrigadas com os de áreas de terras aráveis mais as áreas de culturas permanentes, provenientes dos anuários estatísticos da FAO (2000). A Figura 2.2 apresenta os dados comparativos para o Continente Americano e a Figura 2.3, para a União Européia.

Valores dos índices encontrados abaixo ou acima de 100 (cem) indicam, respectivamente, usos menos intensivos ou mais intensivos da técnica de irrigação, comparativamente ao conjunto de países do mundo (tomado como referência, de base 100).

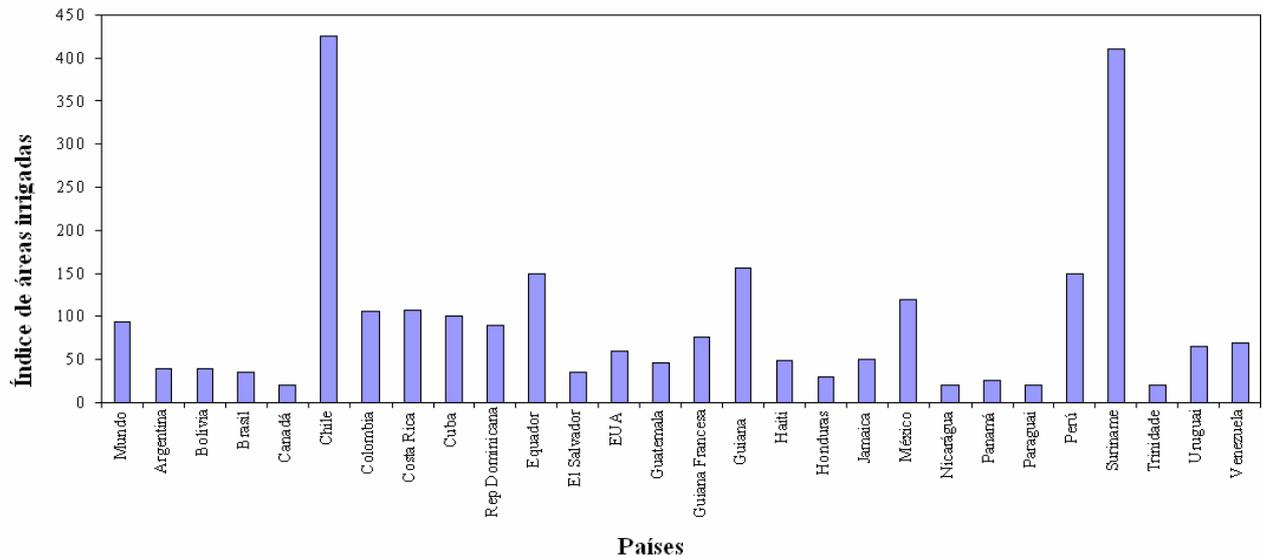


Figura 2.2 – Representação dos índices das áreas irrigadas para o caso das áreas de terras aráveis mais as áreas com culturas permanentes, nos países do Continente Americano.

Fonte: adaptado de FAO (2000).

As áreas irrigadas representam 18% do total de terras aráveis e ocupadas com culturas permanentes para o conjunto de países do mundo. Os países do continente americano com mais elevadas participações de áreas irrigadas são o Chile (78,4%) e Suriname (76,1%). Na outra extremidade, países em que a irrigação ocorre em pequena escala, o Canadá (1,6%), Trinidad e Tobago (2,5%) e Paraguai (2,9%), estando o Brasil entre esses, onde a técnica de irrigação é bem pouco empregada (4,4%).

Segundo a FAO (2000), as áreas irrigadas nos países em desenvolvimento, devem aumentar dos atuais 202 para 242 milhões de hectares. Assim, a escolha de tecnologia mais adequada e, sobretudo, a promoção de métodos de irrigação que evitem o desperdício é fundamental para atender à demanda por alimentos, com o mínimo de impactos ambientais.

Evidentemente, os índices de áreas irrigadas confirmam os aspectos apresentados, considerando-se um conjunto de 27 países americanos, o Brasil (com índice de 24) se posiciona, em ordem decrescente, como o vigésimo segundo lugar, superando apenas Honduras, Nicarágua, Paraguai, Trinidad e Tobago e Canadá.

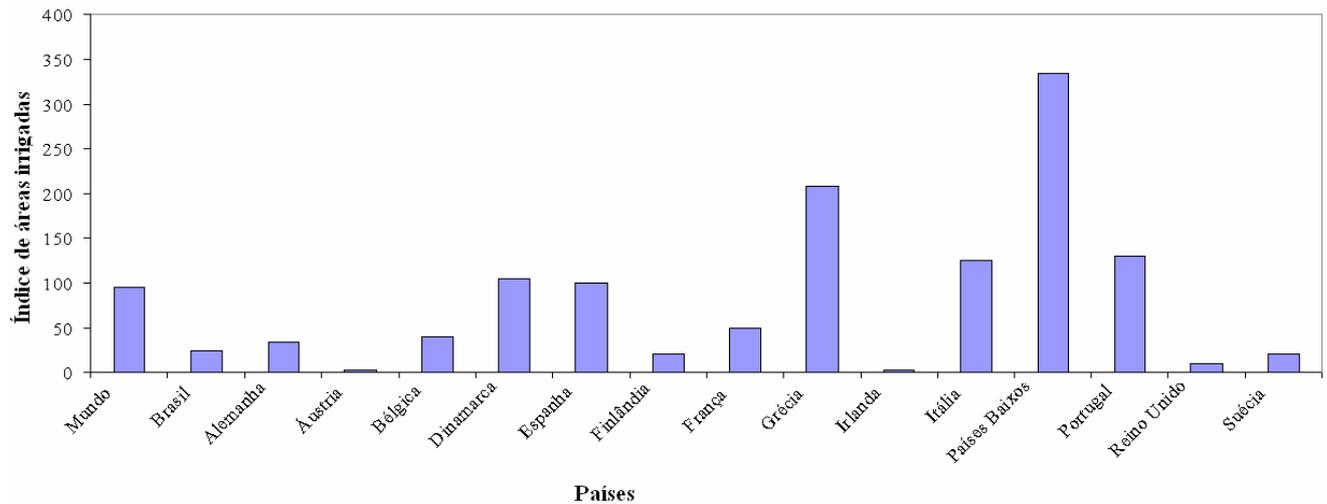


Figura 2.3 – Representação dos índices das áreas irrigadas para o caso das áreas de terras aráveis mais as áreas de culturas permanentes, nos países da União Européia, no Mundo e no Brasil.
Fonte: adaptado de FAO (2000).

No caso da União Européia, os países que evidenciam mais elevados índices de irrigação são os Países Baixos (334) e a Grécia (208). O Brasil, com índice de irrigação de 24, encontra-se em nível abaixo dos Países Baixos, Grécia, Portugal, Itália, Dinamarca, Espanha, França e Bélgica.

Observe-se ainda que Israel e Japão constituem países que utilizam a técnica de irrigação de forma expressiva. O índice de área irrigada em Israel está 154 % acima do indicador do conjunto de países do mundo, sendo ainda 3,04 vezes superior no Japão.

Os dados apresentados demonstram que, apesar das ações governamentais adotadas e das iniciativas das empresas privadas em algumas regiões específicas do país, a área irrigada brasileira é bem inferior ao potencial irrigável e muito baixa quando comparada com países dotados até de níveis bem menos elevados de desenvolvimento agrícola.

Algumas características das situações encontradas nos países que empregam a irrigação:

Índia: Esse país possui regiões extensas irrigadas no delta do Rio Indus, na Costa do Golfo de Oman, nos rios que desembocam no Golfo de Bengala e no baixo Vale do Ganges. Nas terras não irrigadas do alto do Ganges, o agricultor cultiva o trigo dependendo da regularidade das chuvas. As secas determinam períodos de fome que oprimem e devastam as populações (DAKER, 1988).

A Índia que tem em torno de 56 milhões de hectares irrigados, é o país que adotou a técnica de irrigação como suporte para amenizar a miséria com a produção de alimentos para a numerosa população.

Estados Unidos: irrigam cerca de 27 milhões de hectares. Este país aplica as tecnologias mais modernas disponíveis no mundo agrícola. A irrigação é praticada sempre buscando o limite superior de produtividade das culturas e de taxas de retorno compatíveis com os investimentos de capital nos padrões do agronegócio moderno.

Comunidade dos Estados Independentes – CEI: com aproximadamente 21 milhões de hectares sob irrigação, a antiga União Soviética apresenta-se entre as nações com maior área irrigada.

México: em referência ao clima, o México possui 63% de suas áreas em zonas áridas, 32% são semi-áridas, 5% são semi-úmidas e apenas 1% é de zonas úmidas. De 27 milhões de hectares utilizados na agricultura, cerca de 5,7 milhões de hectares são irrigados, o que permite um índice de uso da terra de aproximadamente 1,15 colheita.área.ano-1 (PALÁCIOS, 1987, apud BARRETO et al., 2004).

O México, que até 1990 tinha cinco milhões de hectares irrigados, hoje já conta com 6 milhões de hectares. Esse país não dispõe de mais áreas adequadas para a implantação de novos pólos hidroagrícolas em seu território, pois já utiliza todas as terras com potencial de uso com culturas irrigadas.

China: nesse país com solo cultivado durante milênios seguidos, e densamente populoso apesar da expansão territorial, mas com muitas áreas desérticas, só por meio da técnica da irrigação é possível alimentar seu povo.

Com a arte de cultivar e manejar solo e água, os chineses aproveitam as escarpas das colinas para construir tabuleiros artificiais e engenhosamente dispostos, por processos manuais ou mecânicos, levando a água para o platô de nível superior e a distribui em patamares sucessivos a fim de beneficiar as culturas, até atingir o dreno construído na parte mais baixa do vale (DAKER, 1988).

Na história da agricultura chinesa, sabe-se que parte da área atualmente irrigada já utilizava os recursos hídricos para fins de irrigação há cerca de 4.000 anos.

2.3 Caracterização dos dados em estudo

A pesquisa trata de dois conjuntos de dados de equipamentos de irrigação por pivô central. O primeiro, na região noroeste do Rio Grande do Sul, nas proximidades da cidade de Cruz Alta, a uma latitude de 28° 38 '19" ao sul e a uma longitude de 53° 36' 23" ao oeste, com

altitude média de 452 metros, com aproximadamente 36 equipamentos de irrigação. O segundo conjunto, também na região noroeste do Rio Grande do Sul, nas proximidades da cidade de Santo Augusto, a uma latitude de 27°51'03" ao sul e uma longitude de 53°46'38" ao oeste, com altitude média de 528 metros de altitude, com 34 equipamentos de irrigação por pivô central.

O trabalho foi realizado com sistemas de irrigação já instalados e alguns ainda em fase de projeto. Todos os sistemas já instalados foram identificados e georreferenciados regionalmente por suas coordenadas.

2.3.1 Procedimento do levantamento de campo

Foi utilizada a metodologia, atendendo os requisitos descritos na norma ABNT NBR 14244, sobre a Determinação da Uniformidade de Distribuição de Água para Pivôs Centrais, de maneira sucinta descrita abaixo.

Para realizar as medições de pressão no sistema, foi deslocada a extremidade do equipamento para o local mais alto da área, já que este é o ponto crítico de funcionamento hidráulico e o utilizado quando é realizado o dimensionamento do equipamento pivô central. Foi realizado o ensaio de precipitação neste mesmo local, para que possa ser evidenciada na lâmina de água aplicada qualquer deficiência que possa estar ocorrendo no equipamento.

A velocidade de deslocamento da última torre foi medida em quatro velocidades, o equipamento foi regulado com o relé percentual em 100% (maior velocidade de deslocamento); foi medido o deslocamento em 75% de velocidade, onde 25% do tempo o equipamento fica imóvel e 75% em funcionamento; foi medido o deslocamento em 50% de velocidade, onde 50% do tempo o equipamento fica imóvel e 50% em funcionamento; e finalmente foi medido o deslocamento do equipamento em 25%, onde 75% do tempo o equipamento fica imóvel e 25% em funcionamento.

No bombeamento, foi medida a intensidade de corrente elétrica do motor, nas três fases, a tensão da rede de alimentação, tensões de linha e fase, as pressões na bomba, com o registro de saída da bomba totalmente fechado, condição esta chamada shutt-off, e a pressão em regime de funcionamento da bomba.

Também foram medidas as diferenças de nível entre o reservatório que abastece o equipamento e o centro do eixo do motor, configurando a altura de sucção, do centro do eixo

do motor, no bombeamento, ao centro do equipamento e do centro ao ponto mais elevado da área irrigada.

Foram utilizados coletores de plástico, apoiados sobre hastes de 750 mm de altura. Cada coletor tem 80 mm de diâmetro e 102 mm de altura, instalados com a seção de captação a aproximadamente 500 mm da superfície do solo. Serão distribuídas duas linhas radiais de coletores uniformes, com espaçamento regular e constante, do centro do pivô ao extremo da área irrigada.

Os dados coletados durante o ensaio foram:

Volume de água: após a passagem completa do equipamento sobre as linhas de coletores, inicia-se a leitura dos volumes com auxílio de uma proveta com capacidade de 250ml.

Velocidade de giro do pivô central: os equipamentos possuem um mecanismo que possibilita diferentes regulagens de velocidade, propiciando a aplicação da irrigação com diferentes lâminas de água.

Medida de pressão: serão medidas as seguintes pressões no sistema: na motobomba: medida a pressão com o sistema em funcionamento e o registro de pressão fechado (shutt-off) e, posteriormente, com o registro aberto; no ponto do pivô: medida a pressão no tubo de subida no centro do pivô; no último emissor : medida a pressão na saída do emissor.

Consumo de energia no sistema: de acordo com a corrente elétrica e fator de potência, relacionado com a tensão da rede.

Número de horas do equipamento: informação retirada do horímetro do painel de comando (caixa mestre) em cada pivô central.

2.4 Características ambientais que condicionam os projetos de irrigação

Alguns condicionantes dos projetos são encontrados no ambiente em que os equipamentos serão instalados. Uma função difícil para o projetista é ponderar os aspectos que devem ser levados em consideração quando da elaboração do projeto.

Dentre todas as características, podemos citar: relevo da região que será instalado o equipamento; tipo de cultura a ser implantada; caracterização de comercialização da cultura; disponibilidade elétrica e hídrica; entre outros.

Em uma caracterização de sistemas de cultivo em áreas irrigadas por aspersão no Rio Grande do Sul, Melo (2006) encontrou, conforme Figura 2.4, um equilíbrio entre as áreas irrigadas até 130 ha, sendo pouco freqüente acima disto, em 76 equipamentos estudados.

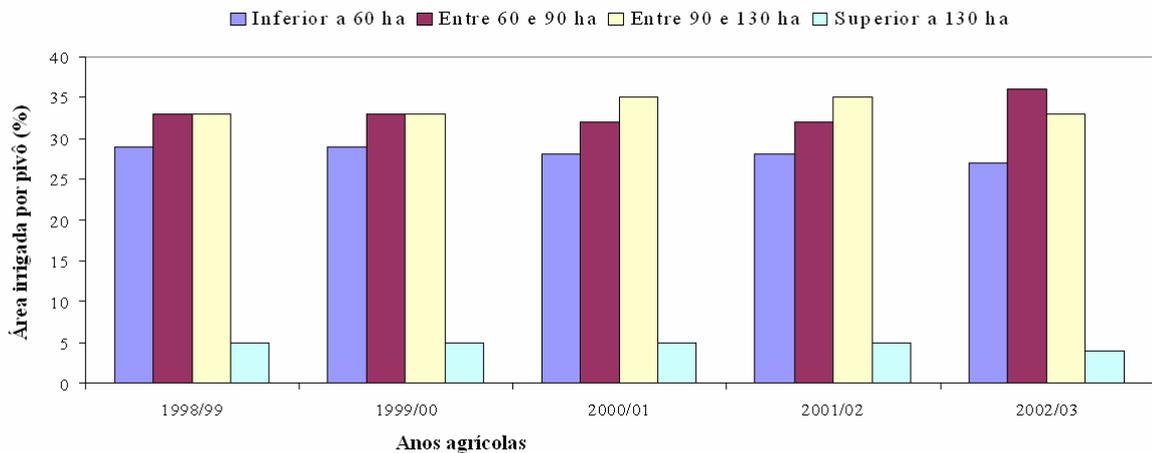


Figura 2.4 – Frequência observada referente às áreas dos pivôs utilizados nas áreas estudadas durante os anos agrícolas 1998/99 a 2002/03, no Estado do RS. Santa Maria 2006.

Fonte: Adaptado de Melo (2006).

O conhecimento das principais características dos projetos instalados em uma determinada região é uma ferramenta importante ao projetista para planejar novos empreendimentos ou maximizar alguns já instalados. Para tanto seguem caracterizações de duas regiões em estudo.

2.4.1 Estudo de caso: região de Cruz Alta – RS e região de Santo Augusto - RS

As duas regiões de estudo estão localizadas no noroeste do Rio Grande do Sul, em uma região denominada Planalto Médio, com altitude média de 400 a 452 metros acima do nível do mar. São regiões de grande dependência do setor primário, e com o agronegócio desenvolvido por monoculturas, de soja e milho. Em razão grande perda de solo ocasionada pelas chuvas de grande intensidade e pequena duração, características em algumas épocas do ano, estão utilizando o plantio direto, ou plantio com baixa mobilização do solo.

Segundo Melo (2006), embora o regime pluviométrico anual no Rio Grande do Sul

seja considerado bem distribuído, tem-se verificado, em alguns anos, a ocorrência de períodos com deficiência hídrica. Ainda, estudos recentes evidenciam aumento na área irrigada por aspersão durante os últimos anos, tornando o setor agrícola o maior consumidor de água e energia elétrica no Brasil e com isso, tem contribuído de forma expressiva nas discussões acerca da melhor eficiência no uso da água, ou seja, como incrementar a produção por unidade de água consumida.

De acordo com Michelin (2005), o Estado do Rio Grande do Sul representa o quinto Estado em áreas irrigadas, com aproximadamente 35 a 40 mil hectares irrigados por pivô central.

Nos dados de área obtidos das duas regiões em estudo, em 70 equipamentos, visualizados na Figura 2.5, notamos uma concentração maior na faixa entre 50 e 100 hectares, diferindo dos dados apresentados por Melo (2006).

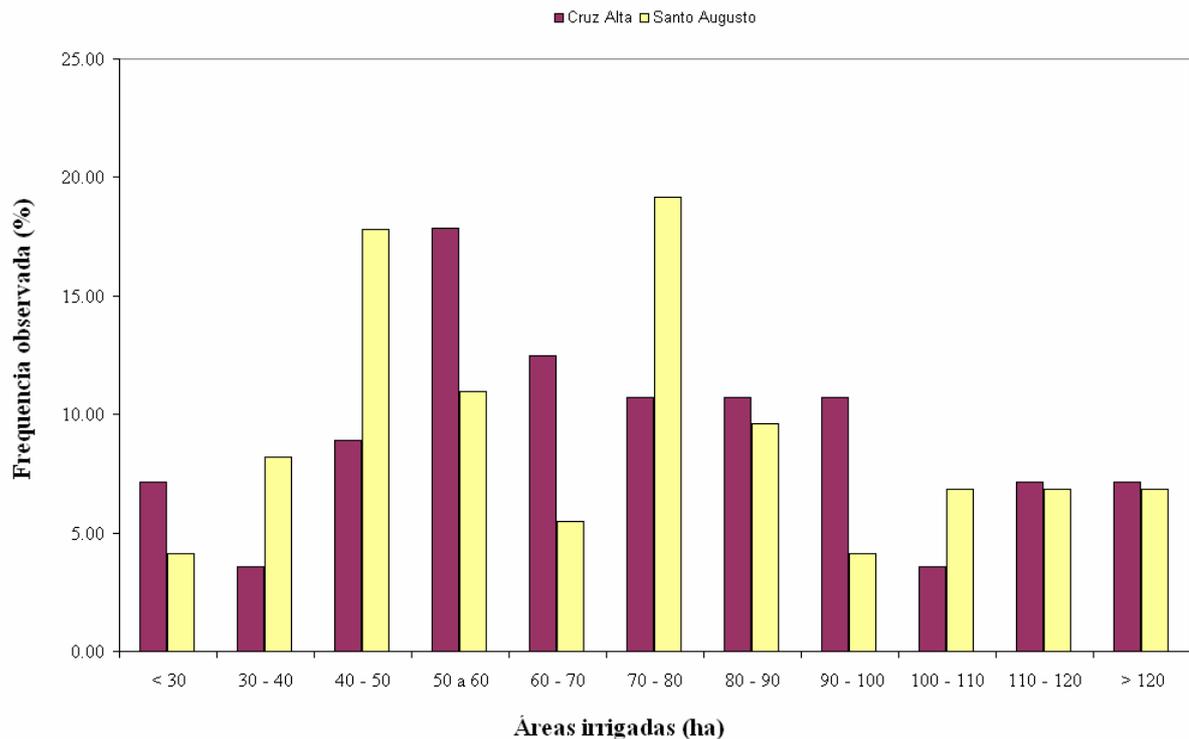


Figura 2.5 – Frequência observada referente às áreas dos pivôs em estudo nas Regiões de Cruz Alta, RS e Santo Augusto, RS.

Quando agrupados em categorias de tamanho de área, obtemos as seguintes faixas de equipamentos: equipamento pequeno, menor que 40 hectares; médio, entre 40 e 100 hectares; e grandes, acima de 100 hectares. Na Figura 2.6, são apresentados estes dados, notamos uma

concentração maior na faixa entre 40 e 100 hectares, com o percentual muito parecido dos dados dos pivôs de 50 hectares a 130 hectares apresentados por Melo (2006), já nos dados dos pivôs pequenos e grandes existe uma diferença muito expressiva.

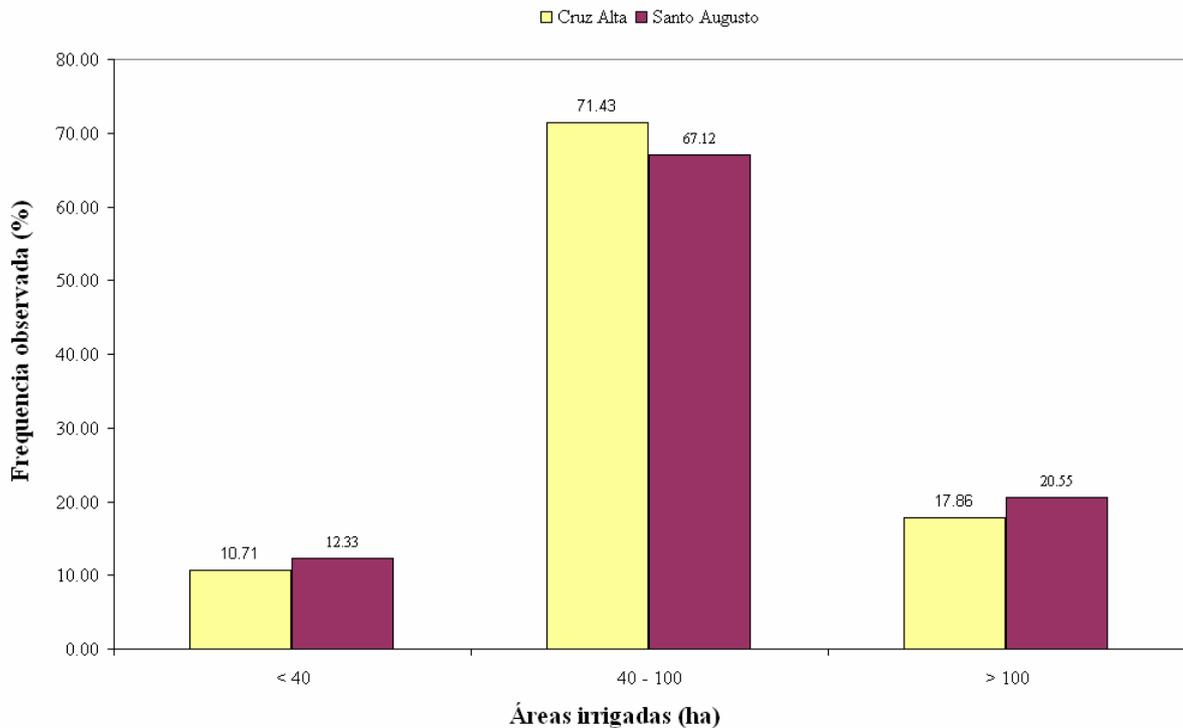


Figura 2.6 – Frequência observada em função das classes de áreas dos pivôs em estudo nas regiões de Cruz Alta, RS e Santo Augusto, RS.

No estudo, as duas regiões apresentaram uma maior concentração da área dos equipamentos de 40 a 100 ha, com uma frequência observada de 71,43% e 67,12%, respectivamente para a Região de Cruz Alta e para a Região de Santo Augusto.

Os equipamentos são instalados, nestas regiões de acordo com a topografia encontrada e de acordo com o tamanho das áreas das propriedades. A topografia apresenta-se em relevo de levemente ondulado, a ondulado. Quando são instalados equipamentos de porte médio ou grande, são utilizadas pelo menos duas ondulações do terreno, gerando problemas normalmente na junção entre elas, ficando condicionados na maioria em equipamentos de médio porte.

A capacidade de instalação de equipamentos também está condicionada a disponibilidade de recurso hídrico. Grandes equipamentos necessitam volumes maiores de água e grandes reservatórios para segurança da área irrigada, que normalmente possuem maior dificuldade de construção e necessitam maiores recursos econômicos.

Os dados de desnível entre a reserva hídrica e a área a ser irrigada também é condicionada a região de instalação dos equipamentos. Segue a Figura 2.7 que relaciona a área irrigada dos equipamentos e os desníveis geométricos totais dos mesmos.

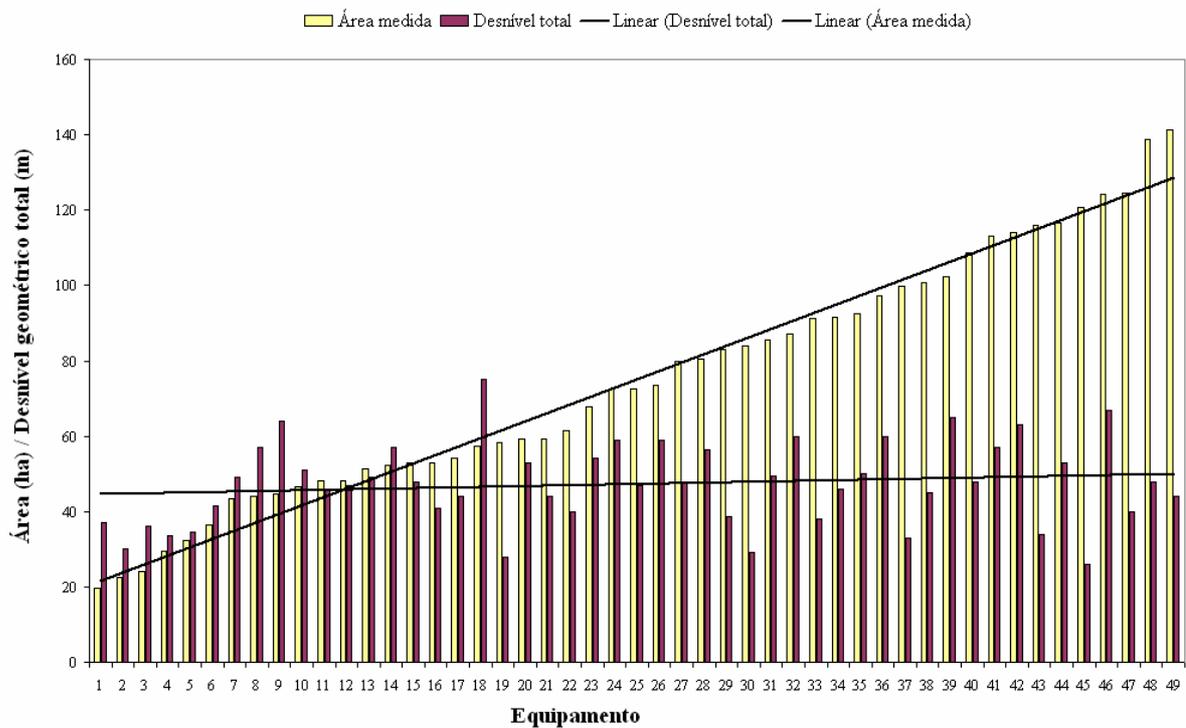


Figura 2.7 – Valores de área medida e desnível geométrico total dos equipamentos por pivô central, ordenados de forma crescente pela área medida, nas regiões de Cruz Alta, RS e Santo Augusto, RS.

Em análise aos dados, verifica-se que o desnível não se modifica, condicionado ao aumento de área dos equipamentos. As linhas de tendência traçadas demonstram claramente isto. A média dos desníveis geométricos, nas duas regiões juntas apresenta-se em 47,4 metros. Na Região de Cruz Alta, a média do desnível geométrico apresenta-se em 45,08 metros, enquanto na Região de Santo Augusto apresenta-se em 48,53 metros. Os desvios em relação a média para as duas regiões foram de 9,55 metros e 11,75 metros, para as Regiões de Cruz Alta e Santo Augusto respectivamente.

A análise da potência calculada e a potência consumida pelos bombeamentos, dos equipamentos de irrigação, também se fazem necessárias para a correta verificação do projeto. A potência instalada também caracteriza a região, sendo uma informação importante para as

concessionárias de energia projetarem seus investimentos. A Figura 2.8 apresenta a média dos valores encontrados em cada categoria comercial de motor.

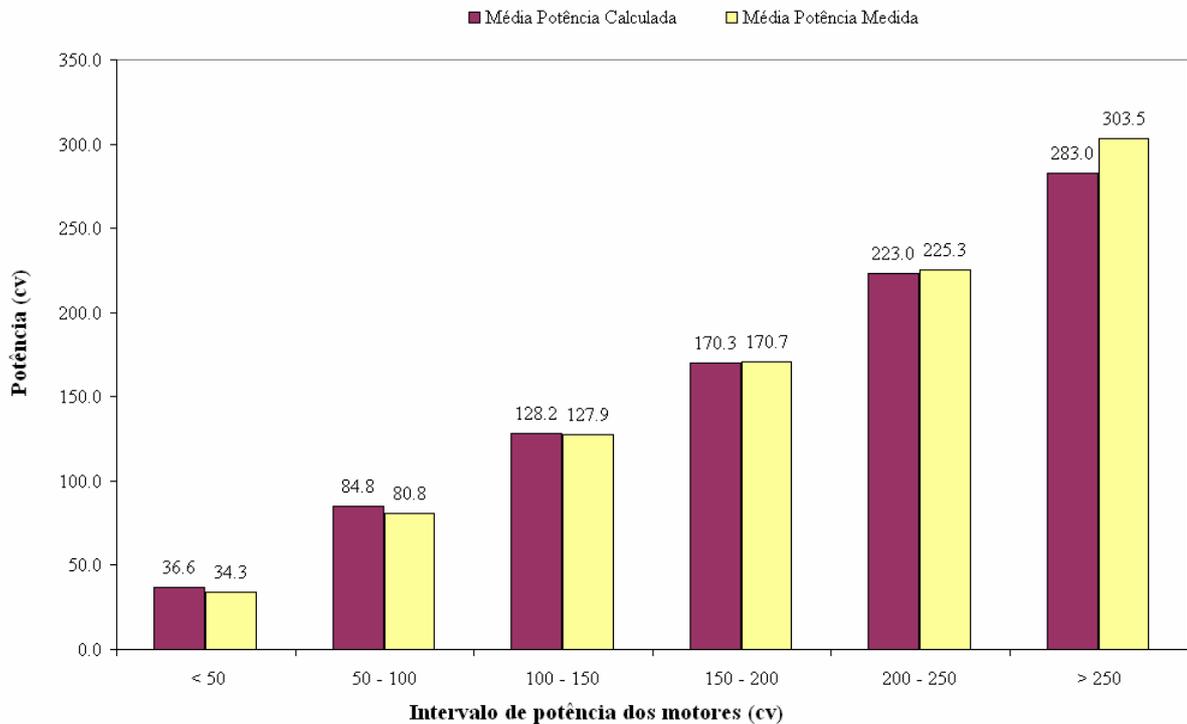


Figura 2.8 – Média dos valores das potências calculadas e medidas nos pivôs em estudo nas regiões de Cruz Alta, RS e Santo Augusto, RS.

Segundo os dados de potência dos equipamentos estudados notamos que, a média das potências calculadas nos motores até 100 cv é maior que a média das potências medidas. Para os motores de 100 a 200 cv as potências calculadas e medidas são idênticas, ou muito próximas. Motores acima de 200 cv possuem a potência calculada menor que a potência medida.

Segundo Bernardo et al. (2005), até o ano de 1996 os motores eram construídos com fator de serviço igual a 1, e se acrescentavam na potência instalada percentuais de folga nos motores. O percentual variava de 25% para motores até 5 cv a 10% para motores acima de 20 cv, isto faz com que encontremos motores até 100 cv com uma margem de segurança maior que os motores maiores.

Para os motores acima de 200 cv é normal exigir o seu máximo de potência, quando não for ainda utilizado seu fator de serviço, que para muitos motores fica entre 10 e 15% da potência nominal.

CAPÍTULO III

Neste Capítulo é caracterizado e discutido o sistema de irrigação do tipo pivô central, seus recursos, mecanismos e funcionamento.

3. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO DO TIPO PIVÔ CENTRAL

3.1 Caracterização do equipamento de irrigação tipo pivô central

Analisando os equipamentos de irrigação disponíveis, desde aqueles usados em micro-irrigações, irrigações por superfície ou aspersão, cada qual possui características próprias de uso e projeto; assim também o pivô central, que é planejado normalmente para áreas irrigadas maiores e vem sendo amplamente utilizado pela agricultura extensiva, sendo assim alvo de críticas e discussões em relação ao uso eficiente da água e energia. Nesta condição, o sistema de irrigação por aspersão do tipo pivô central está ligado a um projeto técnico, para que o mesmo obtenha êxito na aplicação de água, nas situações em que este não é considerado, normalmente ocorrem problemas de sustentabilidade da área irrigada, em função da energia gasta ou do manejo do mesmo. O projeto do sistema irrigado pode ser planejado de diversas maneiras, para uma mesma situação encontrada.

3.1.1 O equipamento pivô central

O pivô central pertence ao grupo de sistemas mecanizados de aspersão e que foi idealizado pelo norte americano Frank Zybach na década de 40. Foi introduzido no Brasil no final dos anos 70, impulsionado por programas governamentais como o PROINE, PROFIR e o PRONI.

Equipamento de fácil operação, alta eficiência no uso da água (70 a 90 % segundo Christofidis, 2002) e, graças à grande versatilidade desse equipamento, e baixo custo operacional, os pivôs rapidamente conquistaram a preferência do agricultor irrigante. Segundo o autor, o pivô central é atualmente o equipamento de irrigação mais comercializado e o que mais tem contribuído para o incremento da área irrigada no País.

No início eram máquinas simples acionadas por turbinas hidráulicas. A uniformidade de aplicação de água sobre a superfície do solo dependia do relevo e da extensão do pivô. Atualmente, o desenvolvimento e a incorporação de diversos acessórios e dispositivos permitem a utilização desses equipamentos nas mais diversas situações.

Faria e Vieira (1986) reportam que o pivô central é um sistema de irrigação por aspersão que opera em círculos, constituído de uma linha lateral com emissores, ancorada em uma das extremidades e suportada por torres dotadas de rodas equipadas com unidades propulsoras. Segundo os autores, a velocidade de rotação das torres em torno do ponto central é regulada por meio de um relé percentual situado no painel do equipamento, que comanda a velocidade de deslocamento da última torre.

O deslocamento de toda linha lateral do pivô central é comandado pela caixa de controle (caixa mestre) para que a torre mais externa se movimente. A movimentação desta faz com que o alinhamento inicial das torres se modifique, forçando em cada torre um novo posicionamento para que retorne o equipamento a um alinhamento da sua parte aérea.

Pereira (2001) demonstra que, supondo-se inicialmente que as torres encontram-se alinhadas e apenas a última se movimente, o acionamento do motoredutor da torre subsequente processa-se quando o vão em movimento deflete-se em relação aos demais. Continuando o processo entre todos os vãos adjacentes, promove-se a movimentação de toda a linha de irrigação pelo funcionamento intermitente dos motoredutores nas torres.

Pereira (2001), também comenta que embora a velocidade angular de deslocamento do pivô central seja constante, a velocidade média de deslocamento de cada torre deve ser progressivamente maior a partir do ponto do pivô, de maneira a induzir o movimento circular do equipamento na área. Como a área irrigada é progressivamente maior, aumenta-se também a vazão dos emissores ao longo da linha lateral do equipamento, objetivando que toda a área irrigada receba a mesma lâmina de água de maneira uniforme. Dessa forma, têm-se elevadas intensidades de aplicação de água na extremidade final do pivô e menores intensidades de aplicação nas proximidades do centro do equipamento.

O pivô central é um dos sistemas de irrigação por aspersão com maior automação existente no mercado. Essa automação pode variar desde simples acessórios a componentes

que permitem colocá-lo em funcionamento a distância, por meio de ondas de rádio ou telefone celular. Existem também pivôs que são totalmente controlados por estações computadorizadas capazes de coletar dados (umidade do solo, evapotranspiração, pluviometria, entre outros), analisá-los e avaliar o momento ideal e a exata quantidade de água que deverá ser aplicada para suprir a demanda da cultura (VILELA, 1999).

Dentre os métodos de irrigação, o de aspersão por pivô central tem-se expandido de forma mais significativa, pelas seguintes razões: economia de mão-de-obra; economia de tubulações; manutenção do mesmo alinhamento e a mesma velocidade de movimentação em todas as irrigações; após completar a irrigação, o sistema estará no ponto inicial para começar uma outra e; boa uniformidade de aplicação, quando bem dimensionado.(BERNARDO et al., 2005).

A modernização do sistema pivô central tem ocorrido, principalmente no sistema de propulsão, de alinhamento, e nos dispositivos de distribuição de água. Novas tecnologias foram incorporadas, como sistema de propulsão elétrica, vãos de grande comprimento, tubulação aérea de maior diâmetro e comprimento, articulações flexíveis entre torres.

A necessidade de reduzir o consumo de energia e ao mesmo tempo, manter a uniformidade e a eficiência da aplicação de água passou a ser uma grande preocupação. Segundo Gilley e Watts (1977) e Gilley et al. (1990), a redução de pressão de operação pela utilização de emissores de baixa pressão é a maneira mais fácil de reduzir o consumo de energia dos sistemas de irrigação tipo pivô central.

Os emissores de baixa pressão foram desenvolvidos para substituir os tradicionais aspersores de impacto, aplicando a mesma lâmina de água, com uniformidade comparável e menor utilização de energia. Os sistemas pivô central passaram então a serem projetados ou redimensionados para trabalhar em pressão reduzida. Entretanto, estes sistemas tendem a apresentar problemas de manejo de água e solo, como aumento da taxa de aplicação (predisposição para escoamento superficial), maiores perdas pelo vento e evaporação, além de redução na uniformidade devido à menor superposição alcançada pelos emissores.

Rolland (1982) afirma que o aumento do comprimento da lateral aumenta a viabilidade econômica do equipamento, reduzindo o custo por área irrigada. Entretanto, pivôs de grande porte normalmente apresentam como características a ocorrência de altas taxas de aplicação de água, grande perda de carga na tubulação da lateral e adutora, e elevado número de horas por revolução, dificultando o manejo do equipamento.

O movimento descontínuo da linha lateral afeta a uniformidade de aplicação de água dos sistemas móveis de irrigação (HANSON E WALLENDER, 1986, apud FRIZZONE e

NETO, 2003), especialmente quando o raio de alcance dos emissores é próximo do espaço percorrido pelas torres do pivô em cada deslocamento. Este decréscimo na uniformidade será importante quando pivôs equipados com sprays de baixa pressão forem utilizados em quimigação, de acordo com Heermann et al. (1992).

Segundo Folegatti et al. (1998) o sistema de propulsão, em pivôs centrais, com relé percentual de ciclo reduzido e alta velocidade de deslocamento das torres minimiza os efeitos de redução da uniformidade, reduz o tempo de giro e a lâmina por volta, adequando o equipamento à praticas de quimigação.

3.1.2 Sistema de aspersão em pivôs

No dimensionamento de sistemas de irrigação, deve ser considerada a variabilidade existente entre os emissores, decorrentes do processo de fabricação. A fabricação deverá ser exata, uniforme e constantemente monitorada, pois pequenas variações poderão causar grandes diferenças de vazão (VIEIRA, 1996).

Keller e Karmeli (1974) comentam sobre a uniformidade dos sistemas de irrigação, e citam que esta uniformidade depende também da precisão com que os emissores são fabricados.

Com a preocupação do aumento dos custos da energia, foram introduzidos os emissores de baixa pressão fixos, de média pressão, os aspersores rotativos, e mais recentemente de ultrabaixa pressão, o sistema LEPA (Aplicação precisa com baixa energia).

O Sistema LEPA unifica um sistema de aspersão com a irrigação por sulcos, com uma alta taxa de aplicação de água em uma porção restrita de área, previamente preparada para tal. Os tubos de decida são ampliados até o nível do solo, onde por baixa pressão é aplicada a água, estes sistema podem ser muito eficientes (95 a 98%), segundo Evans (1999).

O fabricante dos aspersores possui um programa computacional que determina o mapa de distribuição dos bocais. Algumas condições como o tipo de aspersor, suas características técnicas, a pressão imposta no aspersor, dado pelo regulador de pressão instalado aliado a condição de pressão do equipamento, e a quantidade de emissores em cada posição do equipamento, são utilizadas para a escolha.

3.1.3 Canhão final em pivôs

O canhão final é uma tentativa de ampliação do raio irrigado em pivôs centrais, além da estrutura aérea. Keller e Bliesner (1990) assumem que a espessura do anel efetivamente irrigado pelo canhão final é cerca de 75% do raio de alcance do canhão final. E como parte da vazão do canhão final aplicada, além do raio efetivamente irrigado, é perdida, indicam que as perdas superficiais na área do canhão, mesmo quando a evaporação é desprezada, é da ordem de 7 a 8% da vazão do canhão.

Uma melhor uniformidade de distribuição da água aplicada pelo canhão final é obtida quando a sua seleção é feita com base no seu perfil radial estacionário (a relação entre intensidade de aplicação de água e distância ao aspersor, que é determinada em ensaios de distribuição de água). Exemplos de seleção do canhão final com base no perfil estacionário de distribuição de água são encontrados em Schenkel (1992).

Quando no dimensionamento, o projetista deve utilizar a vazão que seria necessária para irrigar a área do canhão com a mesma lâmina que seria aplicada no restante do equipamento. O problema é que a uniformidade do canhão final é muito baixa, e extremamente condicionada aos fatores climáticos da região. A sua utilização deve ser bem discutida e avaliada.

3.2 Sistemas de recalque

Os sistemas de recalque, que integram os conjuntos de irrigação, são formados por uma máquina de força motriz e uma de transformação de energia mecânica em hidráulica. As bombas hidráulicas executam a transformação de energia mecânica em hidráulica e comunicam ao fluído um acréscimo de energia (sob forma de pressão, cinética, ou ambas) possibilitando o seu deslocamento de um ponto a outro.

Segundo Carvalho (2003), a tubulação de sucção deve ser o mais curta possível e com uma ligeira declividade da bomba para o poço de sucção. Deve-se utilizar o mínimo possível de peças de especiais. O diâmetro deve ser tal que a velocidade em seu interior não alcance valores excessivos.

À entrada da bomba, na ligação com a tubulação, deve-se utilizar redução excêntrica para evitar o acúmulo de bolsas de ar e minimizar o problema de cavitação no sistema. Deve-se instalar uma válvula de pé com crivo na extremidade da tubulação de sucção para mantê-la escorvada e, também para impedir a entrada de corpos estranhos juntamente com a água de irrigação. A tubulação de sucção, no caso de sucção positiva (instalação abaixo do nível d'água), deve ficar imersa de forma a evitar a entrada de ar. Recomenda-se que a altura mínima de submersão seja 4 vezes o diâmetro da tubulação de sucção, no caso de tubulações de grandes diâmetros, e de 0,5 metros para tubos de pequenos diâmetros.

3.2.1 Bombas hidráulicas

Bombas são máquinas hidráulicas geratrizes ou operatrizes cuja finalidade é realizar o deslocamento de um líquido por escoamento. Elas transformam o trabalho mecânico que recebe para seu funcionamento em energia, que é comunicada ao líquido sob formas de energia de pressão e cinética, Carvalho (2003).

Segundo Azevedo e Alvarez (1977), as bombas podem ser divididas em quatro classes: centrífugas, rotativas, de êmbolo, e de poço profundo. Nas instalações para água e esgoto, geralmente são as bombas centrífugas as utilizadas. Estas podem ser classificadas por critérios segundo a Figura 3.1.

As bombas centrífugas possuem como componentes constituintes: o rotor, peça responsável pela energização do fluído, montados em um estágio (monoestágio) ou vários na mesma bomba (multiestágio), apresentam-se de várias formas construtivas e com diversos tipos de materiais, cada qual com sua aplicação afim.

Possuem o difusor, ou carcaça, que é a parte componente da bomba onde a energia de velocidade é transformada em energia de pressão, que faz com que o líquido se eleve e/ou vença distâncias, coleta o líquido expelido pelo rotor e o encaminha para o recalque. Além destes dois componentes, também apresentam órgãos complementares que são: eixo, anéis de desgaste, caixa de gaxetas, selo mecânico, rolamentos, acoplamentos (CARVALHO, 2003).

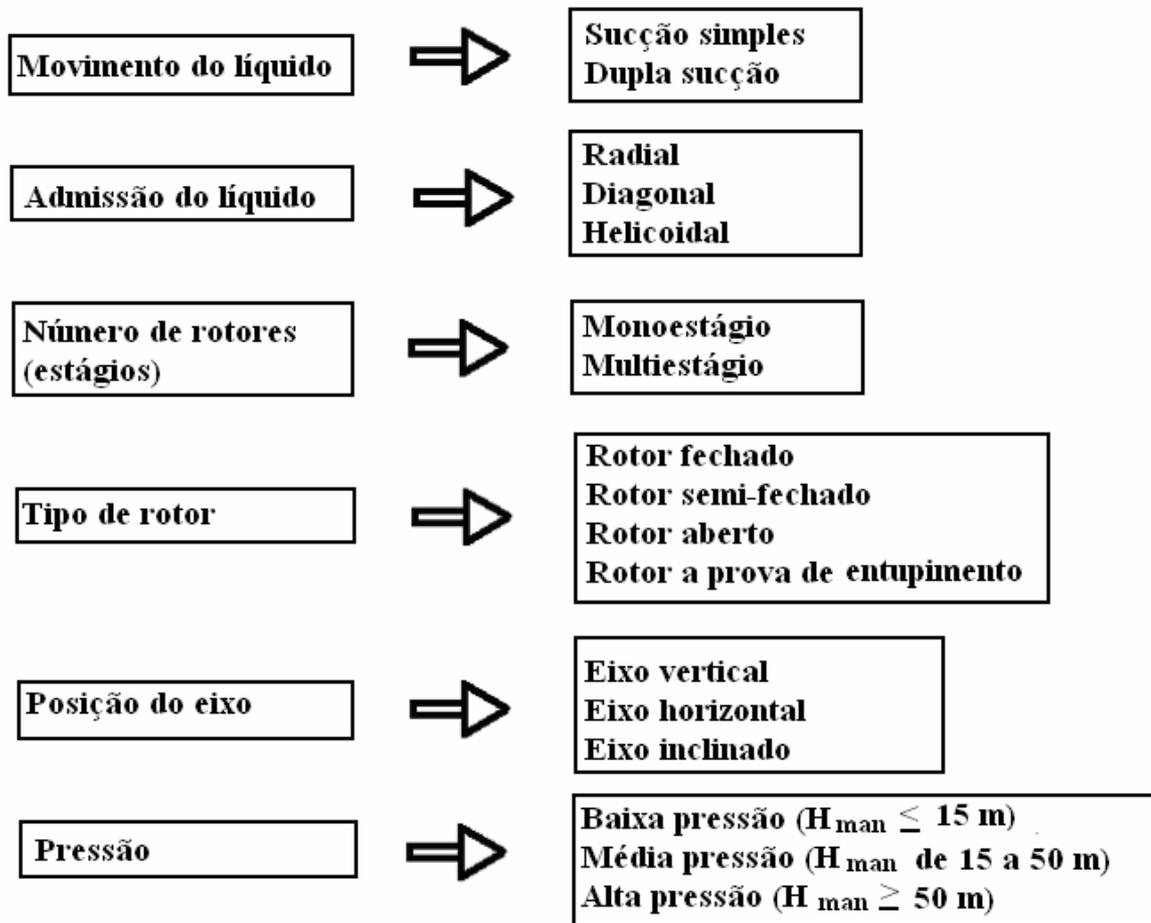


Figura 3.1 – Classificação dos principais tipos de bomba.
Fonte: adaptado de Azevedo e Alvarez (1977).

Quanto à posição do eixo da bomba em relação ao nível da água: bomba de sucção positiva: quando o eixo da bomba situa-se acima do nível do reservatório; bomba de sucção negativa, “afogada”: quando o eixo da bomba situa-se abaixo do nível do reservatório.

3.2.1.1 Curvas características

A escolha de uma bomba, de uma forma geral, se dá em função do recalque de determinada vazão para uma determinada altura manométrica. Por razões econômicas, uma bomba é fabricada de forma a atender uma faixa de utilização de diferentes valores de vazões, com diferentes pressões, potências e rendimentos, segundo Carvalho (2003).

Ainda, Carvalho (2003), cita que a modificação do ponto de operação pode ser feita de várias formas: 1) modificando a curva do sistema por meio da abertura ou fechamento parcial do registro de gaveta, ou ainda, mudando o diâmetro e/ou comprimento da tubulação, variando assim a perda de carga; 2) modificando a curva característica da bomba pela alteração da velocidade de rotação da mesma, ou ainda, alterando o diâmetro do rotor.

Alguns conjuntos de bombeamento são montados com mais de uma unidade, configurando uma associação de bombas. Indicada para a necessidade de variação da vazão e da altura manométrica em magnitude tal que tornaria anti-econômico o atendimento com uma única bomba.

A Figura 3.2 apresenta um gráfico de pré-seleção de bombas de uma determinada marca, a partir do qual o usuário tem uma idéia de quais catálogos consultarem a respeito da seleção propriamente dita, locando o ponto de trabalho neste gráfico e determinando qual a “família” ideal de bombas.

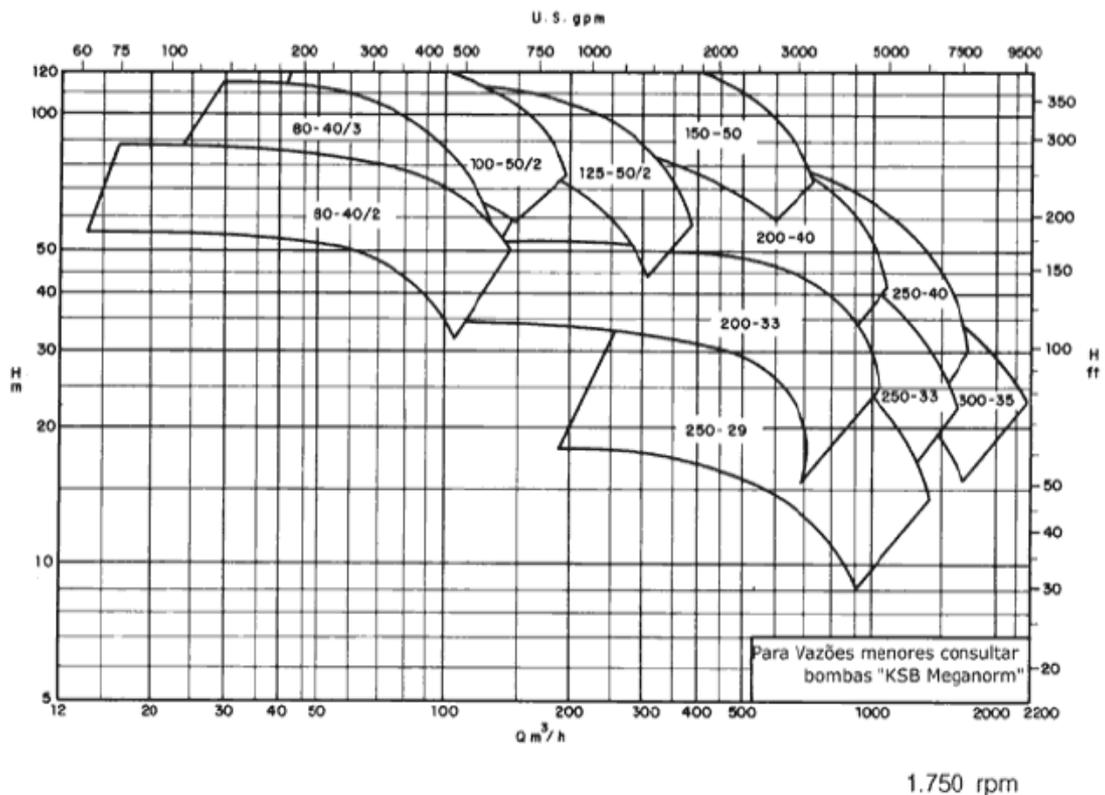


Figura 3.2 – Gráfico de pré-seleção de uma bomba.
Fonte Manual KSB.

3.2.1.2 Cavitação

Cavitação consiste da rápida vaporização e condensação de um líquido. O processo é análogo ao da ebulição. Na ebulição, cavidades de vapor são formadas a partir de bolhas menores (núcleos) existentes no meio líquido, com o aumento da temperatura e a pressão mantida constante. A cavitação normalmente ocorre quando o líquido, a uma temperatura constante, é submetido à pressão de vapor, seja por meio estático ou dinâmico (CARVALHO, 2003).

Quando a pressão absoluta em um determinado ponto se reduz a valores abaixo de um determinado limite, alcançando o ponto de ebulição da água, esse líquido começa a ferver e os condutos ou peças passam a apresentar, em parte, bolsas de vapor dentro da própria corrente (AZEVEDO E ALVAREZ, 1977).

A cavidade de vapor muda a forma efetiva da passagem do fluxo, assim alterando o campo de pressão local. Como o tamanho e a forma da cavidade de vapor são influenciados pelo campo de pressão local, o escoamento pode passar a não permanente.

Essa condição pode causar oscilação em todo o escoamento e vibração na máquina.

Numa bomba, a cavitação tende a começar na seção onde o escoamento é acelerado para dentro do rotor. A tendência a cavitatar aumenta à medida que a velocidade do escoamento local fica maior, isto ocorre sempre que a vazão ou a velocidade de operação da máquina aumenta. Segundo Carvalho (2003), alguns autores citam que, além do efeito mecânico existe, também, o efeito químico devido a íons livres de oxigênio que corroem a superfície.

Os principais efeitos da cavitação na bomba são: corrosão, com remoção e destruição de pedaços da parede de rotores e carcaça; queda de rendimento; aumento da potência exigida no eixo (potência requerida); trepidação, vibração, desbalanceamento e; ruído, como sendo um martelamento na estrutura da bomba causado pelas implosões das bolhas.

Os efeitos poderão ser mais destrutivos dependendo do acabamento interno da bomba. A presença de cavidades, trincas e ranhuras, facilitam e reforçam o ataque e a corrosão. Na Figura 3.3 são apresentados defeitos encontrados em rotores e carcaças de bombas, associados aos problemas oriundos de cavitação.



Figura 3.3 - Carcaça e rotor de bomba que apresentaram problemas.

3.2.2 Motores de indução trifásicos

Muito embora os motores de indução trifásicos sejam máquinas intrinsecamente eficientes, estes se constituem como um grande potencial de conservação de energia. Segundo Fitzgerald (1977 apud CAMPANA et al. 2000) e Dorf (1993 apud CAMPANA et al. 2000), os motores elétricos são equipamentos que, dentro de certos limites técnicos, fornecem a quantidade de energia mecânica demandada pela carga; isto significa que o rendimento do motor poderá ser insatisfatório e seu funcionamento poderá ser otimizado. Ainda, dentre os fatores que afetam o desempenho dos motores elétricos citam-se o dimensionamento de motores elétricos e a variação da tensão de alimentação em relação à nominal, além do desequilíbrio de tensão entre fases.

Por outro lado, é muito comum encontrar o chamado motor superdimensionado, ou seja, motores acionando cargas muito inferiores à sua capacidade nominal, acarretando em baixos fatores de potência e rendimentos, contribuindo para a sua aplicação ineficiente.

Em pesquisa realizada pela CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) (1993), em um universo de 3.425 motores, 28,75% estavam superdimensionados atribuindo-se, a este fato: o desconhecimento das características da própria carga; os sucessivos fatores de segurança nas diversas etapas de projeto; a expectativa de futuro aumento da carga; e a falta de informação sobre métodos de dimensionamento mais adequados.

Basicamente, uma máquina elétrica é um conversor eletromecânico de energia que, baseado em princípios eletromagnéticos, converte energia elétrica em energia mecânica chamado de motor, ou vice-versa, quando passa a se chamar de gerador. Naturalmente, esta

conversão não é completa devido a uma série de perdas que ocorrem no interior da máquina durante este processo.

As perdas nas máquinas elétricas podem ser divididas em: perdas mecânicas (atrito e ventilação); perdas joules (calor) no estator e rotor; perdas magnéticas no ferro e; perdas suplementares.

As perdas mecânicas são geradas pelo sistema de ventilação e pelo atrito dos rolamentos, podendo ser reduzidas através da otimização dos ventiladores e adequação dos mancais .

As perdas joule no estator e no rotor aumentam acentuadamente a carga aplicada ao motor, são reduzidas através do aumento da secção do cobre dos condutores do estator e do aumento das gaiolas condutoras do rotor.

As perdas magnéticas no ferro são geradas pelo efeito de histerese e pelas correntes induzidas (parasitas) e variam com a densidade de fluxo magnético e com a frequência, sua redução é conseguida pelo uso de chapas de aço de baixas perdas magnéticas, além da utilização de maior volume de material para redução da densidade de fluxo magnético.

Perdas suplementares, são geradas pela frequência da corrente de carga que desvia parte do fluxo magnético em vazio para o fluxo de dispersão.

A distribuição das perdas em um motor varia de acordo com o seu carregamento. A Figura 3.4 apresenta a relação de proporção e distribuição média das perdas em um motor operando em condições nominais.

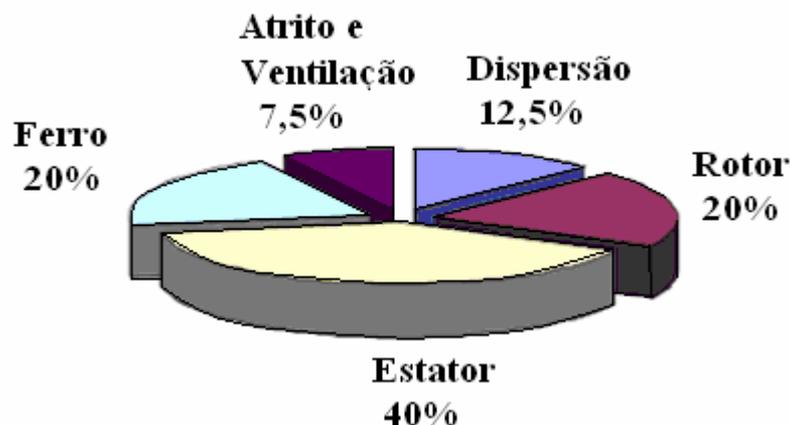


Figura 3.4 – Perdas em um motor de indução.

Fonte: WEG.

O motor elétrico absorve energia elétrica da linha da rede e a transforma em energia mecânica disponível no eixo. O rendimento define a eficiência com que é feita esta transformação.

Chamado “Potência útil” (P_u), a potência mecânica disponível no eixo e, “Potência absorvida” (P_a), a potência elétrica que o motor retira da rede, o rendimento será a relação entre as duas, ou seja:

$$\eta = \frac{P_u(W)}{P_a(W)} = \frac{736 \cdot P(cv)}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi} = \frac{1000 \cdot P(kW)}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi} \quad (3.1)$$

Ou

$$\eta\% = \frac{736 \cdot P(cv)}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Sendo:

U – tensão da rede (volt);

I – corrente (Ampére)

$\cos \varphi$ – fator de potência

φ – ângulo de defasagem de tensão em relação a corrente

A potência elétrica absorvida da rede menos as perdas resulta na potência mecânica disponível no eixo do motor.

3.2.2.1 Motor de alto rendimento

Os motores de alto rendimento se apresentam como uma boa alternativa, muito embora não sejam as soluções definitivas para todos os problemas energéticos relacionados aos motores de indução, posto que são suscetíveis a fatores exógenos (condições do alimentador, método de partida, ambiente de trabalho, etc.) tanto quanto os motores de projeto padronizado.

A principal característica destes motores é a melhoria em pontos vitais onde se concentra a maioria das perdas. Como exemplo, pode-se citar: o aumento da quantidade de cobre nos enrolamentos do estator, incluindo o projeto otimizado das ranhuras; o super dimensionamento das barras do rotor para diminuir as perdas por efeito Joule; diminuição da intensidade de campo magnético e utilização de chapas magnéticas de boa qualidade para reduzir as perdas no ferro e a corrente de magnetização; emprego de rolamentos adequados e otimização do projeto dos ventiladores para diminuir as perdas por atrito e ventilação;

regularidade do entreferro, melhoria no isolamento e tratamento térmico das chapas do estator e do rotor para reduzir as perdas adicionais.

Segundo a WEG (1999), os motores de alto rendimento são projetados para fornecer a mesma potência útil na ponta do eixo que os motores do tipo padrão, porém com um menor consumo de energia elétrica da rede (maior rendimento). Estes motores possuem características construtivas diferenciadas de acordo com as normas ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), IEC (International Electrotechnical Commission), NEMA (National Electrical Manufacturers Association) e CSA (Canadian Standards Association), como: chapas magnéticas de aço silício que reduzem a corrente de magnetização, diminuindo assim as perdas no ferro; maior volume de cobre reduzindo a temperatura de trabalho, ou seja reduzindo as perdas Joule; enrolamento dupla camada, melhorando a dissipação de calor; rotores tratados termicamente e menores regiões de entreferro, reduzindo as perdas suplementares; além de possuírem maior tempo de vida útil, reduzindo assim os custos com manutenção.

Ainda segundo o manual, estes motores têm até 30% a menos de perdas, o que significa uma real economia, proporcionando baixo consumo de energia e menor despesa. São mais adequados nas aplicações com variação de tensão.

3.2.3 Métodos de acionamento de um motor de indução

Segundo WEG (1999) sempre que possível, a partida de um motor trifásico de gaiola, deverá ser direta, por meio de contadores. Para um determinado motor, as curvas de conjugado e corrente são fixas, independente da carga, para uma tensão constante. Nos casos em que a corrente de partida do motor é elevada podem ocorrer as seguintes conseqüências prejudiciais: a) elevada queda de tensão no sistema de alimentação da rede; b) o sistema de proteção (cabos, contadores) deverá ser superdimensionado, ocasionando um custo elevado; c) a imposição das concessionárias de energia elétrica que limitam a queda de tensão na rede.

Quando se põe em funcionamento o motor elétrico, a corrente absorvida é superior a três vezes à corrente nominal a plena carga. O valor depende do tipo e das características construtivas do motor. À medida que o motor vai atingindo sua potência nominal, a corrente vai decrescendo e a velocidade aumentando, até que atinja a velocidade de regime, o que se

dará quando o motor estiver fornecendo a potência nominal para a qual foi previsto funcionar, em condições normais.

Caso a partida direta não seja possível, devido aos problemas citados, pode-se usar sistema de partida indireta para reduzir a corrente de partida: chave estrela-triângulo; chave compensadora; chave série-paralela; partida eletrônica (*soft-starter*).

A partida com chave estrela-triângulo poderá ser usada quando a curva de conjugado do motor é suficientemente elevada para poder garantir a aceleração da máquina com a corrente reduzida. Na ligação estrela, o conjugado fica reduzido para 25 a 33% do conjugado de partida na ligação triângulo. Por este motivo, sempre que for necessária uma partida estrela-triângulo, deverá ser usado um motor com curva de conjugado elevado, para partida a plena carga, somente quando as cargas forem leves (bombas em vazio). É fundamental, para esta partida, que o motor tenha a possibilidade de ligação em dupla tensão, isto é, 220/380 V, 380/660 V ou 440/760 V, tendo no mínimo 6 bornes de ligação.

Chaves compensadoras (auto-transformador) de partida são chaves automáticas utilizadas em carga de motores trifásicos com rotor em gaiola. Reduzem a corrente de partida, evitando sobrecarregar-se a rede alimentadora. Deixam, porém, o motor com um conjugado suficiente para a partida e aceleração, embora o reduzam.

Na partida, um contator liga em estrela um autotransformador e, por um contator auxiliar, liga um relé de tempo. A tensão na chave compensadora é reduzida através de um autotransformador com *taps* para 50, 65 e 80% da tensão normal (WEG, 1999). O motor parte, assim, em tensão reduzida. Após o tempo ajustado para a entrada do motor na velocidade nominal, o relé de tempo desliga o contator e introduz no circuito um outro contator, o qual liga o motor diretamente à rede.

Com a crescente necessidade na otimização de sistemas e processos e, com o avanço da eletrônica, permitiu a criação da chave de partida a estado sólido, a qual consiste em um conjunto de pares de tiristores, um em cada borne de potência do motor. O ângulo de disparo de cada par de tiristores é controlado eletronicamente para aplicar uma tensão variável aos terminais do motor durante a aceleração. Este comportamento é, muitas vezes, chamado de partida suave, ou *soft-starter*.

A Figura 3.5, demonstra as diversas partidas de motores elétricos e sua relação com a corrente destes motores em função do tempo, no momento do início de funcionamento. Claramente se observa a diferença entre as diversas partidas e o reflexo esperado na rede de alimentação dos motores elétricos.

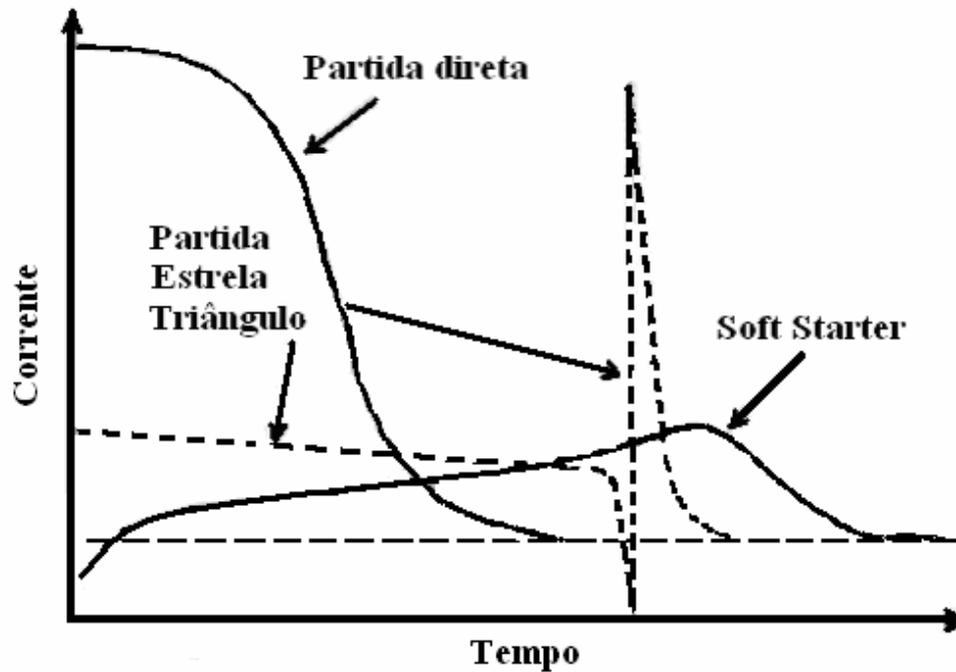


Figura 3.5 – Comparativo entre métodos de partida de motores.
 Fonte: WEG (1999).

3.3 Adutora

Na maioria dos dimensionamentos de sistemas de irrigação no Brasil, a seleção econômica é pouco usual, sendo o custo de implantação o fator decisivo na escolha do diâmetro das tubulações, ignorando-se a avaliação dos custos variáveis do sistema de irrigação e o tempo na análise dos custos fixos (ZOCOLER,1999). Segundo Bernardo (2005), a seleção econômica das tubulações de um sistema de irrigação deve receber tanta consideração quanto a solução hidráulica do problema, sendo que o dimensionamento baseado na análise econômica consiste em determinar, para cada condição, o(s) diâmetro(s) com os quais a somatória do custo anual fixo com o custo anual variável seja mínima.

Favetta (1998), apud ZOCOLER e FRIZZONE (2001), realizou um estudo em 89 sistemas elevatórios de água para suprimento de equipamentos de irrigação do tipo pivô central no Brasil, tendo concluído que o custo anual total seria menor se fosse utilizado o primeiro diâmetro superior ao diâmetro original em 55,1% dos sistemas e o segundo diâmetro superior em 20,2% dos sistemas. O diâmetro original foi o que proporcionou o menor custo anual total em 22,5% e, por outro lado, em apenas 2,2% o primeiro diâmetro inferior ao original é que proporcionaria uma redução do custo anual total.

3.4 Discussão e análise

Os sistemas de irrigação por pivô central, com o passar do tempo, estão evoluindo, sendo que esta evolução procede de diversas formas, principalmente em função das diversas áreas que o estruturam.

A área elétrica, com as diversas chaves de partida para motores e mecanismos eletrônicos, está contribuindo muito com a evolução dos equipamentos de irrigação. Esta evolução permite, por exemplo, o funcionamento do sistema acessório de pivôs para irrigação dos cantos nas áreas circulares, minimizando a perda de área, característico deste sistema de irrigação.

A fabricação e uso de aspersores diferenciados, nos equipamentos de irrigação, também tem contribuído com a aplicação e evolução dos sistemas. O uso de aspersores que requerem menor pressão para seu pleno funcionamento, aumenta a eficiência no uso da energia e melhora a distribuição da água. Reguladores de pressão que atendam faixas de vazão e pressão maiores, e com vida útil mais prolongada também beneficiam a técnica.

O uso de motoredutores e redutores de roda com maior eficiência e menor desgaste, possibilitam que a necessidade de energia para o acionamento do equipamento baixe, e com isso fontes diferentes podem ser acopladas aos equipamentos, como exemplo a fonte solar para energia de acionamento das torres do sistema.

Tubulações que possuem coeficientes de rugosidade menores, com maior resistência mecânica e desenvolvida para resistir a agentes de corrosão presentes na água de irrigação, são encontrados com maior frequência no mercado de irrigação. Este desenvolvimento possibilita que os equipamentos possam ser utilizados em regiões que antes poderiam ser não indicadas.

CAPÍTULO IV

Neste Capítulo são apresentados fundamentos sobre um projeto, e o projeto de sistemas irrigados. A identificação de pontos críticos na construção do projeto e a clareza na montagem do mesmo é um fator de auxílio para os projetistas de sistemas irrigados; tratados também neste Capítulo.

4. PROJETOS EM IRRIGAÇÃO: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE PROJETOS

4.1 Introdução

A arte de irrigar um determinado local necessita mais que a instalação do equipamento, ou a mão-de-obra adequada para sua utilização. A forma correta e muitas vezes aquela que trará sustentabilidade para as culturas a serem implantadas inicia com um adequado projeto.

A complexidade do projeto técnico de um sistema de irrigação está muitas vezes associado ao conhecimento do engenheiro projetista, não por esse motivo, sucumbindo etapas, mas sim tornando mais otimizadas.

O estudo do projeto é um dos fatores de sucesso no desenvolvimento e instalação do sistema de irrigação, sobretudo com o uso computacional esta etapa se tornou mais rápida e com isso possibilitou a avaliação de várias versões do mesmo projeto para identificar a que mais se adapta as condições enfrentadas.

Neste capítulo fundamentou-se o projeto, caracterizando em especial o projeto do pivô central. Discutiu-se e foram avaliados os aspectos metodológicos de projeto assumidos, já que a literatura nos traz a formulação do projeto basicamente hidráulico e aqui demonstramos as outras verificações necessárias ao projeto.

4.2 Procedimento metódico para o desenvolvimento de um projeto

4.2.1 Requisitos e necessidades

Face à grande importância do desenvolvimento do projeto para o sistema de irrigação, torna-se necessário um procedimento para o desenvolvimento de boas soluções, qual seja planejável, flexível, otimizável e verificável. Tal procedimento só é aplicável quando, além do necessário conhecimento especializado, os projetistas souberem trabalhar de modo sistemático e essa metodologia de trabalho exigir ou for auxiliada por medidas organizacionais.

Segundo Pahl et al. (2005), faz-se uma distinção entre ciência de projeto e metodologia de projeto. Com a ajuda de métodos científicos a ciência de projeto visa analisar a constituição de sistemas técnicos e sua interação com a circunvizinhança de modo que, partindo das relações e dos componentes identificados no sistema, possam ser derivadas regras para seu desenvolvimento.

Por metodologia de projeto, entende-se um procedimento planejado com indicações concretas de condutas a serem observadas no desenvolvimento e no projeto de sistemas técnicos, que resultaram de conhecimentos na área da ciência de projeto e da psicologia cognitiva e também da experiência com diferentes aplicações.

Com os métodos de projeto é objetivado despertar as habilidades individuais do projetista por meio de diretrizes e ajudas, potencializar sua disposição com relação à criatividade e simultaneamente evidenciar a necessidade de uma avaliação subjetiva do resultado.

O projeto metódico possibilita uma racionalização eficaz do processo de projeto. A progressiva concretização dos princípios de solução possibilita a seleção precoce e a otimização com menor volume de trabalho. A metodologia de projeto também é um pré-requisito imprescindível para um processo de projeto flexível e permanente, assistido por computador, que emprega modelos de produto armazenados na memória.

4.2.2 Engenharia de sistemas

Procedimentos e métodos da engenharia de sistemas têm adquirido crescente relevância em processos técnicos sócio-econômicos. Como ciência interdisciplinar, a engenharia de sistemas disponibiliza métodos, processos e ferramentas para análise, planejamento, seleção e configuração otimizada de sistemas complexos.

Criações técnicas, aparelhos e equipamentos, são sistemas artificiais, concretos, na maioria das vezes dinâmicos, constituídos por um conjunto de elementos ordenados, interligados por relações com base nas suas características, sendo um bom exemplo os sistemas de irrigação. Além do mais, um sistema se caracteriza por estar delimitado por seu ambiente, onde as ligações para o mesmo ambiente são seccionadas pelos limites do sistema.

Partindo do fato de que criações técnicas representam sistemas, é natural verificar se os métodos da engenharia de sistemas são aplicáveis ao processo de projeto, uma vez que os objetivos da engenharia de sistemas correspondem amplamente aos requisitos relativos a um método de projeto.

O procedimento da engenharia de sistemas baseia-se na percepção geral de que problemas complexos são adequadamente solucionados em determinadas etapas de trabalho. Essas etapas de trabalho deverão ser orientadas pelas mesmas etapas de qualquer atividade de desenvolvimento, pela análise e pela síntese.

A Figura 4.1 mostra as etapas de um procedimento de acordo com a engenharia de sistemas. O procedimento se inicia com a coleta de informações acerca do sistema a ser projetado, fase conhecida como estudo do sistema, que pode ser resultante de análises de mercado, pesquisas de tendências ou de formulações de problemas concretos. O objetivo destas análises de sistema é a formulação clara dos problemas ou sub-tarefas a serem solucionados, que passam a constituir o real ponto de partida para o desenvolvimento do sistema. Na segunda etapa, é elaborado um programa alvo, que define formalmente a meta do sistema a ser criado (formulação do problema).

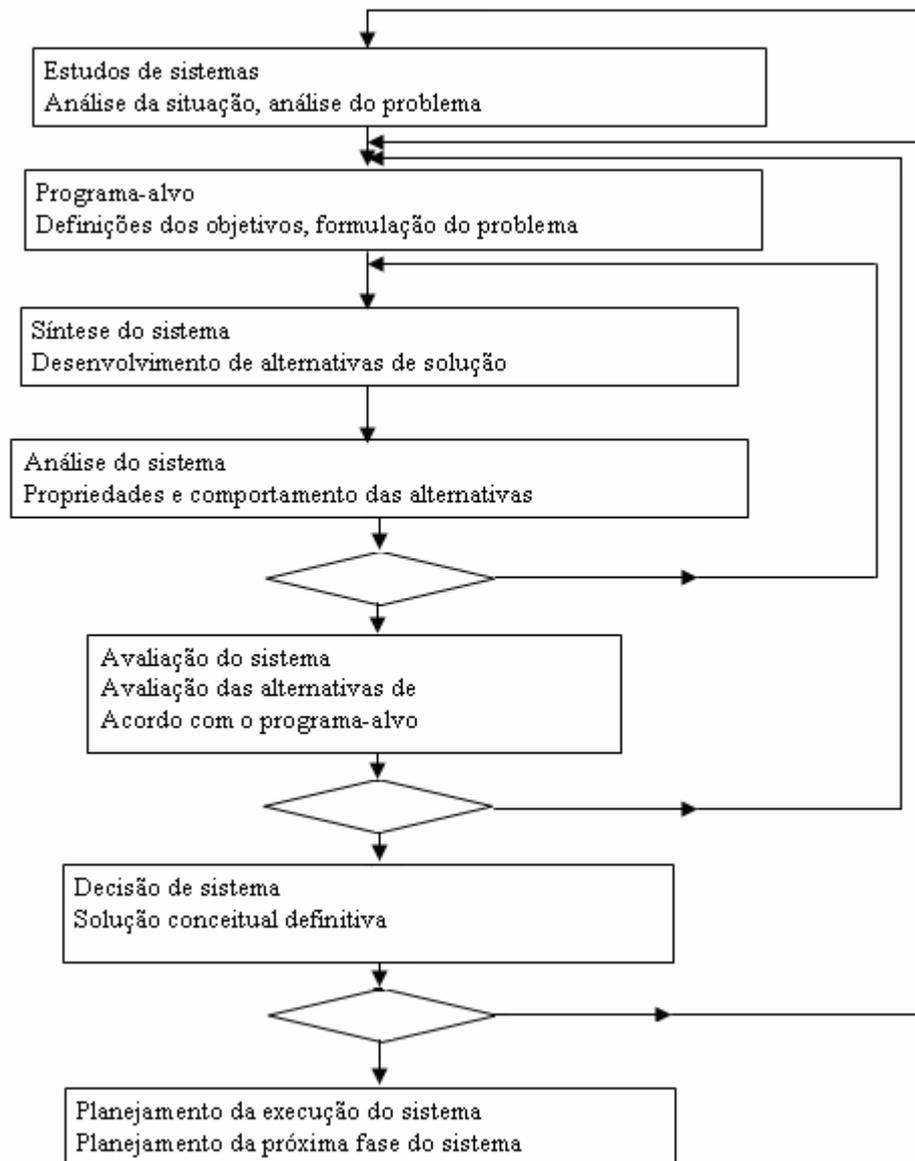


Figura 4.1 – Etapas de um procedimento de acordo com a engenharia de sistemas.

Fonte: Adaptado de Pahl et al., 2005.

A síntese do sistema compreende o real desenvolvimento das variantes da solução com base nas informações coletadas nas duas primeiras etapas. Esse processamento de informações deverá fornecer o maior número possível de propostas de solução e de configuração para o sistema planejado.

Para a escolha de um sistema otimizado que atenda a formulação do problema, as variantes de solução encontradas são comparadas com o programa alvo elaborado no início. Ou seja, deve-se certificar qual solução satisfaz os requisitos do problema da melhor forma. Pré-condição é o conhecimento das características das variantes da solução. Por esta razão,

numa análise de sistema, são apuradas primeiramente estas características, que constituirão a base para a subsequente avaliação do sistema. A comunicação da informação finalmente ocorre na fase de planejamento da execução do sistema.

Além disso, a Figura 4.2 indica que nem sempre as etapas de trabalho permitem alcançar diretamente o objetivo do desenvolvimento, mas que frequentemente, só um procedimento iterativo conduz a soluções adequadas. As etapas de decisão intercaladas facilitam esse processo de otimização, o que representa uma conversão de informações.

Em um modelo de procedimentos da engenharia de sistemas, as etapas do procedimento se repetem nas chamadas fases da vida do sistema, no qual a evolução de um sistema em função do tempo caminha do abstrato para o concreto.

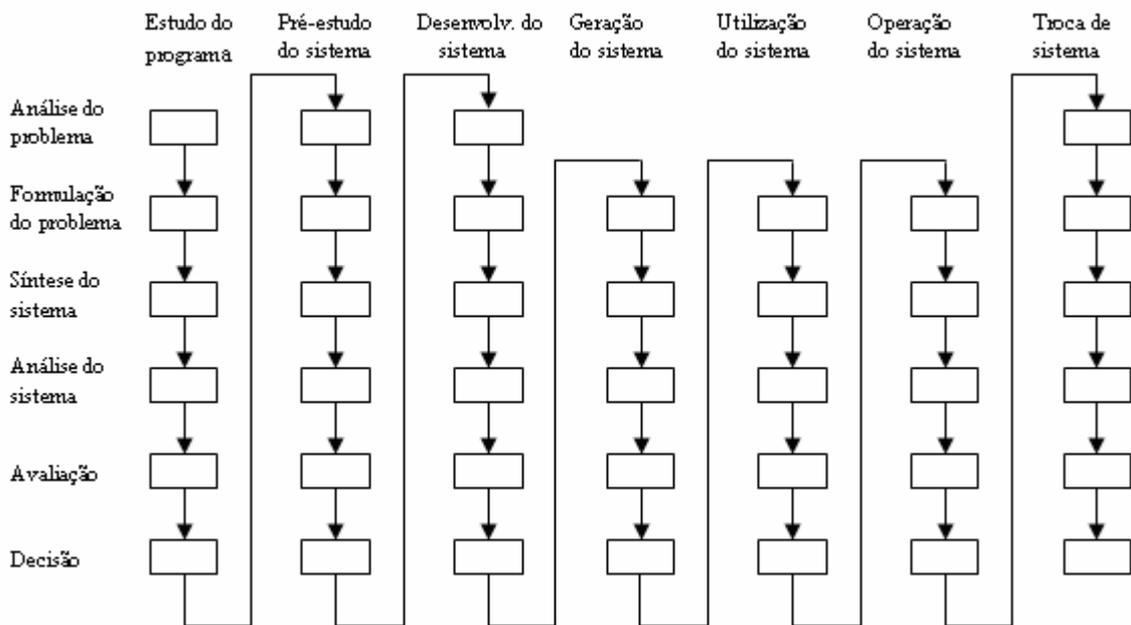


Figura 4.2 – Modelo de procedimento da engenharia de sistemas para as diferentes fases do ciclo de vida (fases de concretização).

Fonte: Adaptado de Pahl et al., 2005.

4.2.3 O engenheiro projetista

A missão do engenheiro é encontrar soluções para problemas técnicos. Para tanto ele se baseia em conhecimentos das ciências naturais e da engenharia e leva em conta as condicionantes matemáticas, tecnológicas e econômicas, bem como as restrições legais, ambientais e aquelas impostas pelo ser humano, segundo Pahl et al. (2005).

As soluções precisam atender aos objetivos prefixados e autopropostos. Cabe ao engenheiro de projeto transformar o problema em tarefas e nesta subdivisão atender cada tarefa com dependência na sua significância para o projeto global.

4.2.4 Projeto

Do ponto de vista metodológico, projetar é um processo de otimização com objetivos predeterminados e condicionantes em partes conflitantes. Os requisitos variam em função do tempo, de modo que uma solução de projeto só pode ser objetivada ou almejada de maneira otimizada, sob as condicionantes existentes na época da solicitação, (PAHL et al., 2005).

Do ponto de vista organizacional, o projeto participa de forma significativa do ciclo de vida de um produto. O ciclo inicia por uma demanda do mercado ou por uma vontade, começando pelo planejamento do produto e, após a sua utilização, terminando na reciclagem ou num outro tipo de descarte (PAHL et al., 2005).

As tarefas organizadas de um projeto de irrigação sofrem influências diversas por fatores condicionantes impostos ao projetista. Como em cada projeto de irrigação existe um ambiente de implantação e de características determinadas, cabe ao projetista formular a melhor opção para cada problema estabelecido.

Em sistemas de irrigação novos, é facilitado todo o processo de estruturação e desenvolvimento do projeto; já nos sistemas instalados, onde devemos intervir com projetos adaptativos para remediar problemas ou situações novas impostas ao projeto original, e que por isso não foram observadas e avaliadas, as alterações são determinadas em função dos limites impostos pelos componentes já instalados, ou deve ser previsto a substituição de alguns componentes com maiores restrições.

Essa diversidade de tarefas e objetivos exige do projetista uma habilidade polivalente, assim como diferentes formas de procedimentos e ferramentas. Os conhecimentos de projeto requeridos precisam ser amplos onde, para problemas especiais, deverão ser consultados especialistas. O domínio de uma metodologia geral de trabalho, dos métodos de solução e de avaliação de aplicação geral, bem como a consideração de novos campos de solução, facilita a execução dessa variedade de atividades.

As atividades do projetista podem ser desdobradas em:

- conceituais, ou seja, o esforço de busca do princípio da solução, para o qual, além dos métodos de aplicação geral, também servem métodos especiais.
- de pré-projeto, ou seja, trabalhos de concretização do princípio da solução pela definição da configuração e do material;
- de detalhamento, ou seja, atividades referentes a preparação dos subsídios para a produção e utilização, para o que são úteis os métodos;
- atividades de cálculo, desenho e busca de informações, que incidem em todas as etapas de projeto.

Em um processo de projeto, as atividades necessárias precisam ser apropriadamente ordenadas num fluxo de trabalho claro, com etapas principais e etapas de execução, para que possam ser planejadas e controladas.

4.3 Projetos de sistemas irrigados

4.3.1 Fatores envolvidos no projeto de sistemas de irrigação

Segundo Solomon (1988), alguns dos elementos necessários para a escolha de um sistema de irrigação antes da confecção do projeto, da especificação do equipamento e instalação, podem ser citados:

1. Considerações Físicas: práticas culturais e de cultivo; solos; topografia; fornecimento de água; clima; valor de Terra e avaliação; problemas de contorno e obstruções (período de inundação, lâmina de água, pragas, indisponibilidade de energia e confiabilidade, considerações econômicas, capital de investimento requerido, disponibilidade de crédito e taxa de juros, vida útil do equipamento e custo anual, custo e inflação, energia, operação e manutenção, fluxo de caixa, fatores de eficiência);
2. Considerações Sociais: questões políticas e legais; cooperação local e suporte; disponibilidade e confiabilidade de mão-de-obra; habilidade e conhecimento em nível trabalhista; expectativas locais e governamentais; nível de automação do projeto; potencial para danos por vandalismo; problemas de saúde.

Para Han et al. (1994) os fatores que afetam a escolha em sistemas de irrigação precisam considerar um número de diferentes fatores antes de fazer a escolha final. Estes incluem a cultura e o requerimento de água da cultura, fornecimento de água, as características de solo, a topografia para a cultura como também o tamanho e a forma, o clima para a área, e inúmeros fatores econômicos tais como mão-de-obra requerida, capital disponível, e custo do recurso. Muitos dos fatores são interdependentes, e enquanto um pode ou não indicar uma definida necessidade para uma particular prática ou método de irrigação, as relações entre estes fatores precisam ser consideradas. Seguem, segundo os autores, a descrição de cada fator:

Fatores de abastecimento de água incluem a quantidade e qualidade da fonte. Os tipos e quantidades de sais dissolvidos na água precisam ser conhecidos. A disponibilidade da água em termos de tempo e frequência afetam o desenvolvimento e gerenciamento dos sistemas, e o aumento exigido da taxa de oferta se o fornecimento não é contínuo. O tamanho do córrego disponível pode limitar a escolha do sistema para somente aquele mais eficiente. Também, se a água não está disponível durante os períodos secos críticos ou no estágio crítico de crescimento, a irrigação é ineficaz.

Características de solo que devem ser avaliados incluem: a taxa de infiltração, capacidade de uso da água (água disponível), profundidade, condições de drenagem, reações para a água e sais, e erodibilidade do solo. A variabilidade destas propriedades sobre uma cultura também precisa ser conhecida. A razão pela qual o solo absorve água, a taxa de infiltração, poderá frequentemente eliminar algum método de irrigação em consideração. A água disponível no solo e a profundidade do solo na união com a profundidade do sistema radicular, a água requerida pela cultura e as condições climáticas podem na verdade indicar que a irrigação não é necessária. Tipicamente, isto somente será o caso para o sistema radicular mais profundo ser cultivado em solos de textura fina, ou quando os períodos secos durante os meses do verão são de curta duração. Condições de drenagem do solo são de extrema importância. Solos em que não tem uma adequada drenagem natural podem rapidamente apresentar encharcamento condição de sobre irrigação. Escorrimento superficial para aplicação de água de irrigação e erosão da camada arável podem também ocorrer.

Tamanho do campo, forma e topografia requerem diferentes graus de flexibilidade nos sistemas de irrigação. Topografia da área pode ser como extensa área nivelando é requerido para ser capaz para uso com certo método. Declives acentuados não são recomendados para certos métodos e requerem projetos especiais para outros. Todos com o custo incrementado

dos sistemas.

Clima é o fator de direção na determinação da água requerida pelas culturas e a necessidade que a irrigação vai fornecer à parte se o requerido não vier pela precipitação. A variação por estação e a variação ano a ano no clima poderá frequentemente decidir a necessidade de irrigação para produzir altas colheitas e produtos de alta qualidade e que caso contrário parece ser um ambiente em que a irrigação não é necessária. Este é também o caso quando a irrigação está sendo usada para modificação no ambiente para cultivo protegido.

Na condição da escolha dos fatores que interferem no desenvolvimento do projeto do sistema irrigado, mesmo que dentro dos diversos métodos já esteja evidenciado qual será usado, devem ser levados em consideração aqueles mais relevantes que o projetista irá tomar como base para a construção do projeto. Estes fatores são determinados no início da construção do projeto, com a condição ideal e com a condição real, e serão comparados até o final deste.

Como fatores principais podem ser listados os relacionados com a questão:

- Ambiental: lâmina (vazão); eficiência do sistema (distribuição, aplicação); necessidade de irrigação; capacidade de água disponível no solo; taxa de infiltração; precipitação instantânea máxima; tipo de solo.

- Social: cultura a produzir; quantidade e disponibilidade de mão-de-obra.

- Econômica: área a irrigar; energia a ser usada (elétrica, combustão, hídrica, solar); comprimento de adução; desnível total (fonte de água a parte mais alta); pressão total do sistema; potência requerida; valor total do equipamento; depreciação anual do equipamento; perda de carga no equipamento; perda de carga na adução (velocidade na adução); custo da energia; rendimento do motor; rendimento da bomba.

Alguns dos fatores não teremos ação direta no projeto, então autores diversos trabalham naqueles onde acreditam que possam obter um sucesso maior de redução de custo e aumento de eficiência.

Segundo o texto *Strategies For Lowering Irrigation Energy Costs*, o exame detalhado em um sistema de irrigação pode identificar algumas áreas onde a redução de energia pode ser realizada. Considerações sobre a melhora de consumo podem ser agrupadas em cinco áreas principais: 1) aumento da eficiência da unidade de força; 2) aumento da eficiência da unidade de bomba; 3) aumento da eficiência da unidade de aspersão; 4) redução na pressão reduzindo a evaporação; 5) manejo da irrigação.

4.3.2 Eficiência e desempenho de sistemas irrigados

Em uma análise mais ampla ABIMAQ (2002) discutem e qualificam os fatores que afetam a eficiência do uso da água e o desempenho de sistemas de irrigação. Identificam que a potencialização do retorno socioeconômico e ambiental da irrigação é dependente do atendimento de quatro condições básicas; são elas: o uso de equipamentos de qualidade, projeto adequado do sistema, manejo racional e operação apropriada dos equipamentos pelo agricultor.

Através do esquema abaixo, Figura 4.3, os autores tentam mostrar a inter-relação das quatro condições.

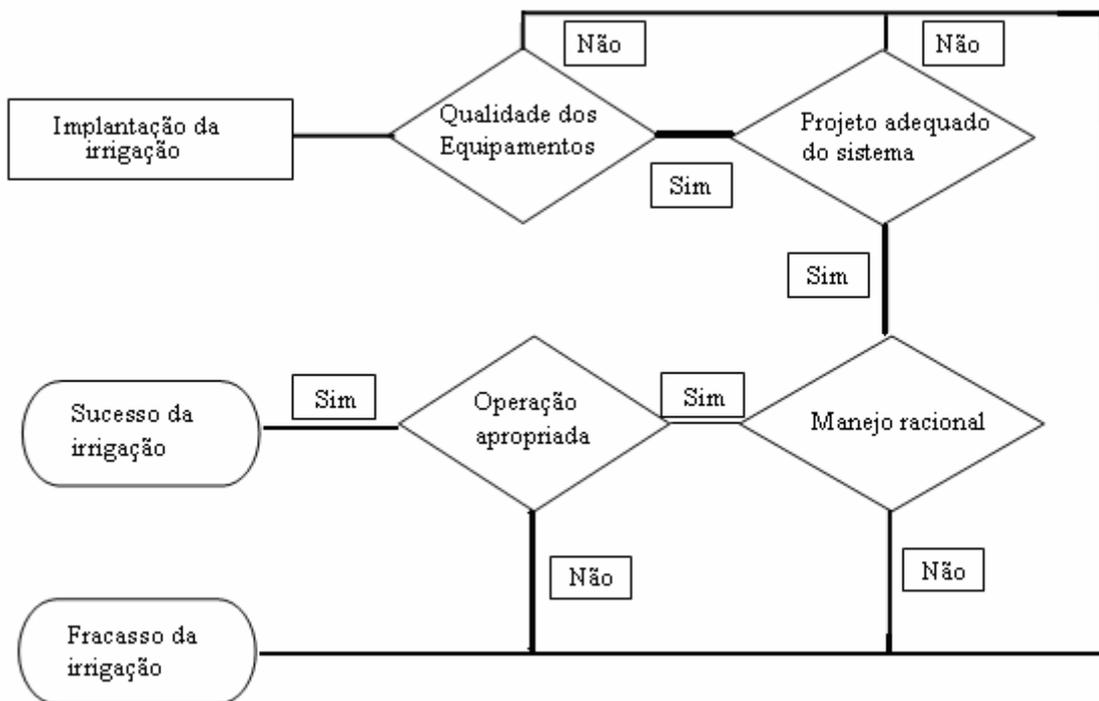


Figura 4.3 – Esquema das inter-relações dos fatores que viabilizam a irrigação.

Fonte: ABIMAQ (2002).

Seguem algumas características, de cada tópico especificado pelos autores:

4.3.2.1 Equipamentos de qualidade

Algumas características importantes, que determinam a qualidade de um produto são: facilidade de manuseio, confiabilidade, e durabilidade ou uma longa vida útil. Essas características, o fabricante de equipamento deve buscar junto ao usuário agricultor as informações essenciais que possam dar subsídio ao funcionamento destes e conhecer as diversas situações ou ambiente em que o equipamento será utilizado.

As empresas devem fornecer ao agricultor treinamento para a operação e manutenção, assim como adequada assistência técnica. O atendimento a essa condição possibilita maior durabilidade ao equipamento, mantendo suas características de funcionamento e permitindo menor tempo de retorno do investimento pelo agricultor.

Segundo Paz et al. (2000), a medida em que os sistemas de produção se tornam mais complexos com a introdução de novas tecnologias, os conhecimentos e as informações ganham maior importância. Quem tem acesso à informação e pode entendê-la, tem a vantagem, em termos comparativos, para a seleção da tecnologia mais adequada e, com isto, a redução dos custos de produção. A informação é importante na gestão dos recursos limitados, além de acelerar a difusão, a transferência e o intercâmbio entre pesquisadores e usuários de sistemas tecnológicos.

4.3.2.2 O planejamento e o projeto adequado dos sistemas de irrigação

Com a rápida expansão da agricultura irrigada, no Brasil, muitos problemas têm surgido em consequência do desconhecimento das diversas alternativas de sistemas de irrigação, conduzindo a uma seleção inadequada do melhor sistema para uma determinada condição. Esse problema tem causado o insucesso de muitos empreendimentos, ocasionando a frustração de agricultores com a irrigação e, muitas vezes, a degradação dos recursos naturais.

O planejamento e o projeto dos sistemas de irrigação devem estar perfeitamente adequados às necessidades da cultura e às condições da propriedade. A contratação de técnicos capacitados e responsáveis permite retirar de bons equipamentos o máximo de rendimento tecnológico para o produtor. O valor do investimento de bons equipamentos pode se tornar prejuízo se o projeto do sistema não atender as demandas das culturas irrigadas e não

respeitar as limitações impostas ao seu uso dentro da propriedade.

Apesar dos conhecimentos adquiridos pelo projetista em sua formação acadêmica serem essenciais para o bom projeto, as características técnicas de cada tipo ou marca comercial dos sistemas de irrigação ofertados no mercado são de extrema importância; desta forma a confecção do projeto mais adequado está condicionado a experiência do projetista.

Segundo Paz et al.(2000), é indispensável que a pesquisa seja um processo contínuo, visto que a tecnologia gerada necessita de ajustes pontuais, em que a presença de técnicos e especialistas é oportuna e deve estar integrada a um programa de capacitação em todos os níveis, abrangendo técnicos, administradores, tomadores de decisão, produtores, etc.

De acordo com Gramolelli Junior et al. (2004), foi realizada uma pesquisa de campo, onde foi aplicado um questionário a 100 agricultores irrigantes, na Bacia do Rio Jundiá-Mirin, em São Paulo, perguntando se o sistema de irrigação possuía projeto. A resposta de 71% deles foi que não havia projeto em seu sistema de irrigação. Para qualificar a resposta foi realizada uma segunda pergunta, se foi feito o dimensionamento da bomba de captação de água? Tendo como resposta sim em 85% das propriedades, 11% não foram dimensionadas e 4% desconheciam o assunto. O autor concluiu em seu trabalho que apesar da grande maioria dos sistemas não terem projetos e a grande parte das bombas terem sido dimensionadas, verificou-se que pelo tipo de cultura e sobretudo pelo tamanho da área a ser irrigada, os conjuntos moto-bomba eram super-dimensionados.

Com estas informações podemos sugerir a discussão dos benefícios gerados pela formulação dos projetos de irrigação e também no seu correto dimensionamento, para aumento da eficiência das instalações.

4.3.2.3 O manejo racional da irrigação pelo produtor

O produtor deve manejar a irrigação de forma correta, atendendo as necessidades da cultura e as limitações do solo da propriedade e viabilizando o uso racional da água.

A inadequação na distribuição incorreta da água, o que pode determinar baixos valores de eficiência de irrigação, pode levar a efeitos desfavoráveis como: baixa produtividade por área; baixa produtividade por unidade de água aplicada; diminuição da área total irrigada; efeitos prejudiciais ao meio ambiente, e lucratividade menor com a agricultura irrigada.

Estima-se que, em média, a eficiência de irrigação é de 37% a nível mundial. Muito do

volume perdido torna-se severamente degradado em sua qualidade, ao arrastar sais, pesticidas e elementos tóxicos do solo, motivo pelo qual, além da dificuldade de recursos hídricos adicionais, em muitos casos tem-se o uso não eficiente como causa da redução da disponibilidade e da qualidade. Pequenos aumentos na eficiência produzem incrementos significativos na água disponível para outros fins, principalmente em situações de competição pelo uso da água; quanto maior a eficiência, menores os custos de bombeamento, condução e distribuição da água de irrigação (PAZ et al. 2000).

O manejo incorreto da irrigação pode levar a aplicações excessivas de água, que acarretarão desperdícios dos recursos hídricos da propriedade e da energia utilizada no bombeamento.

Algumas empresas, instituições de pesquisa e ensino apresentam programas computacionais de manejo, associados ao clima ou ao solo, e que auxiliam aos agricultores irrigantes neste item importante em sua atividade.

4.3.2.4 A operação dos equipamentos de irrigação

Conforme o manejo de irrigação, a operação dos equipamentos deve atender as especificações de projeto e ser apropriada às técnicas de cultivo irrigado. O uso de pessoal treinado para a operação dos equipamentos pode ser um fator crítico para o sucesso da irrigação e para a redução dos custos de manutenção dos sistemas. Quanto mais sofisticado e tecnológico for um sistema maior deve ser o cuidado e as preocupações com as questões de operação e de segurança pessoal.

Entende-se como operação do equipamento ou sistema de irrigação, o conjunto de serviços e ações requeridas para a aplicação de água à cultura, destacando-se as seguintes operações: funcionamento e manutenção do sistema moto-bomba; armazenamento, manuseio e manutenção de tubulações utilizadas em linhas adutoras e recalques e também em conexões e acessórios; operação de sistemas de tratamento da água de irrigação, como filtros, para garantir a qualidade de água aplicada pelo sistema; avaliação do funcionamento de emissores, aspersores, reguladores de pressão; programação de controladores de irrigação e calibragem de válvulas e acessórios; manutenção de sistemas elétricos de alta e baixa tensão; operação do sistema atendendo condições climáticas favoráveis à irrigação; avaliação das condições operacionais dos sistemas de irrigação em campo.

A manutenção de valores aceitáveis de eficiência de aplicação é função, não só do conhecimento das características hidráulicas dos sistemas, como vazão e pressão de projeto, ao longo da vida útil dos equipamentos como também pela experiência do técnico em operar sistemas e utilizar as técnicas corretas de cultivo voltadas para os princípios da agricultura irrigada.

Com esta discussão pode ser dito que é o conjunto dos fatores: projeto, manejo, qualidade do equipamento e sua operação que determinam em última instância a qualidade da irrigação e conseqüentemente o uso racional de água para produção sustentável de alimentos. E que apenas um desses fatores mal conduzidos pode comprometer toda a sustentabilidade do processo de produção.

4.4 Discussão e análise

O processo de planejamento, projeto, instalação e uso de um equipamento de irrigação é, de certa maneira, de maior importância que muitos técnicos e produtores normalmente compreendem.

A técnica é aperfeiçoada e as condições de uso cada vez mais exigentes. Atualmente se constrói um projeto técnico de um equipamento de irrigação não somente com as características hidráulicas e mecânicas pertinentes à técnica, mas também necessita que o projetista verifique as condições ambientais em que este equipamento estará condicionado, e que muitas vezes o impedirá de fazer seu uso.

A importância alertada no texto com as diversas características que o projetista deve estar atento, e para que ele deixe descritas as características iniciais a que foi submetido, deve ser seguida. Com o passar do tempo, características que hoje são importantes ou condicionantes podem ser alteradas, e o usuário ou avaliador saberá de que maneira foi estruturado aquele projeto.

Não é fator condicionante que um bom projeto possa ser realizado somente com aquele técnico que já possui experiência na área, mas muitas vezes é esta a condição encontrada. Não é o tempo de profissão que instrui o técnico, mas as diferentes condições a que ele já analisou. Esta característica é que normalmente faz com que ele chegue a um projeto técnico bem estruturado com um menor tempo despendido para aquela atividade.

CAPÍTULO V

Neste Capítulo são discutidas as eficiências nos projetos de irrigação, as distribuições de uniformidade dos equipamentos, entre outros aspectos relacionados ao seu manejo.

5. AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

Neste Capítulo são discutidas as eficiências nos projetos de irrigação, as distribuições de uniformidade dos equipamentos, entre outros aspectos relacionados ao seu manejo. Também são apresentados indicadores de eficiência relacionados a distribuição da água dos equipamentos de irrigação por pivô central, testados com os dados disponíveis para cada uma das regiões estudadas.

5.1 Introdução

Nos últimos anos, no Brasil, a expansão da agricultura irrigada possibilitou a incorporação de novas áreas ao sistema produtivo. Este incremento de áreas irrigadas associado com a degradação dos recursos naturais requer um manejo ainda mais cuidadoso dos sistemas de irrigação, com o objetivo de possibilitar a utilização potencial do sistema e do recurso natural em uso.

A irrigação é uma prática agrícola de fornecimento de água às culturas, onde e quando as precipitações, ou qualquer outra forma natural de abastecimento, não são suficientes para suprir as necessidades hídricas das plantas. A irrigação permite flexibilidade na escolha e diversificação das atividades agrícolas, gerando maiores produções, pela aplicação de tecnologias inovadoras e utilização de cultivos alternativos para suprir demandas do mercado interno, da exportação e da agroindústria regional. (BARRETO ET AL., 2004).

A irrigação por aspersão, de uma maneira geral, e o equipamento, pivô, utilizado, apresenta inúmeras vantagens em relação a outros sistemas e equipamentos no próprio

sistema de aspersão, entre os quais se verifica: dispensa a sistematização da superfície do solo; permite a aplicação de agroquímicos, principalmente fertilizantes e defensivos agrícolas em qualquer fase do desenvolvimento da cultura; possibilita a operação em períodos noturnos; adapta-se praticamente a todos os tipos de solo e culturas; apresenta fácil e rápida implantação do projeto e; possibilita um fácil controle da quantidade de água aplicada em cada irrigação.

Segundo Barreto et al. (2004), a economia de água nos diversos sistemas de irrigação começa com a aplicação de melhorias no manejo de água na parcela agrícola. Ainda reforçam que, a otimização de um projeto de irrigação e o seu manejo devem maximizar o lucro da propriedade, selecionando-se a estratégia que melhor equilibre a eficiência de uso da água.

Os equipamentos de irrigação são dimensionados e instalados com o propósito de aplicar água em uma área e com a melhor eficiência possível. O produtor rural dificilmente identifica pequenas variações na aplicação ou distribuição da água, que na maioria das vezes ocorre no decorrer do tempo. A sistematização de avaliações periódicas nos equipamentos de irrigação auxilia a tomada de decisão do produtor quanto a melhorias a serem realizadas no mesmo.

O problema maior ocorre no momento do projeto do sistema de irrigação, quando é determinada principalmente a parcela de energia que será consumida no decorrer da utilização do mesmo. A falta de um parâmetro comparativo de eficiência energética para os sistemas de irrigação deixa muito ampla a análise do investimento, normalmente focada na rentabilidade da cultura a ser implantada e não na sustentabilidade da mesma.

O uso eficiente da água de irrigação pode ser alcançado atuando-se: a) na estrutura de irrigação então existente, em termos de tipos de cultivo, sistemas de irrigação e gestão do uso de água; b) nos métodos de manejo da irrigação e c) nas técnicas que permitem aumento da eficiência do uso da água.

Em sistemas de irrigação, o consumo de energia aumenta de acordo com o desgaste do equipamento, pode também ser excessivo, devido a problemas no dimensionamento inicial. É de fundamental importância que possamos ter meios de constatar estes acontecimentos em cada instalação de irrigação e a cada período de utilização do mesmo.

Ao usuário do equipamento de irrigação, muitas vezes é difícil detectar o tempo certo de realizar a manutenção ou troca de algum componente do sistema, o objetivo da avaliação do equipamento é fornecer ferramentas de decisão para o produtor rural, e também analisar de forma global as regiões em estudo.

5.2 Avaliação de sistemas de irrigação

Segundo Frizzone e Neto (2003) há sistemas que, por terem sido mal projetados, apresentam baixa eficácia. Nesses casos e também naqueles sistemas cuja eficácia nunca foi avaliada, o ensaio constitui a via para o levantamento dos dados necessários à tomada de decisão sobre melhorias a introduzir para elevar a eficiência do sistema de irrigação. Silva et al. (1997) afirmam que freqüentemente é necessário avaliar o desempenho de um sistema de irrigação, a fim de determinar sua aplicabilidade em certas condições.

Guerra (2004) chama a atenção para o fato de que, em sistemas intensivos de agricultura irrigada, os equipamentos de irrigação são utilizados por vários anos sem a devida manutenção das estações de bombeamento e dos reguladores de pressão. Estes últimos possuem uma vida útil relativamente reduzida, em torno de 4 a 5 anos e devem ser repostos simultaneamente em um mesmo equipamento. Rotores de bomba danificados, bem como o envelhecimento das paredes internas das tubulações, diminuem a eficiência do sistema.

De acordo com Saad et al. (1987, apud FRIZZONE E NETO, 2003), há necessidade do desenvolvimento sistemático de ensaios de desempenho de sistemas de irrigação, tanto no campo quanto em laboratório, pois corre-se o risco de que os benefícios esperados por essa tecnologia acabem se transformando em sérios prejuízos.

Frizzone e Neto (2003) afirmam que os parâmetros de eficiência mais comumente utilizados são: a eficiência de aplicação, a eficiência de distribuição, a eficiência em potencial de aplicação e a eficiência de armazenagem. A eficiência de aplicação é a relação entre a quantidade de água armazenada na zona radicular e a quantidade de água aplicada à parcela, não provê informações relativas ao grau de adequação e a uniformidade de distribuição.

Silva et al. (1997) afirmam que freqüentemente é necessário avaliar o desempenho de um sistema de irrigação, a fim de determinar sua aplicabilidade em certas condições.

Segundo Hart et al. (1979, apud SILVA et al., 2002), ao se considerar as perdas por escoamento superficial na área irrigada e as perdas por condução no trajeto entre o ponto de captação e a área de cultivo, é possível, então, no que se refere à parcela irrigada, estabelecer o nível de desempenho da irrigação, usando apenas dois índices de eficiência e um de uniformidade. O índice de uniformidade indica o desempenho da irrigação na tarefa de distribuição da água na área cultivada. Os dois índices de eficiência indicam o grau de desempenho da irrigação em relação ao cumprimento das metas de manejo previamente estabelecidas no que diz respeito ao percentual da área adequadamente irrigada e a eficiência

de aplicação desejada.

A eficiência de aplicação global de um sistema de irrigação por aspersão é um termo usado por Keller e Bliesner (1990) para incluir o efeito das perdas devido a desuniformidade de aplicação, percolação, evaporação, deriva e vazamento da tubulação.

Nenhum sistema de irrigação é capaz de aplicar água com perfeita uniformidade. Em geral, o aumento da uniformidade de distribuição da água requer investimentos na melhoria do sistema, em manutenção e em mão-de-obra para o manejo racional da irrigação (DUKE et al., 1992; HEERMANN et al., 1992).

Letey et al. (1984) citam que a importância da uniformidade de distribuição de água, geralmente expressa pelo coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), (CHRISTIANSEN, 1942), na determinação da lâmina ótima de irrigação, tem sido amplamente reconhecida, mas nenhuma análise quantitativa universal foi desenvolvida.

A relação entre o grau de adequação e a eficiência de distribuição é discutida por Frizzone e Neto (2003), onde os elevados valores de uniformidade de distribuição de água e grau de adequação devem estar associados a elevados investimentos e custos operacionais, embora nem sempre se obtenha os maiores retornos econômicos.

Há um consenso de que, quando a água não é escassa e a cultura é de alto valor econômico, deve-se compensar a baixa uniformidade de distribuição de água pela aplicação de uma lâmina de irrigação maior que a necessária a cultura para reduzir a área de déficit.

Como os gastos com recursos aumentam com a quantidade de água aplicada e a responsabilidade ambiental justifica um manejo racional da irrigação, pode não ser prudente irrigar com elevado grau de adequação.

A eficiência é um parâmetro muito usado no dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação. Segundo Keller (1984), a eficiência pode ser dividida em dois componentes: uniformidade de distribuição e perdas de água. A uniformidade de distribuição de água é um importante parâmetro a ser determinado para obtenção de melhor eficiência de irrigação. A uniformidade é uma característica que pode ser usada para comparar diferentes sistemas. Um sistema de irrigação que aplica uma lâmina média adequada, porém com pequena uniformidade, certamente propiciará a formação de subáreas irrigadas com excesso de água aplicada e outras com déficit.

Coelho et al. (2002) considera a uniformidade de distribuição um parâmetro de comparação entre sistemas. Dentre dois que distribuíam a mesma lâmina, o mais uniforme será mais eficiente.

Silva et al. (1997), também mencionam que os sistemas com baixa uniformidade

exigem maiores lâminas d'água, para assegurar que a quantidade de água necessária seja distribuída por toda a área, ressaltam que muitos sistemas do tipo pivô central são usados para aplicação de produtos químicos no solo, via água de irrigação; nestes casos a pequena uniformidade de distribuição poderia resultar em danos para as culturas, em função da aplicação excessiva ou deficiente do produto químico.

A determinação do coeficiente de uniformidade é o processo estatístico mais comum para avaliação de sistemas de irrigação por aspersão, sendo que, por convenção, 80% é o valor mínimo aceitável para o desempenho normal do aspersor, segundo Bernardo et al. (2005).

Segundo Coelho (1990), caso os valores coletados sigam uma distribuição normal, então o valor do CUC é igual ao valor do UH (Coeficiente de Hart).

Keller e Bliesner (1990, apud MUNDIM, 1996), apresentam uma compreensão prática das implicações da uniformidade de distribuição de água. Estes autores citam uma combinação de uniformidade de distribuição com área adequadamente irrigada para fornecer a eficiência de distribuição, apresentando as relações em forma de uma tabela, válida para valores de CUC quando a distribuição de água segue um padrão normal.

Segundo Melo (1993), os custos com energia nos sistemas de irrigação representam a maior parte dos custos variáveis, podendo chegar até 70% dependendo do método utilizado. O aspecto energético na irrigação é de grande importância, principalmente em épocas de crise. Em algumas regiões e em determinadas épocas do ano pode até ocorrer sobrecarga do sistema com conseqüências, tais como falhas operacionais decorrentes de corte no fornecimento, entre outras. O principal fator de consumo de energia é o dimensionamento hidráulico dos sistemas de irrigação.

É levando em consideração toda esta discussão e pesquisa dos vários autores citados, que se justifica a utilização do procedimento de ensaio dos equipamentos de irrigação, e para este trabalho o pivô central, buscando entender as relações existentes entre as regiões e as características dos equipamentos com os coeficientes de uniformidade aqui estudados.

5.3 Metodologia e instalação do trabalho

O presente trabalho foi realizado com 70 sistemas de irrigação do tipo pivô central em operação no estado do Rio Grande do Sul, sendo os equipamentos localizados em duas

regiões, região de Santo Augusto; e região de Cruz Alta.

Os sistemas foram avaliados através da metodologia descrita na norma NBR 14244 (1998), que trata sobre a determinação da uniformidade de distribuição de água para pivôs centrais.

Foram utilizados coletores de plástico, da marca Fabrimar, apoiados sobre hastes de 750mm de altura. Foram distribuídas duas linhas radiais de coletores uniformes, com espaçamento regular e constante, do centro do pivô ao extremo da área irrigada. A distância entre a saída do jato do emissor e a borda superior do coletor foi maior que 1,50 m. A distância entre os dois últimos coletores das linhas não ultrapassou a 50 m. Cada coletor tem 80 mm de diâmetro e 102 mm de altura, instalados com a seção de captação a aproximadamente 500 mm da superfície do solo.

Os dados coletados durante o ensaio foram: volume de água após a passagem completa do equipamento sobre as linhas de coletores; velocidade de giro do pivô central; medida de pressão em todo o sistema e consumo de energia do sistema.

Para calcular o coeficiente de uniformidade de distribuição de água em sistemas de irrigação tipo pivô central é usual ponderar as lâminas de água coletadas nos pluviômetros, uma vez que cada coletor representa áreas progressivamente maiores, a partir do ponto do pivô (Heermann e Hein, 1968). O fator de ponderação usado foi a distância de cada coletor até o ponto do pivô.

Sendo V , o volume total de água aplicada na área; V_i , o volume de água aplicada na coroa circular representada pelo coletor i ; A , a área total irrigada, a_i área da coroa circular i ; S , o espaçamento entre coletores; R_i , a distância do coletor i ao ponto do pivô; Y_i , a lâmina de água aplicada no coletor i ; \bar{Y} , a lâmina média de água aplicada na área; e n o número de coletores alinhados desde o ponto do pivô até a extremidade final da área irrigada, foram utilizadas as seguintes relações:

$$Y_i = \frac{V_i}{a_i} = \frac{2 \cdot \pi \cdot S \cdot R_i \cdot Y_i}{2 \cdot \pi \cdot S \cdot R_i} \quad (5.1)$$

$$\bar{Y} = \frac{V}{A} = \frac{\sum_{i=1}^n 2 \cdot \pi \cdot S \cdot R_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^n 2 \cdot \pi \cdot S \cdot R_i} \quad (5.2)$$

$$n\bar{Y} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot S \cdot R_i \cdot Y_i}{2 \cdot \pi \cdot S \cdot R_i} \right) \quad (5.3)$$

Substituindo as Equações 5.1, 5.2 e 5.3 na Equação 5.4.

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - \bar{Y}|}{n \cdot \bar{Y}} \right) \quad (5.4)$$

Sendo:

CUC - coeficiente de uniformidade de Christiansen (%);

Y_i - lâmina de água coletada em ensaios de uniformidade, no i-ésimo coletor (mm);

Y - lâmina média de água coletada (mm);

n - número de observações.

Obtém a equação do coeficiente de uniformidade para pivô central (Heermann e Hein, 1968):

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n R_i \left| Y_i - \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \right|}{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot R_i} \right) \quad (5.5)$$

Sendo:

$$\bar{Y}_p = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (5.6)$$

Sendo \bar{Y}_p a lâmina média de irrigação ponderada pela distância R_i .

O cálculo do CUD (coeficiente de uniformidade de distribuição) foi realizado utilizando-se a lâmina média ponderada de todas as observações (equação 5) e Y_{25} é calculado pela média ponderada das precipitações correspondentes aos 25% da área total menos irrigada, Equação 5.7.

$$CUD = 100 \left(\frac{\bar{Y}_p}{Y_{25}} \right) \quad (5.7)$$

A Tabela 5.1 apresenta a classificação dos sistemas de pivô central quanto ao valor do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen.

Tabela 5.1 – Classificação da uniformidade de distribuição de água em pivô central de acordo com a norma NBR 14244 (1998) da ABNT.

CUC (%)	Classificação
< 80	Ruim
80 a 84	Regular
85 a 89	Boa
> 90	Muito Boa

Em Bernardo et al. (2005), é mostrado que quando se considera uma área adequadamente irrigada de 80% a Eficiência de Distribuição (ED_{80}) é aproximadamente igual ao CUC.

5.4 Resultados e discussão

Na Figura 5.1 estão apresentadas as frequências relativas percentuais dos valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), na Região de Cruz Alta e Santo Augusto.

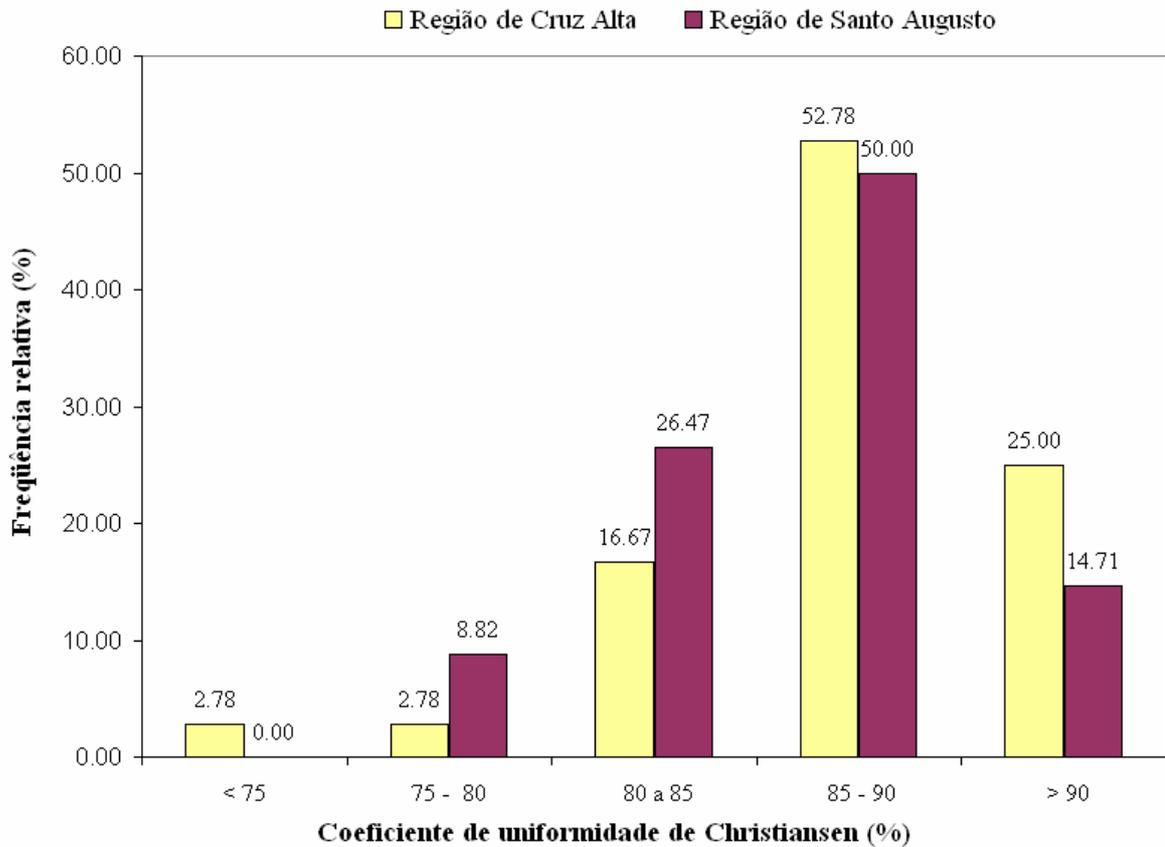


Figura 5.1 – Frequência relativa percentual de ocorrência do CUC dos sistemas de irrigação por pivô central na Região de Cruz Alta e Região de Santo Augusto.

Os valores encontrados para o CUC, na Região de Cruz Alta, variaram de 74,57% a 93,22%, com valor médio igual a 87,40% considerado bom, segundo a norma adotada. Para a Região de Santo Augusto se encontram equipamentos com o CUC variando entre valores de 75,97% a 92,19%, com valor médio igual a 85,89%, também, pelo critério, considerado bom. Contudo, a grande maioria dos valores obtidos do CUC estão abaixo do recomendado por Bernardo et al. (2005), que para pivô central, consideram apropriados valores acima de 90%, quando a cultura apresenta alto valor comercial e sistema radicular pouco desenvolvido.

Considerando a classificação dada pela norma NBR 14244 (1998) quanto ao CUC, na Região de Cruz Alta, foram obtidos seis pivôs entre 80 e 85%, considerados regulares, dezenove pivôs entre 85% e 90% considerados bons, um equipamento foi considerado ruim, um equipamento regular e nove equipamentos muito bons. Para a Região de Santo Augusto, três pivôs apresentaram valores de CUC abaixo de 80%, nove pivôs entre 80 e 85%, dezessete pivôs entre 85 e 90% e cinco pivôs com CUC acima de 90%.

Na Figura 5.2 podem ser visualizados o gráfico do perfil de distribuição das lâminas coletadas ao longo do raio e a lâmina média ponderada, para o pivô avaliado com menor coeficiente de uniformidade de Christiansen encontrado na Região de Cruz Alta.

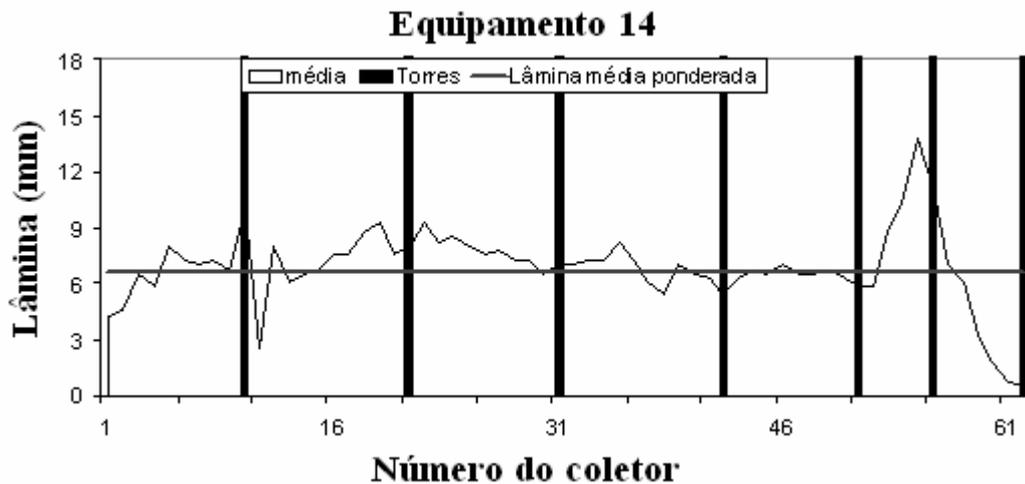


Figura 5.2 – Perfis de distribuição das lâminas coletadas e lâmina média no pivô 14 Região de Cruz Alta.

Quando são visualizados os dados de quantidade de água nos coletores, ao longo da linha de aspersão, tem-se a noção do parâmetro que o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen deve representar. No exemplo da Figura 5.2, o penúltimo vão representa o lance em balanço, tendo um acréscimo de lâmina no mesmo, já o último vão corresponde a área do canhão final, com um decréscimo acentuado de lâmina aplicada.

Na Figura 5.3 estão apresentadas as freqüências relativas percentuais de ocorrência do CUD, na região de Cruz Alta e Santo Augusto.

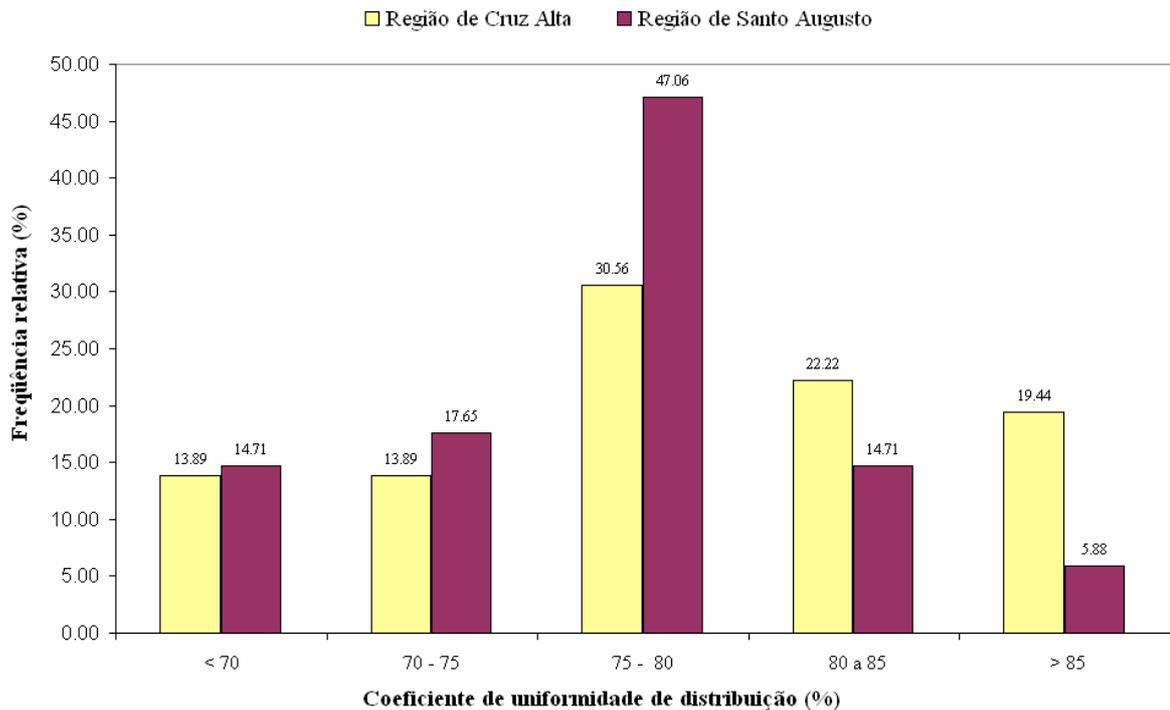


Figura 5.3 – Frequência relativa percentual de ocorrência do CUD, em sistemas de irrigação por pivô central, na Região de Cruz Alta e na Região de Santo Augusto.

Em relação ao CUD, os valores para a Região de Cruz Alta variaram de 60,67% a 87,62%, com valor médio igual a 77,71%. Para a Região de Santo Augusto o CUD variou entre 63,77% e 86,20%, com valor médio igual a 75,98%. Estando os valores médios dentro do recomendado para culturas com sistema radicular de profundidade média, entre 70% e 80%. Para culturas de alto valor econômico e raízes pouco profundas, o valor do CUD deveria estar acima de 80%, segundo Merriam e Keller (1978).

Na Região de Cruz Alta, encontramos cinco pivôs com CUD abaixo de 70%, dezesseis pivôs com CUD entre 70% e 80% e os outros quinze pivôs com CUD acima de 80%. Na região de Santo Augusto encontramos cinco pivôs com CUD abaixo de 70%, vinte e dois pivôs com CUD entre 70% e 80% e os restantes sete pivôs com CUD acima de 80%.

Na Figura 5.4 estão determinados os percentuais de defeitos que foram encontrados nos equipamentos das duas regiões em estudo.

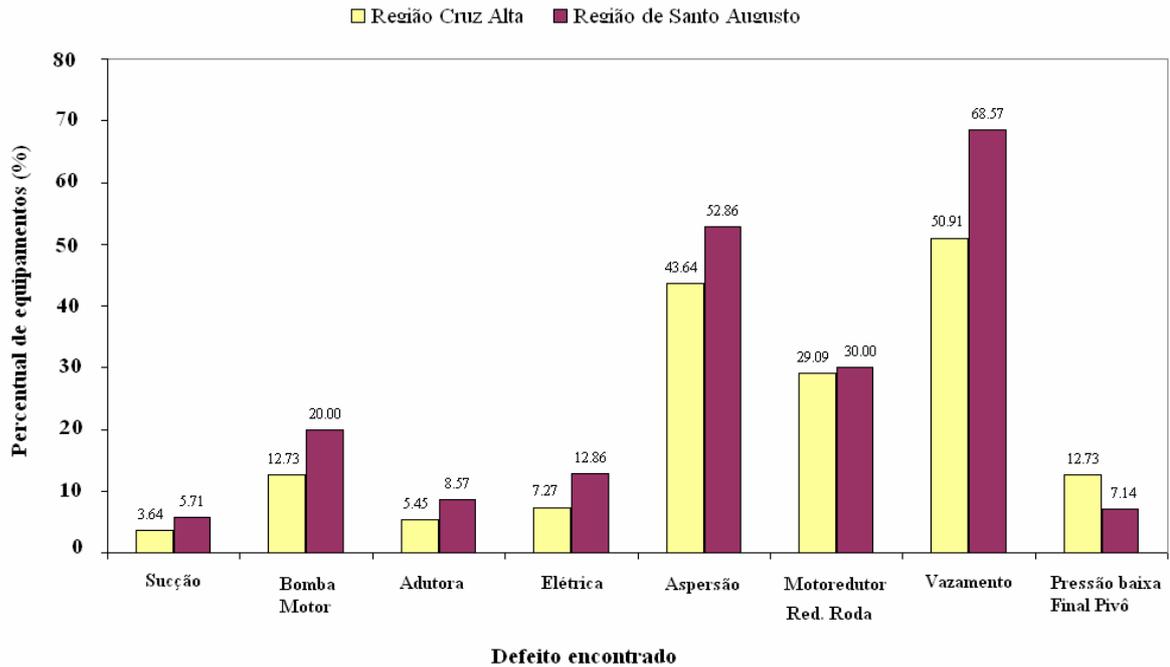


Figura 5.4 – Percentual de defeitos apresentados nos equipamentos na Região de Cruz Alta e na Região de Santo Augusto.

A distribuição dos defeitos, nas duas regiões, foi semelhante. O defeito que teve maior ocorrência na Região de Cruz Alta foi o vazamento, com 50,91% dos equipamentos, seguido de problemas com aspersão com 43,64% dos equipamentos. Na Região de Santo Augusto os mesmos defeitos tiveram maior ocorrência com 68,57% e 52,86% respectivamente.

Estes dados podem ser justificados, em função do produtor não ter a preocupação com estes elementos do equipamento, pois eles não irão fazer com que a irrigação não ocorra, somente que tenha uma menor eficiência.

CAPÍTULO VI

Neste Capítulo são apresentados indicadores de eficiência relacionados aos equipamentos de irrigação por pivô central, testados com os dados disponíveis para cada uma das regiões estudadas. No final do capítulo existe a tentativa de aumentar a confiabilidade dos indicadores e também sugerir melhoria nos mesmos.

6. INDICADORES DE EFICIÊNCIA

6.1 Introdução

As deficiências em projetos de irrigação são encontradas em praticamente todas as regiões, normalmente com desconhecimento de quem os utiliza para produção. Estas deficiências podem contemplar também a instalação e a manutenção dada aos equipamentos, fazendo com que a eficiência de uso do equipamento tenha um valor abaixo do esperado ou do possível, dependendo de suas características.

Barreto et al. (2004) afirma que a implantação de sistemas modernos de irrigação, por si só, não garante alta eficiência global do uso da água nos agroecossistemas. Os projetos são elaborados de acordo com a uniformidade esperada para determinada situação. Quanto maior a eficiência esperada, maior será o investimento necessário no equipamento e cuidados com a operação e manutenção dos mesmos.

Hoje, não existe uma agência de amparo aos consumidores de sistemas de irrigação, para que os mesmos possam, na aquisição, comparar os equipamentos também em seu caráter de eficiência energética e hídrica. Muitos projetistas se valem desta deficiência no mercado para levar ao produtor projetos com um investimento inicial mais econômico, mas menos eficientes em toda a vida útil.

Sob este enfoque do problema, e também com a necessidade da sustentabilidade dos agroecossistemas, existe a necessidade de desenvolver critérios técnicos para os diversos sistemas instalados e para os projetos que estão sendo desenvolvidos.

Considerando a dificuldade de comparação na aquisição de sistemas de irrigação por algum índice de eficiência, as diversas possibilidades de montagem e custo de sistemas de irrigação, a mudança dos índices de eficiência com o tempo de uso do equipamento. Define-se fundamental estudar e quantificar parâmetros técnicos que possam ser considerados na caracterização energética dos equipamentos.

6.2 Eficiência e consumo de energia em irrigação

A eficiência total da irrigação relaciona várias eficiências fracionadas, por secção do equipamento e características determinadas, como: eficiência de condução, que é a eficiência de condução da água desde o bombeamento até o ponto de entrega na parcela agrícola; eficiência de aplicação, que relaciona o volume de água armazenado no solo com o volume de água aplicado na área; eficiência de irrigação, a relação entre o volume de água armazenado na zona de raízes e o volume infiltrado através da superfície do solo e; eficiência de distribuição, a redistribuição da água infiltrada no solo, a qualidade da distribuição da água. Exemplificado pela Figura 6.1.

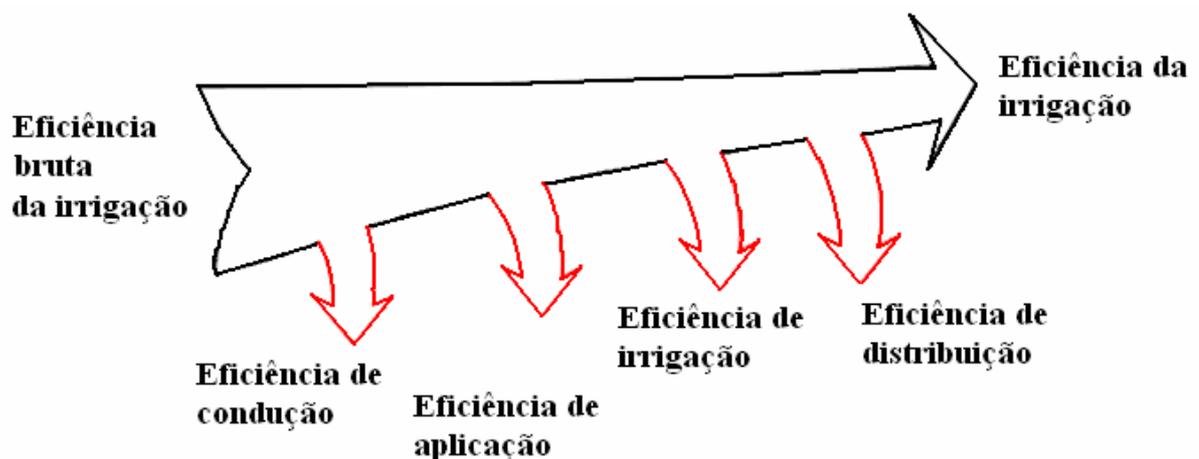


Figura 6.1 – Esquema da perda de eficiência pelo sistema de irrigação por pivô central.

Alguns autores, como Barreto et al. (2004) citam a eficiência global do uso da água, sendo esta a relação entre a massa do produto agrícola produzido e o volume de água aplicado no campo.

Segundo Alfaro (2008) em “On-farm water and energy use for irrigation in Latin America”, a modernização de sistemas de irrigação nos países desenvolvidos implicam em baixar o requerimento de energia.

Azevedo et al. (1999), considerando a água bombeada que não alcança a área irrigada, avaliou o desperdício de energia em um sistema de aspersão de alta pressão em função dos fatores climáticos. Em uma propriedade da Usina Sapucaia S.A, no município de Campos dos Goytacazes, RJ, obteve perdas de energia de até 14,67 kWh ha⁻¹ devido, principalmente, umidade relativa do ar, a velocidade do vento, a pressão de serviço do aspersor e a radiação solar.

Hill (1999) relata os mais importantes itens a serem considerados no uso de energia na irrigação, que são: vida útil da bomba; pressão de operação dos aspersores; perda hidráulica por fricção; perdas secundárias nas válvulas e juntas; diferenças de elevação na propriedade; requerimento de potência na bomba; demanda consumida pela bomba; água de irrigação necessária à cultura; eficiência de aplicação e; período de horas de operação.

Quando deseja alterar a potência consumida de um sistema de irrigação, pode se trabalhar a diminuição da altura manométrica total do sistema e ou da vazão do sistema, e se possível a ampliação do rendimento do conjunto motobomba.

Muitos algoritmos são criados para minimizarem o uso da energia ou avaliarem as melhorias implementadas, como o trabalho de Williams et al. (1988), que utilizaram o ICEASE (Irrigation Cost Estimator and System Evaluator), programa desenvolvido pela necessidade de conduzir avaliações econômicas para o ajuste de sistemas de irrigação e gerenciar técnicas que melhorem o uso da água de irrigação.

Ainda, segundo os autores, o ICEASE utiliza quatro itens para avaliar economicamente as melhorias nos bombeamentos, ou no modo em que os sistemas são usados, que são: 1 – Avaliação de reparos ou substituições de bombas; 2 – Avaliação da troca de unidades de força por uma diferente fonte de força; 3 – Estimar as mudanças no custo de operação causadas pela queda da lâmina de água e/ou declínio da eficiência da bomba; 4 – Estimar os custos de operação por diferentes níveis de aplicação de água.

Para diminuir a altura manométrica total, deve-se encontrar uma área com menor desnível geométrico, reduzir as perdas de pressão nas tubulações e conexões hidráulicas e a utilizar aspersores de menor pressão de trabalho possíveis.

A vazão necessária pelo sistema pode ser diminuída com o aumento da eficiência total de irrigação e, melhor manejo da água e do solo na área a ser irrigada.

Segundo Lima (2008), outro potencial elemento associado ao consumo de energia nos sistemas de irrigação é o motor elétrico. Apesar do desenvolvimento tecnológico e elevado rendimento, a representatividade na matriz energética destes equipamentos sugere que ganhos na eficiência em sua construção ou em sua operação podem trazer significativos benefícios à economia de energia no País.

No Brasil, diante da crise no abastecimento de energia elétrica e, com o objetivo de garantir a oferta de produtos eficientes no mercado, foi sancionada em 17 de outubro de 2001, a Lei 10.295 (Lei de Eficiência Energética, Brasil, 2001a) cujo Decreto de regulamentação, 4.059 foi aprovado em 19 de dezembro de 2001 (Brasil, 2001b). O motor elétrico de indução trifásico foi o primeiro equipamento a ter estabelecido valores mínimos de rendimento, (Brasil, 2002b).

Considerando a operação do motor, sua eficiência é dependente da rede de alimentação e do carregamento desenvolvido. Pillay (1997) comparou a variação do rendimento entre motores normais e de alto rendimento acionando bombas centrífugas sob condição de tensão superior a nominal.

Motores de alto rendimento funcionam com maior velocidade e, conseqüentemente, desenvolvem maior vazão e absorvem maior potência quando acionam bombas centrífugas. Na avaliação realizada, o autor observou que a diferença entre os rendimentos, para um motor de 100 hp, IV pólos, reduziu de 3,3 para 0,93%, uma vez que a velocidade do motor de alto rendimento era 15 rpm maior.

Para Yung (2007), o desbalanceamento da tensão eleva as perdas nos motores. Na avaliação realizada, 3% de diferença entre as tensões, como aparece em 30% das instalações nos Estados Unidos, provocou variações de 18 a 30% entre as correntes, aumento na temperatura em até 50° C e redução do rendimento do motor em dois pontos percentuais.

O carregamento do motor tem influência sobre seu rendimento em operação, uma vez que a eficiência da máquina, geralmente, é menor para potências menores que a nominal. A partir das auditorias energéticas realizadas na fábrica de ração da Universidade Federal de Viçosa e na empresa frigorífica Pif Paf Alimentos, Lopes et al. (2006) observaram que 60,5% dos motores operavam com índice e carregamento abaixo de 50%, trazendo retorno financeiro a substituição de 66,7% destas máquinas avaliadas.

Em algumas situações de projeto, ao longo da vida útil do equipamento, surgem novas tecnologias que o tornam mais viável e atrativo, por este motivo os sistemas instalados devem estar em constante avaliação e atualização.

Carvalho et al. (2000) estudou a o uso de inversores de frequência para redução da vazão em sistemas de irrigação, concluíram que houve uma redução no consumo de energia em relação aos métodos usuais de redução de vazão.

Para Gomes (2004), a metodologia mais adequada para obter um projeto eficiente é através da introdução do critério econômico, de forma a se determinar a alternativa de projeto que minimize o custo de implantação e de operação ao longo da vida útil do sistema.

Zocoler (2003) apresenta um estudo prático para a determinação da melhor alternativa econômica considerando os custos de implantação e operação ao longo da vida útil do sistema de irrigação por pivô central. Gomes (2004), por sua vez, propõe a utilização do método baseado na Variação Linear dos Custos das Tubulações e o Método das Tentativas.

Desta forma, projetar e manter um sistema de irrigação sob a real necessidade de água da cultura, garantindo elevada eficiência de aplicação com baixa perda de carga são fatores importantes para a eficiência na irrigação. O motor e a bomba, sobretudo, são os elementos propulsores do sistema, de forma que, uma vez responsáveis pela transformação da energia elétrica em hidráulica, podem comprometer o rendimento total do sistema, devido as perdas origem construtivas e de operação nas condições de funcionamento no campo.

Segundo Lima (2008), deve-se detalhar o sistema de irrigação e analisar a influência de cada um dos elementos do sistema de irrigação na composição do rendimento total. Também relacionar a energia consumida ao volume de água útil, ou seja, disponível na zona radicular da planta.

6.3 Material e métodos

Com a finalidade de determinar os indicadores de eficiência para projetos de irrigação por pivô central, será utilizado a metodologia e estudo dos indicadores propostos por Lima (2008).

Segundo o método, a eficiência da irrigação deve ser composta de indicadores agrícolas, os coeficientes de uniformidade, e indicadores energéticos. A proposição reforça o cálculo de consumos específicos em cada um dos componentes do sistema de irrigação.

Em primeiro momento o equipamento de irrigação é fracionado, e calculado as potências consumidas em cada um deles.

Potência dissipada no motor e bomba:

Pela metodologia, o rendimento do motor pode ser estimado pela curva do índice de carregamento do motor fornecido pelo fabricante, em que na utilização dos catálogos dos motores são extraídos três pontos, 50, 75 e 100% da carga, o rendimento é relacionado ao carregamento do motor. Estes pontos podem ainda ser aproximados a uma curva, de forma que o rendimento possa ser obtido para a carga desejada.

Deve-se observar que os motores estão condicionados a diversos índices de carregamento durante o funcionamento do equipamento, quanto maior for a diferença entre o ponto mais alto e o mais baixo da área irrigada, maior será a variação do índice de carregamento do motor.

Determinada a eficiência do motor, é possível se obter a potência fornecida no eixo por meio da Equação 6.1.

$$P_{eixo} = P_{nom} \cdot \eta_{motor} \quad (6.1)$$

Onde:

P_{eixo} – potência no eixo do motor (kW);

P_{nom} – potência nominal do motor (kW);

η_{motor} – rendimento do motor (decimal).

Considerando o rendimento unitário nos acoplamentos diretos entre motores e bombas e considerando que o rendimento da bomba depende do ponto de funcionamento da mesma, a potência hidráulica da bomba é o trabalho que a bomba realiza para elevar uma vazão de água a uma altura manométrica determinada, conforme a Equação 6.2.

$$P_H = \gamma \cdot Q_s \cdot H_m \quad (6.2)$$

Sendo que:

P_H – potência hidráulica (kW);

γ – densidade da água ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$);

Q_s – vazão bombeada no sistema ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

H_m – altura manométrica fornecida pela bomba (m).

Segundo Carvalho (2003), a bomba apresenta um rendimento variável com as condições de operação, podendo ser maior ou menor conforme as perdas que irão ocorrer.

Para o trabalho, foi realizado levantamento do rendimento de cada bomba pelo catálogo do fabricante, sendo que a vazão utilizada foi estimada pelo teste de uniformidade do equipamento, e a pressão pela leitura do manômetro na bomba no momento do teste, onde a potência elétrica consumida pela bomba pode ser calculada pela Equação 6.3.

$$P_{Ed} = P_H \cdot \eta_b \quad (6.3)$$

Sendo:

P_{Ed} – potência elétrica dissipada na bomba (kW);

P_H – potência hidráulica medida no elemento (kW);

η_B – rendimento da bomba (decimal).

Os valores de rendimento do conjunto motobomba também podem ser obtidos com a tabela de enquadramento de bomba e rendimento, Figura 6.2. A velocidade específica de cada conjunto motobomba deve ser calculada utilizando a relação entre pressão e vazão.

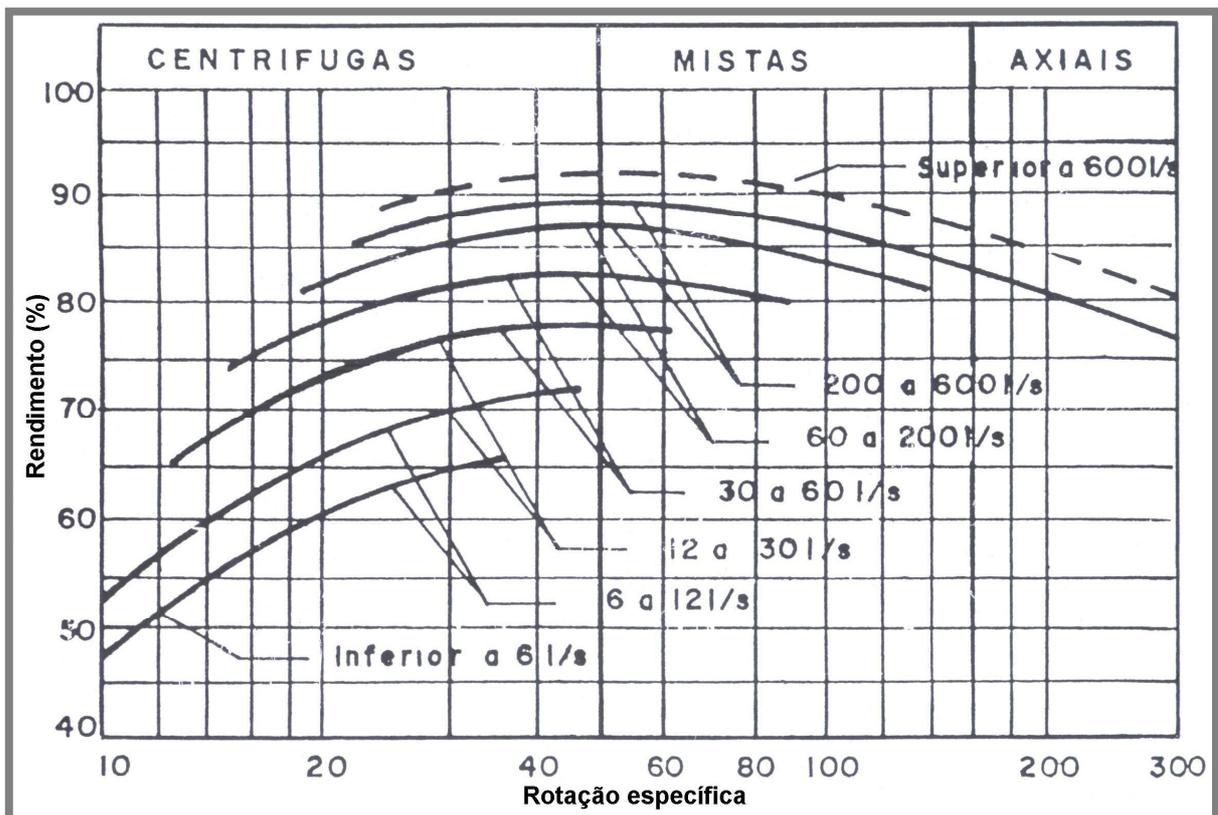


Figura 6.2 – Rendimento de bombas de acordo com sua rotação específica.

O indicador de eficiência energética do conjunto motor e bomba, proposto em IWA (2000), possibilita determinar a potência por metro cúbico para elevar uma altura manométrica de 100 m, conforme apresentado na Equação 6.4.

$$C_{EN} = \frac{P_{entrada}}{Q_S \cdot H_m} \cdot 100 \quad (6.4)$$

Sendo:

C_{EN} – consumo de energia normalizado (kW.h.m⁻³.100m⁻¹);

$P_{entrada}$ – potência elétrica medida no motor (kW);

Q_S – vazão de bombeamento no sistema (m³.h⁻¹);

H_m – altura manométrica da bomba (m).

Potência dissipada na tubulação de sucção e adução:

A potência dissipada na tubulação de sucção e adutora, considerando os pontos determinados pelos manômetros, pode ser obtida através da Equação 6.5.

$$P_d = \gamma \cdot Q_S \cdot \Delta h \quad (6.5)$$

Onde:

P_d – potência dissipada no elemento (kW);

γ – peso específico da água (kN.m⁻³);

Q_S – vazão bombeada pelo sistema (m³.s⁻¹);

Δh – perda de carga no elemento (mca).

A potência P_d obtida da Equação 6.5 refere-se à potência hidráulica. Assim, para a obtenção da potência elétrica associada às perdas na sucção, adutora ou linha lateral, é necessário dividir o valor obtido pelo rendimento do motor e da bomba (Equação 6.6).

$$P_{Ed} = \frac{P_d}{\eta_m \cdot \eta_b} \quad (6.6)$$

Sendo:

P_{Ed} – potência elétrica dissipada no elemento (kW);

P_d – potência hidráulica dissipada no elemento (kW);

η_m – rendimento do motor (decimal);

η_B – rendimento da bomba (decimal).

O indicador de eficiência energética associado à adutora e a tubulação de sucção, constitui-se da perda de carga por 100 m, calculada pela Equação 6.7. A perda de carga por 100 m (Δh_{100}), serão consideradas as perdas distribuídas ao longo da tubulação e as perdas localizadas, pois se constitui da condição necessária para a comparação com valores obtidos no ensaio.

$$\Delta h_{100} = \frac{\Delta h_{1-2}}{l} \cdot 100 \quad (6.7)$$

Sendo:

Δh_{100} – perda de carga em 100 m (mca/100m);

Δh_{1-2} – perda de carga entre os ponto 1 e 2 (mca);

l – comprimento da tubulação (m).

O indicador de eficiência energética proposto para tubulação determina a potência por metro cúbico para deslocar o fluido em um quilômetro de tubulação, conforme apresentado na Equação 6.8.

$$C_{ENT} = \frac{P_d}{3,6 \cdot l \cdot Q_s} \quad (6.8)$$

Sendo:

C_{ENT} – Consumo específico normalizado na tubulação ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{km}^{-1}$);

P_d – Potência dissipada na tubulação (kW);

l – Comprimento da tubulação (m);

Q_s – Vazão bombeada pelo sistema ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Para estimar as perdas de potência em função da escolha adotada do diâmetro da adutora, foi calculado um diâmetro econômico utilizando a Equação de Bresse (Equação 6.9), com coeficiente “K” de 0,8, indicando pela Tabela 6.1, apresentada por Colombo (2003), uma velocidade de escoamento de $2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$D = K \cdot \sqrt{Q_s} \quad (6.9)$$

Sendo:

D – diâmetro (m);

K – coeficiente variável;

Q_S – vazão bombeada pelo sistema ($m^3.s^{-1}$).

Tabela 6.1 – Valores do coeficiente “K” da fórmula de Bresse para diversos valores de velocidade de escoamento.

V($m.s^{-1}$)	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4
K	1,45	1,26	1,13	1,03	0,89	0,80	0,73

Potência dissipada na linha lateral:

A energia dissipada ao longo da linha lateral é obtida de forma similar à tubulação de adução e sucção. Entretanto, em função da saída de uma determinada vazão em cada aspersor, e também em função da mudança de diâmetro que ocorre ao longo da tubulação, devem ser efetuados ajustes.

A perda de carga na tubulação da linha lateral pode ser calculada considerando os segmentos entre cada saída de água na tubulação, onde permanece constante a vazão e o diâmetro da tubulação, utilizando a equação de perda de carga universal.

A Equação 6.10, descrita por Colombo (2003), foi utilizada para o cálculo da perda de carga ao longo da tubulação da linha lateral.

$$Hf_{rs} = \int_{s=0}^{s=rs} \frac{C \cdot Q_{rs}^m}{D_{rs}^n} ds \quad (6.10)$$

Sendo:

Hf_{rs} – perda de carga ao longo da tubulação da linha lateral (mca);

C – coeficiente de Hazen-Williams (adimensional);

D – diâmetro da tubulação (m);

Q_S – vazão bombeada pelo sistema ($m^3.s^{-1}$).

Para propiciar melhor uniformidade na distribuição de água, a pressão em todos os bocais dos aspersores deve ser constante e igual ao valor indicado no projeto. Para isso, o sistema hidráulico deve ser projetado para a condição mais desfavorável de topografia e perda de carga.

Potência dissipada na aspersão:

A aplicação de água em um pivô central é realizada ao longo da tubulação aérea pelos aspersores (linha lateral). A pressão necessária no aspersor não é suficiente para caracterizá-lo quanto à sua eficiência energética, sendo necessário avaliá-lo quanto a eficiência de aplicação. A perda de água, juntamente com a energia necessária para levá-la desde a fonte até a área a ser irrigada, está associada à lâmina não disponível na zona radicular da cultura, devido à evaporação e deriva pelo vento, ao escoamento fora da parcela irrigada e a percolação profunda.

A eficiência de aplicação relaciona a vazão útil às culturas (Q_{PA}) com a vazão total bombeada pelo sistema (Q_S). Desta forma, é possível determinar a Potência Dissipada pelos Aspersores (Equação 6.11) e Consumo Específico nos Aspersores (Equação 6.12). A Equação 6.11 foi alterada da metodologia original em razão da concepção de potência dissipada na linha lateral, sendo relacionada a altura manométrica que está associada ao sistema, descontada a altura geométrica do ponto central do equipamento ao ponto mais elevado da área irrigada.

$$P_{Dasp} = \gamma \cdot Q_S \cdot (Hm_{centro} - Hg_{pivo}) \cdot EA_{80} \quad (6.11)$$

$$C_{Easp} = \frac{P_{Dasp}}{Q_S \cdot EA_{80} \cdot 3,6} \quad (6.12)$$

Sendo:

P_{Dasp} – potência dissipada nos aspersores (kW);

γ – peso específico da água ($kN \cdot m^{-3}$);

Q_S – vazão bombeada pelo sistema ($m^3 \cdot s^{-1}$);

Hm_{centro} – altura manométrica fornecida pela bomba (mca);

EA_{80} – eficiência de aplicação para 80% da área adequadamente irrigada (decimal);

Hg_{pivo} – altura geométrica do centro do pivô a parte mais alta da área (mca);

C_{Easp} – consumo específico nos aspersores ($kW \cdot h \cdot mm^{-1} \cdot ha^{-1}$).

Verifica-se, a partir das Equações 6.11 e 6.12, que a economia de energia no aspersor é determinada pela Eficiência de Aplicação EA_{80} e esta, por sua vez, pode ser determinada pelo Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, uma vez estabelecida uma área adequadamente irrigada. Assim, a utilização de um sistema em baixa pressão e com alto CUC pode aumentar a eficiência energética do sistema.

Eficiência do sistema:

Determinada a potência associada a cada um dos elementos do sistema de irrigação pivô central, é necessária sua potência útil para se determinar a eficiência do sistema. É utilizada a potência hidráulica útil do sistema de irrigação calculada pela vazão útil e o desnível geométrico h_g de bombeamento (Equação 6.13).

$$P_U = \gamma \cdot Q_S \cdot \frac{EA_{80}}{100} \cdot h_g \quad (6.13)$$

Sendo:

P_U – potência útil do sistema de irrigação (kW);

h_g – altura geométrica de recalque (m);

$Q_S \cdot \frac{EA_{80}}{100}$ – vazão útil do sistema de irrigação ($m^3 \cdot s^{-1}$);

Q_S – vazão bombeada pelo sistema ($m^3 \cdot s^{-1}$);

EA_{80} – Eficiência de Aplicação para 80% da área adequadamente irrigada (decimal).

A avaliação completa do sistema passa da forma atualmente utilizada, Equação 6.14, para o Consumo Específico Normalizado na Irrigação e Eficiência de Irrigação conforme Equações 6.15 a 6.17.

$$C_E = \frac{P_{entrada}}{Q_S} \quad (6.14)$$

$$C_{ENI} = \frac{P_{entrada} \cdot 100}{Q_S \cdot EA_{80} \cdot h_g \cdot 3,6} \quad (6.15)$$

$$E_I = \frac{P_U}{P_{entrada}} \cdot 100 \quad (6.16)$$

$$E_I = EA_{80} \cdot \frac{h_g}{H_m} \cdot \eta_b \cdot \eta_m \quad (6.17)$$

Sendo:

C_E – consumo específico (kW.h.m⁻³);

$P_{entrada}$ – potência de entrada (kW);

C_{ENI} – consumo específico normalizado na irrigação (kW.h.mm⁻¹.ha⁻¹.100m⁻¹);

H_m – altura manométrica do sistema (m);

E_I – eficiência de irrigação (%);

η_B – rendimento da bomba (decimal);

η_m – rendimento do motor (decimal).

O Consumo Específico Normalizado na Irrigação (C_{ENI}), trás como vantagem a comparabilidade entre sistemas diferentes. Enquanto o Consumo Específico atualmente utilizado, dependente da altura geométrica, das perdas de carga e da vazão bruta não permite comparar diferentes sistemas, o indicador utilizado normaliza os valores para 100 metros de altura geométrica e utiliza a vazão útil ao sistema.

O rendimento ou Eficiência de Irrigação, determinado pela relação entre a potência hidráulica útil à irrigação e a potência elétrica de entrada, determina a porcentagem de energia que é aproveitada no sistema de irrigação.

Ainda, os indicadores Consumo Específico Normalizado na Irrigação e a Eficiência de irrigação possibilitam associar o indicador agrícola Eficiência de Aplicação ao consumo de energia elétrica do sistema.

6.4 Apresentação e discussão de resultados

Para a avaliação energética dos equipamentos, foram necessários dados das fichas técnicas dos equipamentos. Foram selecionados alguns equipamentos, do montante de equipamentos avaliados e, somente 39 deles puderam participar desta etapa do trabalho, sendo 25 equipamentos da região de Cruz Alta e 14 da região de Santo Augusto. Os dados serão apresentados em cada fração do equipamento.

Conjunto motor e bomba

Na avaliação de um sistema de irrigação, o rendimento do conjunto motor e bomba é de grande importância devido à representatividade da energia dissipada neste elemento. Foram extraídos os dados de rendimento das bombas pelas curvas do fabricante, cada bomba para uma determinada vazão e pressão assume uma curva de rendimento, e cada modelo de bomba tem sua curva de máximo rendimento. Cabe ao projetista, no momento da escolha da bomba, indicar o modelo que mais se aproxime do melhor rendimento.

Tabela 6.2 – Rendimento nos conjuntos motor e bomba dos pivôs ensaiados na Região de Cruz Alta

Pivô	Potência elétrica de entrada medida (kW)	Vazão (m ³ .h ⁻¹)	Hm (mca)	Potência hidráulica de saída (kW)	Potência dissipada no motor e bomba (kW)	Rendimento da bomba (%)	
REGIÃO DE CRUZ ALTA	1	30,00	107,00	64,00	28,36	9,71	70,50
	2	96,00	354,30	101,84	140,13	41,84	74,70
	3	86,10	241,90	109,50	104,93	32,78	74,10
	4	106,20	218,20	117,00	97,78	28,24	75,50
	5		308,96	118,00	137,80	38,49	74,30
	6	204,00	371,08	130,00	181,17	49,76	77,00
	7	118,50	238,40	112,00	101,73	29,00	75,90
	8		393,50	124,03	173,50	40,55	79,00
	9	128,70	266,20	87,18	88,54	25,32	75,40
	10	130,20	327,40	97,47	119,68	32,75	76,70
	11		343,08	105,00	131,38	33,25	77,00
	12		355,50	79,11	104,06	27,45	75,90
	13	62,10	505,80	75,24	136,30	32,63	81,00
	14	170,40	467,90	95,92	164,70	42,44	78,80
	15	76,20	206,90	90,00	73,45	22,73	73,70
	16	130,20	566,70	114,69	263,32	86,27	71,00
	17	94,20	210,10	102,21	80,66	22,16	77,40
	18	118,80	289,60	92,09	107,11	34,47	72,00
	19	152,40	413,70	102,11	154,63	39,56	79,00
	20	115,80	263,30	106,00	112,25	36,22	71,90
	21		255,90	134,00	135,63	42,22	71,00
	22	160,20	468,00	80,75	144,56	41,62	76,00
	23	138,30	281,40	101,09	136,15	58,66	60,10
	24	135,90	132,90	114,00	75,14	33,87	58,00
	25		288,00	102,00	110,14	30,12	74,90

Tabela 6.3 – Rendimento nos conjuntos motor e bomba dos pivôs ensaiados na Região de Santo Augusto.

Pivô	Potência elétrica de entrada medida (kW)	Vazão (m ³ .h ⁻¹)	Hm (mca)	Potência hidráulica de saída (kW)	Potência dissipada no motor e bomba (kW)	Rendimento da bomba (%)	
REGIÃO DE SANTO AUGUSTO	26	41,60	262,00	88,89	90,28	26,84	74,60
	27	38,00	504,10	117,51	206,39	45,02	83,00
	28	74,30	544,90	107,80	212,33	52,32	80,00
	29	40,60	265,46	118,99	129,80	43,76	70,00
	30		292,43	97,50	105,91	28,25	75,60
	31	78,50	485,30	124,96	219,21	54,01	80,00
	32	33,50	233,35	101,00	90,51	26,31	75,70
	33	39,40	235,89	117,15	106,98	31,70	74,70
	34		416,61	132,00	197,24	47,43	78,30
	35	21,20	148,70	99,00	60,13	20,03	72,10
	36	40,00	245,70	116,97	110,37	32,08	75,30
	37	87,20	413,00	130,67	201,08	54,07	77,20
	38		399,60	115,00	163,36	38,18	79,00
39	60,10	338,20	135,00	169,89	45,52	76,90	

Pode-se observar a falta de alguns valores de potência elétrica medida, isto ocorreu em função da falta de condição técnica de efetuar a medição em campo.

A Região de Cruz Alta apresenta uma média de rendimento medido na bomba de 74,03%, com desvio padrão de 5,26%; a Região de Santo Augusto apresenta 76,60% de rendimento medido na bomba, com desvio padrão de 3,37%. Pode se verificar que os rendimentos estão acima de 70,00%, o que pode ser considerado bom para alguns projetistas.

Seguem, na Figura 6.3, os dados da Tabela 6.2, Região de Cruz Alta, expressos de uma maneira diferente para melhor visualização; e na Figura 6.4 os dados da Tabela 6.3 da Região da Região de Santo Augusto.

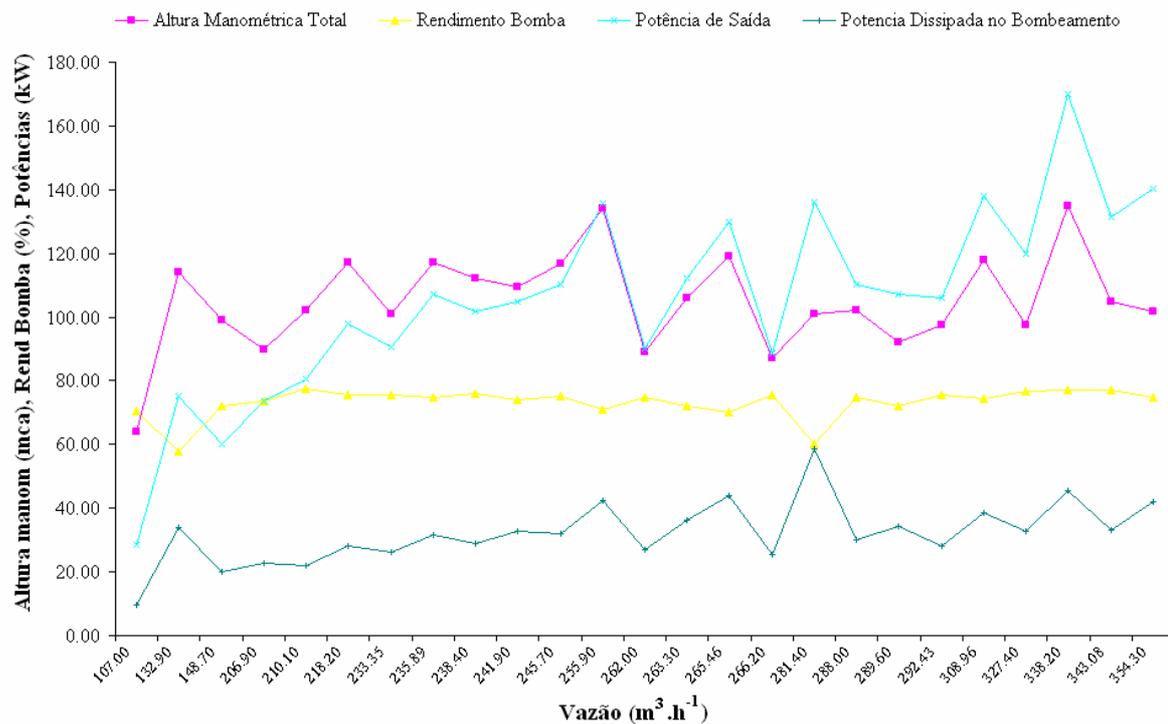


Figura 6.3 – Curvas de rendimento, altura manométrica e potência pela vazão nos conjuntos motor e bomba ensaiados na Região de Cruz Alta

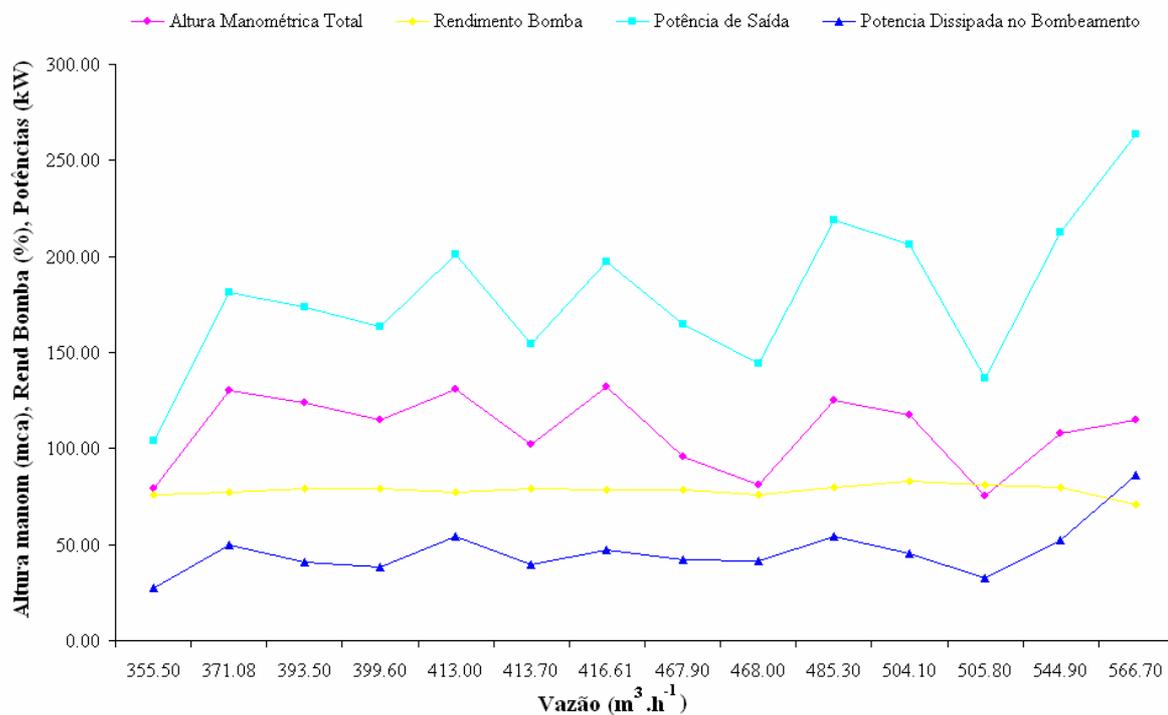


Figura 6.4 – Curvas de rendimento, altura manométrica e potência pela vazão nos conjuntos motor e bomba ensaiados na Região de Santo Augusto

Os rendimentos dos conjuntos motobomba podem ser melhores observados quando associados em um mesmo gráfico (Figura 6.3 e Figura 6.4). Na região de Cruz Alta dois equipamentos apresentam rendimentos abaixo de 65%, indicando um ponto a ser melhorado no equipamento. Nos dados avaliados da Região de Santo Augusto não foi encontrado nenhum equipamento trabalhando com um rendimento abaixo de 70%.

Segue a Tabela 6.4 e a Tabela 6.5 com os valores de rendimento máximo esperados para os bombeamentos, nas duas Regiões, e rendimentos encontrados nas bombas utilizadas.

Tabela 6.4 – Rendimentos dos conjuntos motobomba máximos e aqueles encontrados nos equipamentos na Região de Cruz Alta - RS

Pivô	Velocidade específica	Rendimento máximo estimado (%)	Rendimento obtido pela curva da bomba (%)	Desvio entre os rendimentos (%)	Potencial de redução de potência em função do rendimento (cv)	
REGIÃO DE CRUZ ALTA	1	21,22	70,50	74,26	5,06	-1,64
	2	16,93	74,70	79,22	5,70	-10,01
	3	30,83	74,10	81,66	9,26	-12,54
	4	26,92	75,50	80,42	6,12	-7,32
	5	22,62	74,30	80,81	8,06	-12,98
	6	30,95	77,00	82,76	6,96	-14,04
	7	29,74	75,90	81,39	6,74	-8,78
	8	14,95	79,00	77,69	-1,69	3,58
	9	34,63	75,40	81,43	7,40	-7,03
	10	27,63	76,70	82,20	6,69	-9,66
	11	23,59	77,00	80,66	4,54	-5,73
	12	21,58	75,90	81,77	7,18	-10,72
	13	27,80	81,00	84,32	3,93	-8,06
	14	20,08	78,80	81,67	3,52	-7,09
	15	22,17	73,70	78,57	6,19	-4,91
	16	17,26	71,00	80,11	11,38	-29,41
	17	22,31	77,40	79,65	2,82	-2,97
	18	17,07	72,00	78,83	8,66	-12,47
	19	19,76	79,00	81,71	3,32	-7,56
	20	23,42	71,90	80,62	10,82	-14,77
	21	19,65	71,00	79,43	10,61	-18,54
	22	35,79	76,00	83,77	9,27	-14,17
	23	13,36	60,10	73,48	18,21	-24,31
	24	19,97	58,00	74,81	22,47	-18,05
	25	32,16	74,90	81,67	8,29	-10,12

Tabela 6.5 – Rendimentos dos conjuntos motobomba máximos e aqueles encontrados nos equipamentos na Região de Santo Augusto - RS

Pivô	Velocidade específica	Rendimento máximo estimado (%)	Rendimento obtido pela curva da bomba (%)	Desvio entre os rendimentos (%)	Potencial de redução de potência em função do rendimento (cv)	
REGIÃO DE SANTO AUGUSTO	26	17,22	74,60	78,79	5,32	-6,89
	27	18,52	83,00	81,32	-2,06	5,57
	28	18,77	80,00	81,19	1,46	-3,40
	29	32,94	70,00	82,89	15,55	-31,32
	30	27,12	75,60	81,99	7,79	-11,01
	31	16,67	80,00	79,87	-0,16	0,44
	32	30,19	75,70	80,84	6,36	-6,61
	33	29,07	74,70	81,41	8,25	-11,66
	34	36,11	78,30	84,27	7,09	-19,89
	35	19,69	72,10	77,15	6,55	-5,31
	36	30,04	75,30	81,79	7,94	-11,85
	37	35,42	77,20	84,06	8,16	-21,79
	38	26,80	79,00	82,76	4,55	-9,07
	39	29,80	76,90	82,57	6,87	-14,14

Na Região de Cruz Alta foram encontrados 24% dos equipamentos com menos de 5% de discrepância entre o máximo de rendimento, calculado pela velocidade específica e pela vazão e pressão de trabalho; 56% encontram-se entre 5 e 10% e 20% dos equipamentos estão com discrepância maior que 10%.

Na Região de Santo Augusto, 28% dos equipamentos estão com até 5% de discrepância, 64% dos equipamentos encontram-se entre 5 e 10% e 7% encontram-se com uma discrepância maior que 10%.

Foram encontrados dois equipamentos na Região de Santo Augusto e um na Região de Cruz Alta sem diferença entre o rendimento máximo possível e o rendimento apresentado pela bomba.

O potencial de redução de potência apresentado somente com a mudança de rendimento nas bombas chega a um máximo de 31,32 cv no equipamento 29 da Região de Santo Augusto.

Tubulação de adução e sucção

Considerando a inexistência de manômetros na tubulação de sucção, a altura manométrica nesta tubulação foi obtida por meio de cálculos. Foram levantados os desníveis geométricos da tubulação de sucção.

A avaliação da adutora e linha de pressão foi realizada a partir das características e condições de instalação. Quase na totalidade, os sistemas de irrigação possuem um manômetro na saída da bomba e outro no início da tubulação aérea. Os desníveis geométricos utilizados nesta etapa do trabalho foram extraídos das fichas técnicas dos equipamentos.

Tabela 6.6 – Indicadores de eficiência energética na adutora dos pivôs ensaiados

Pivô	Perda de carga (mca)	Indicador de eficiência		Potência elétrica (kw)	Perda de carga calculada (mca)	Variação da perda de carga (%)	
		Δh_{100} (mca)	C_{ENT} ($\text{kwh.m}^{-3}.\text{Km}^{-1}$)				
REGIÃO DE CRUZ ALTA	1	4,5	1,475	0,06	1,99	6,770	-33,53
	2	11	1,028	0,04	15,14	18,126	-39,31
	3	20,37	1,269	0,05	19,52	13,411	51,89
	4	13	2,941	0,11	10,86	9,045	43,73
	5	2	0,252	0,01	2,34	10,451	-80,86
	6	3	0,398	0,01	4,18	13,915	-78,44
	7	22	3,022	0,12	19,98	17,552	25,34
	8	12	1,548	0,06	16,79	15,945	-24,74
	9	35	1,594	0,06	35,54	21,908	59,76
	10	10	1,678	0,06	12,28	8,722	14,65
	11	4	0,485	0,02	5,01	13,167	-69,62
	12	19	2,603	0,10	24,99	12,444	52,69
	13	16	2,198	0,08	28,98	9,812	63,06
	14	10	1,484	0,05	17,17	3,712	169,41
	15	11	2,529	0,10	8,98	8,067	36,35
	16	11	1,254	0,05	25,26	6,887	59,72
	17	16	2,893	0,11	12,63	10,551	51,65
	18	6	1,111	0,04	6,98	6,297	-4,72
	19	45	5,929	0,22	68,15	17,133	162,65
	20	42	3,624	0,15	44,48	11,330	270,70
	21	24	1,258	0,05	24,29	17,694	35,64
	22	17	2,225	0,09	30,43	64,242	-73,54
	23	10	1,368	0,07	13,47	15,063	-33,61
	24	22	3,077	0,15	14,50	1,971	1016,31
	25	1	0,174	0,01	1,08	6,636	-84,93

Tabela 6.7 – Indicadores de eficiência energética na adutora dos pivôs ensaiados

Pivô	Perda de carga (mca)	Indicador de eficiência		Potência elétrica (kw)	Perda de carga calculada (mca)	Variação da perda de carga (%)	
		Δh_{100} (mca)	C_{ENT} ($\text{kwh.m}^{-3}.\text{Km}^{-1}$)				
REGIÃO DE SANTO AUGUSTO	26	8	1,135	0,04	8,12	6,829	17,15
	27	25	2,651	0,09	43,91	12,631	97,93
	28	26	3,312	0,12	51,21	5,732	353,55
	29	10	1,318	0,05	10,91	22,332	-55,22
	30	60	8,547	0,06	11,95	8,335	619,89
	31	11	1,176	0,03	15,79	11,673	-5,77
	32	9	1,718	0,07	8,07	12,143	-25,88
	33	9	1,863	0,06	7,31	11,419	-21,19
	34	8	0,956	0,13	46,32	19,140	-58,20
	35	31	9,012	0,23	11,85	8,088	283,28
	36	19,51	1,898	0,17	42,93	26,209	-25,56
	37	45,5	3,252	0,07	38,47	93,323	-51,24
	38	25	4,325	0,09	21,31	12,236	104,32
39	15	3,191	0,14	22,65	7,305	105,34	

Pode se verificar na Tabela 6.6 uma variação de até 1016,31%, na Região de Cruz Alta, e 619,89%, e na Tabela 6.7, na Região de Santo Augusto, entre o valor calculado e o valor medido para a perda de carga na tubulação de adução. Para a análise dos dados é importante determinar três fatores que influenciam a variação: rugosidade, peças especiais e problemas com desníveis.

Para o cálculo da perda de carga é necessário conhecer a rugosidade da tubulação que, por sua vez, varia ao longo da vida útil da tubulação e de sua maneira de utilização. Utilizando valores do coeficiente de rugosidade para tubulações novas, certamente teremos uma variação entre este valor e o real da tubulação; o que pode explicar parte da distorção de muitos dos equipamentos analisados.

Outro problema que pode acarretar distorção é a estimativa da perda de carga localizada, ao longo da tubulação de adução, no cálculo da estimativa da perda de carga localizada é acrescido 4% do valor da perda de carga total da adutora. Pode haver um acréscimo da perda de carga localizada em função do uso de várias peças ou válvulas especiais na tubulação, ou ainda, problemas na abertura do registro ou na válvula de retenção.

Também, outra fonte de erro consiste no processo da determinação da altura geométrica do trecho ensaiado. O erro na determinação da altura geométrica pode ocorrer por deficiência de precisão do equipamento utilizado, utilização de equipamento inadequado, ou erro de operação, em campo ou no escritório.

Considerando os dados da Tabela 6.6 e Tabela 6.7, pode se verificar que a perda de carga em 100 m, indicador normalmente utilizado pelos projetistas, variou nas adutoras ensaiada entre 0,17 e 5,92 mca o que propiciaram perda de potência elétrica de 1,08 kW e 68,15 kW respectivamente, na Região de Cruz Alta e entre 0,95 e 9,01 mca o que propiciaram perda de potência elétrica de 46,32 kW e 11,85 kW respectivamente, na Região de Santo Augusto. Desta forma, o indicador Consumo Específico Normalizado na Tubulação na Região de Cruz Alta variou entre $0,01 \text{ kWh.m}^{-3}.\text{km}^{-1}$ a $0,22 \text{ kWh.m}^{-3}.\text{km}^{-1}$, para a Região de Santo Augusto variou entre $0,03 \text{ kWh.m}^{-3}.\text{km}^{-1}$ a $0,23 \text{ kWh.m}^{-3}.\text{km}^{-1}$, ou seja, na Região de Cruz Alta, nos dados em estudo, a adutora com maior consumo consome 22 vezes mais energia específica que a adutora com menor consumo; e na Região de Santo Augusto, a adutora com maior consumo consome 7,6 vezes mais energia específica que a adutora com menor consumo.

Utilizando a Equação de Bresse para o cálculo econômico do diâmetro das adutoras, foi verificado que 48,7% das tubulações apresentam-se abaixo do diâmetro economicamente recomendado. Na Região de Cruz Alta, 36% das tubulações apresentaram problema de dimensionamento e, na Região de Santo Augusto, 71% tiveram problemas, segundo o critério adotado.

Na Figura 6.5 podem ser visualizadas as potências antes e após a alteração do diâmetro da adutora para cada equipamento nas duas regiões.

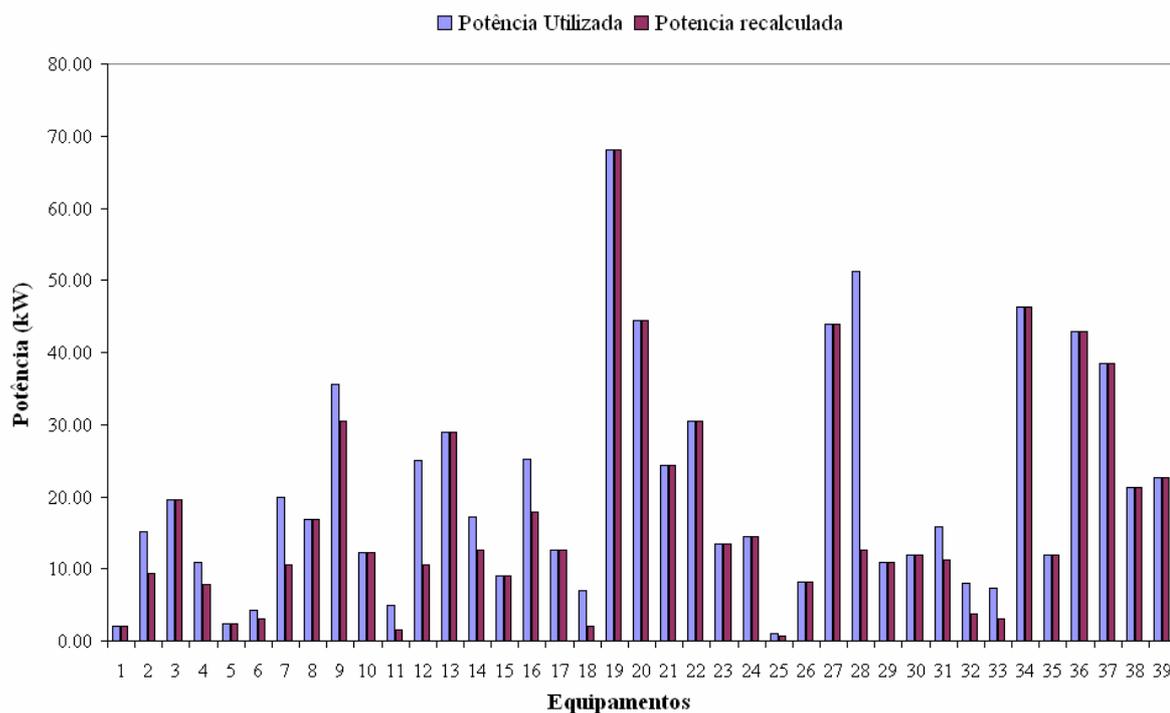


Figura 6.5 – Potência elétrica dissipada na adutora e potência elétrica recalculada com a adequação do diâmetro da adutora em cada equipamento.

O equipamento 18 na Região de Cruz Alta pode baixar o consumo de potência na adutora em 70%, com a mudança de diâmetro, segundo a orientação da Equação de Bresse; o equipamento 28, na Região de Santo Augusto pode baixar o consumo em 75%.

Linha lateral

A energia dissipada na linha lateral de um sistema de irrigação é resultado da perda por atrito ao longo da tubulação e de perdas localizadas nas singularidades do sistema. É fácil identificar que o cálculo desta perda é diferente do realizado em uma tubulação de adução, no equipamento existe a perda de água, para alimentar o aspersor, de acordo com o espaçamento utilizado.

Foi realizado o ensaio de aspersão no campo e, com os dados, calculado a perda de carga da tubulação. Claro que novamente tem-se a considerar a dificuldade de precisão, em função da diferença do coeficiente de uniformidade, pelas peças especiais utilizadas, ou por problemas de funcionamento dos reguladores de pressão.

Foi calculada a perda de carga na tubulação aérea, com os dados da ficha técnica de cada equipamento através da Equação 6.9. (Colombo, 2003).

Tabela 6.8 – Indicador de eficiência das linhas laterais dos pivôs ensaiados.

Pivô	Ensaio			Potência elétrica (kw)	Perda de carga calculada (mca)	Variação na perda de carga (%)	
	Perda de carga (mca)	Δh_{100} (mca)	C_{ENT} ($\text{kwh.m}^{-3}.\text{km}^{-1}$)				
REGIÃO DE CRUZ ALTA	1	0,60	0,245	-0,11	-2,84	4,176	-85,63
	2	28,10	4,974	0,15	30,41	23,699	18,57
	3	30,10	9,967	0,34	25,01	10,830	177,93
	4	7,10	2,797	0,48	26,83	7,519	-5,58
	5	14,10	2,753	0,25	39,82	28,892	-51,20
	6	35,10	6,037	0,27	57,28	33,821	3,78
	7	6,10	1,453	0,22	21,89	19,123	-68,10
	8	-10,90	-1,913	0,12	26,72	26,167	-141,66
	9	27,10	5,899	0,15	18,38	14,921	81,62
	10	8,10	1,640	0,14	22,22	18,800	-56,92
	11	19,60	3,948	0,30	50,80	34,010	-42,37
	12	8,10	1,607	0,17	30,38	22,569	-64,11
	13	-10,90	-1,778	0,02	7,43	24,353	-144,76
	14	6,10	0,979	0,18	53,40	25,198	-75,79
	15	0,10	0,025	0,17	13,96	10,831	-99,08
	16	31,10	4,658	0,24	89,77	36,950	-15,83
	17	-7,90	-1,920	0,03	2,45	11,364	-169,52
	18	-14,90	-3,197	0,16	21,05	14,856	-200,29
	19	-31,90	-5,425	-0,01	-2,88	19,880	-260,46
	20	0,10	0,026	-0,03	-3,07	10,231	-99,02
	21	-1,90	-0,462	0,24	25,41	16,373	-111,60
	22	21,10	3,520	0,13	37,77	21,546	-2,07
	23	8,10	1,809	0,34	43,23	21,245	-61,87
	24	9,70	3,001	0,00	-0,20	3,823	153,75
	25	-5,12	-1,112	-0,11	-15,25	22,812	-122,44

Tabela 6.9 – Indicador de eficiência das linhas laterais dos pivôs ensaiados.

Pivô	Ensaio		C_{ENT} (kWh.m ⁻³ .km ⁻¹)	Potência elétrica (kw)	Perda de carga calculada (mca)	Variação na perda de carga (%)	
	Perda de carga (mca)	Δh_{100} (mca)					
REGIÃO DE SANTO AUGUSTO	26	5,10	0,738	0,11	20,41	15,290	-66,64
	27	25,10	4,147	0,20	61,65	27,947	-10,19
	28	22,10	3,296	0,09	33,68	22,556	-2,02
	29	7,10	1,616	0,16	18,65	18,713	-62,06
	30	28,60	5,704	0,34	49,53	25,550	11,94
	31	10,10	1,617	0,06	17,72	25,579	-60,51
	32	58,10	12,576	0,36	38,63	15,500	274,85
	33	6,10	1,259	0,07	8,31	16,584	-63,22
	34	2,10	0,356	0,04	10,61	34,234	-93,87
	35	3,10	1,068	0,18	7,96	9,091	-65,9
	36	2,73	0,700	0,02	1,63	14,395	-81,04
	37	31,10	5,196	0,16	40,16	18,010	72,69
	38	31,10	5,515	0,26	58,38	33,150	-6,19
	39	-4,90	-1,258	0,50	65,56	25,975	-118,86

Pode se verificar, a partir da Tabela 6.8, que a situação mais crítica na Região de Cruz Alta refere-se ao equipamento 4 com um consumo específico normalizado de 0,48 kWh.m⁻³.km⁻¹. Na Região de Santo Augusto (Tabela 6.9) o equipamento 39 apresentou consumo específico normalizado de 0,50 kWh.m⁻³.km⁻¹. A Perda de Carga em 100 m encontrada é igual a 9,90 mca na Região de Cruz Alta e 12,5 mca na Região de Santo Augusto, para o equipamento 3 e 32 respectivamente.

Na Região de Cruz Alta os equipamentos 1, 19, 20, 24 e 25 apresentaram valores negativos de potência elétrica consumida e consumo específico. Isto se deve ao fato que o cálculo leva em consideração as medidas de desnível geométrico entre o centro do pivô e o ponto mais alto na área do equipamento, também a pressão encontrada na última torre. Algumas vezes podemos ter deficiência de pressão no equipamento, ou erro no levantamento do desnível geométrico, que irá acarretar nos valores negativos para potência.

A variação entre os valores ensaiados e calculados de perda de carga é justificada em razão dos problemas de projeto encontrados nos equipamentos, problemas no sistema de aspersão, e problemas relacionados à falta de manutenção.

Sistema de aspersão

A energia dissipada na aspersão consiste na energia fornecida pelo motor do sistema hidráulico para propiciar pressão e vazão necessárias ao perfeito funcionamento do sistema de aspersão. Desta maneira, essa energia necessária está associada a necessidade que o sistema de aspersão tem de vazão e pressão.

Considerando a vazão bombeada (Q_s), a lâmina coletada a partir do ensaio de avaliação de pivô e uma área adequadamente irrigada igual a 80%, é possível se determinar o consumo de potência e o consumo específico no Aspersor (CE_{asp}), Tabela 6.10 e 6.11.

Tabela 6.10 – Indicador de eficiência do sistema de aspersão Região de Cruz Alta - RS.

Pivô	Ensaio		C_{Easp} (kwh.mm ⁻¹ .ha ⁻¹)	Potência elétrica (kw)	Pressão no final da tubulação esperada (mca)	Variação na pressão (%)	
	Pressão no final da tubulação (mca)	Δh_{100} (mca)					
REGIÃO DE CRUZ ALTA	1	6,00	0,245	0,70	6,54	13,00	-53,85
	2	9,00	4,974	0,73	22,52	15,00	-40,00
	3	11,00	9,967	0,75	14,93	15,00	-26,67
	4	60,00	2,797	1,49	29,46	35,00	71,43
	5	35,00	2,753	0,71	19,64	15,00	133,33
	6	21,00	6,037	0,71	23,02	15,00	40,00
	7	33,00	1,453	0,72	14,29	15,00	120,00
	8	45,00	-1,913	0,67	24,62	15,00	200,00
	9	6,00	5,899	0,72	16,35	15,00	-60,00
	10	25,00	1,640	0,71	21,36	15,00	66,67
	11	36,00	3,948	0,69	20,36	15,00	140,00
	12	30,00	1,607	0,70	22,35	15,00	100,00
	13	30,00	-1,778	0,68	29,79	15,00	100,00
	14	40,00	0,979	0,69	28,51	15,00	166,67
	15	30,00	0,025	0,67	12,21	13,00	130,77
	16	23,00	4,658	0,77	38,40	15,00	53,33
	17	26,00	-1,920	0,71	13,63	15,00	73,33
	18	48,00	-3,197	0,76	20,09	15,00	220,00
	19	45,00	-5,425	0,69	25,55	15,00	200,00
	20	12,00	0,026	0,76	18,15	15,00	-20,00
	21	42,00	-0,462	0,75	15,35	15,00	180,00
	22	15,00	3,520	0,72	29,86	15,00	0,00
	23	39,00	1,809	0,90	21,43	15,00	160,00
	24	25,00	3,001	1,93	22,83	35,00	-28,57
	25	6,00	-1,112	0,71	16,29	15,00	-60,00

Tabela 6.11 – Indicador de eficiência do sistema de aspersão Região de Santo Augusto – RS.

Pivô	Ensaio		C_{Easp} (kwh.mm ⁻¹ .ha ⁻¹)	Potência elétrica (kw)	Pressão no final da tubulação esperada (mca)	Variação na pressão (%)	
	Pressão no final da tubulação (mca)	Δh_{100} (mca)					
REGIÃO DE SANTO AUGUSTO	26	30,00	0,738	0,73	16,99	15,00	100,00
	27	25,00	4,147	0,66	29,93	15,00	66,67
	28	10,00	3,296	0,68	31,88	15,00	-33,33
	29	30,00	1,616	0,98	23,11	20,00	50,00
	30	32,00	5,704	0,70	18,93	15,00	113,33
	31	15,00	1,617	0,68	28,62	15,00	0,00
	32		12,576	0,73	14,17	15,00	-53,85
	33	23,00	1,259	0,93	18,64	20,00	-40,00
	34	40,00	0,356	1,40	51,45	35,00	-26,67
	35	45,00	1,068	1,59	20,04	35,00	71,43
	36	12,00	0,700	0,65	14,66	13,00	133,33
	37	10,00	5,196	0,70	26,02	15,00	40,00
	38	25,00	5,515	0,67	24,49	15,00	120,00
	39	72,00	-1,258	0,70	20,87	15,00	200,00

Desta forma, pode se observar, a partir da Tabela 6.10, que os aspersores do equipamento 4 da Região de Cruz Alta consomem 1,49 kWh.mm⁻¹.ha⁻¹, ao passo que, o equipamento 15, da mesma região necessita de 0,67 kWh.mm⁻¹.ha⁻¹ para garantir um milímetro de lâmina d'água em pelo menos 80% de um hectare. Também podem ser descritas as potências para os mesmos equipamentos, 29,46 kW e 12,21 kW respectivamente.

Na Tabela 6.11, para a Região de Santo Augusto, o equipamento 36 apresenta consumo específico de 0,65 kWh.mm⁻¹.ha⁻¹ e potência de 14,66 kW, o equipamento 35, consumo específico de 1,59 kWh.mm⁻¹.ha⁻¹ e potência de 20,04 kW.

A variação na energia consumida pelos aspersores nos equipamentos ensaiados é reflexo da Eficiência de Aplicação de cada sistema, aqui considerada a aplicação para pelo menos 80% da área irrigada, assim assumindo o valor do CUC como Eficiência de Aplicação.

A pressão necessária no final da tubulação do equipamento também é considerada, é apresentado a variação da pressão que seria esperada e a pressão que realmente está ocorrendo. Na Região de Cruz Alta, 7 equipamentos, ou seja em 28% a pressão observada foi menor que a pressão realmente necessária ao aspersor; 8% teve a pressão variando até 50% acima do valor; 24% entre 50 e 100% do valor; 28% entre 100 e 200% do valor e; 12% ficaram acima de 200% do valor esperado para a pressão no final do equipamento.

Para a Região de Santo Augusto 3 equipamentos, ou seja em 23% a pressão observada foi menor que a pressão realmente necessária ao aspersor; 53% teve a pressão variando até 50% acima do valor; 23% entre 50 e 100% do valor e; 7% ficaram com a pressão entre 100% e 200% do valor esperado para a pressão no final do equipamento.

Sistema de irrigação e o fluxo energético

A apresentação dos indicadores de eficiência para os sistemas de irrigação podem considerar vazão bombeada, fluxo energético e a vazão útil. Seguem as Figuras 6.6 e 6.7.

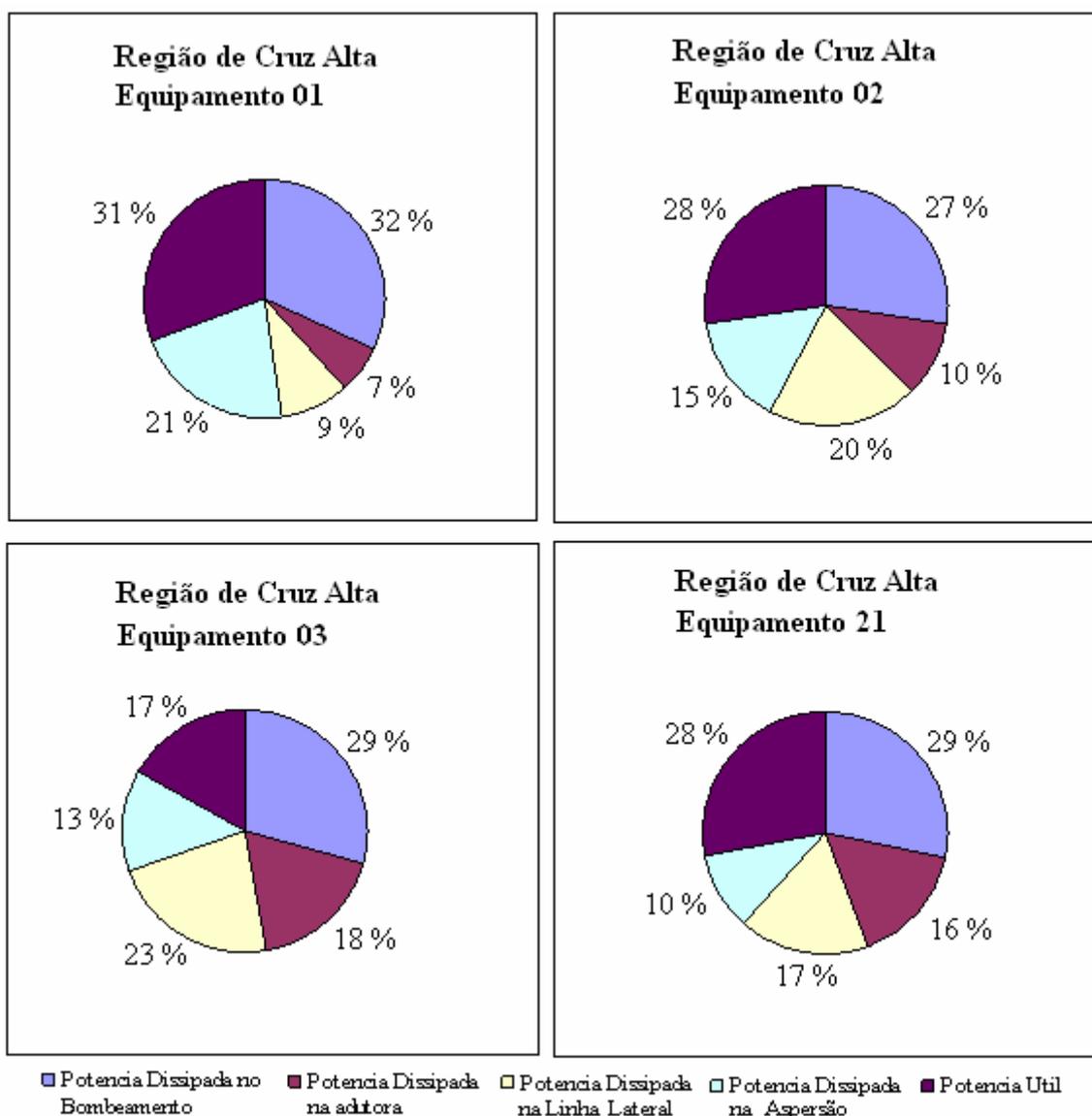


Figura 6.6 – Fluxo energético em alguns dos equipamentos de irrigação ensaiados na Região de Cruz Alta – RS.

Tendo calculado a potência dissipada no conjunto motobomba, as perdas na sucção, adutora e linha lateral, determina-se a potência útil do pivô central para a vazão total bombeada.

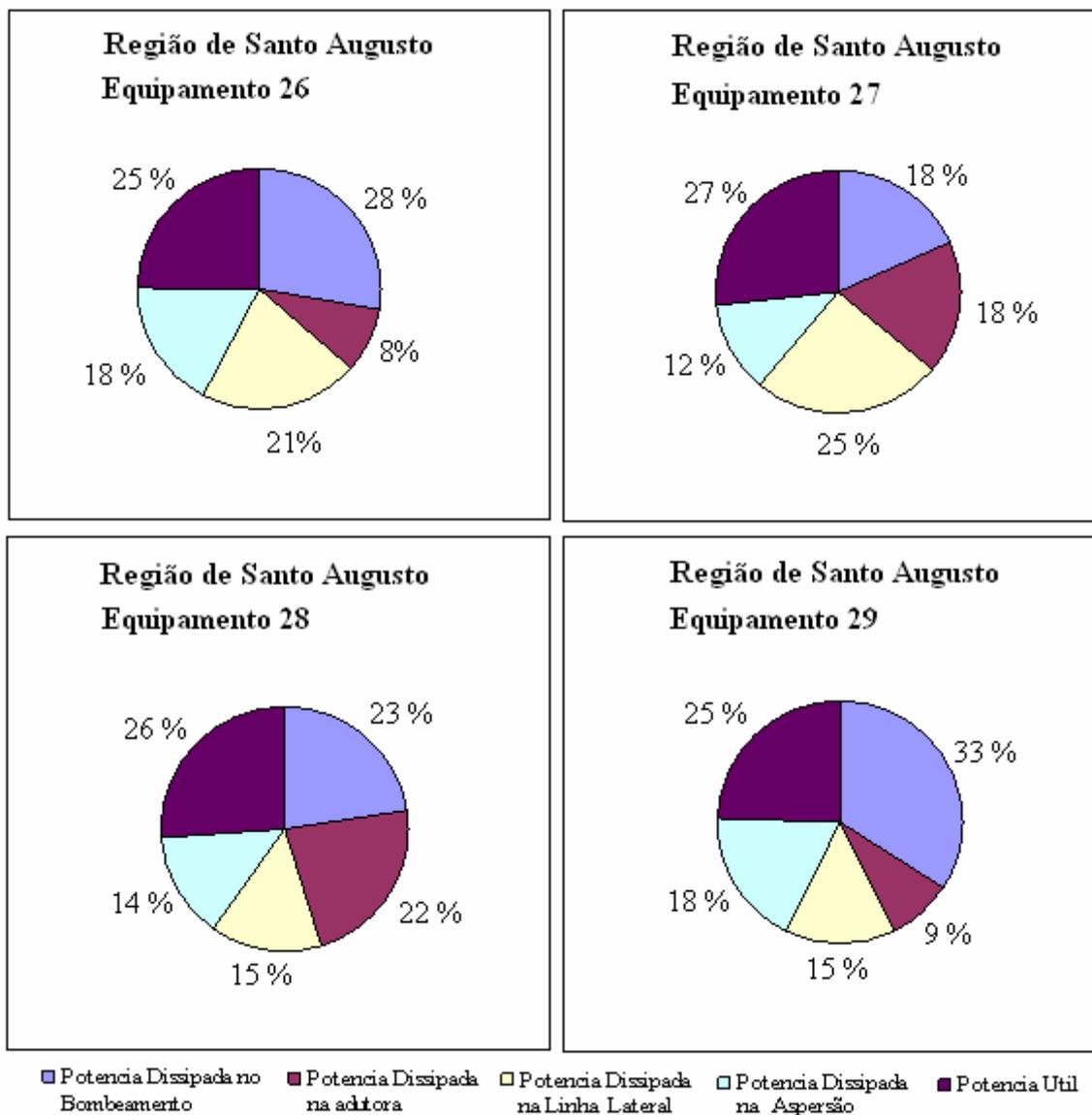


Figura 6.7 – Fluxo energético em alguns dos equipamentos de irrigação ensaiados na Região de Santo Augusto – RS.

A partir da Figura 6.6 e 6.7, observa-se que o equipamento 01 da Região de Cruz Alta consome 32% de sua energia no conjunto motor e bomba para a conversão de energia elétrica para hidráulica, enquanto que o equipamento 27 da Região de Santo Augusto necessita de 18%.

Da mesma forma, a potência dissipada na adutora do equipamento 28 da Região de Santo Augusto com 785 m equivale a 22% enquanto que, com 1070 m a tubulação do equipamento 02 de Cruz Alta perde 10%. Com relação à potência associada a linha lateral, existe uma variação grande, nas figuras apresentadas, entre 9% e 25%, isto se deve ao fato que toda a pressão excedente ou em falta é contabilizada para o cálculo na última parte do equipamento, a linha lateral.

A análise do fluxo energético possibilita uma visão sobre as potências dissipadas em cada elemento, todavia, falta uma posição clara de como está cada elemento em relação ao seu melhor desempenho para determinada situação.

Indicadores de eficiência do sistema de irrigação

Este item foi estruturado com a comparação dos consumos específicos dos equipamentos das duas regiões, e a comparação destes com o Consumo Específico Normalizado, considerado como indicador de eficiência dos equipamentos de irrigação.

Pode se observar na Figura 6.11 que o Consumo Específico Normalizado do bombeamento do equipamento 23 e 24 é o maior dos equipamentos ensaiados. Assim, o conjunto motor e bomba do equipamento 23, necessita de 0,48 kWh, e do equipamento 24 necessita de 0,50 kWh para bombear um metro cúbico de água em 100 m de altura manométrica, enquanto que o equipamento 27 consome $0,35 \text{ kWh.m}^{-3}.100\text{m}^{-1}$ e os equipamentos 8, 31, 34 e 38 consomem $0,36 \text{ kWh.m}^{-3}.100\text{m}^{-1}$, cada um.

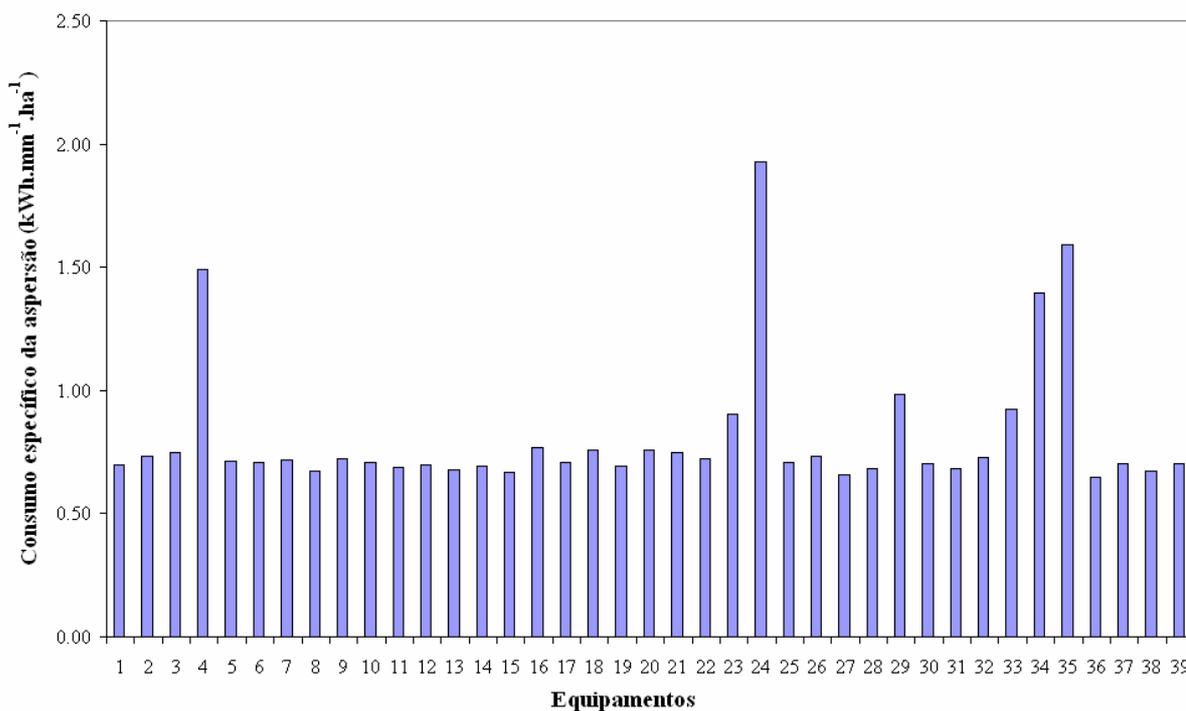


Figura 6.8 – Consumo específico do sistema de aspersão dos equipamentos estudados nas duas Regiões. Cruz Alta – RS (equipamento 1 ao 25) e Região de Santo Augusto – RS (equipamento 26 ao 39).

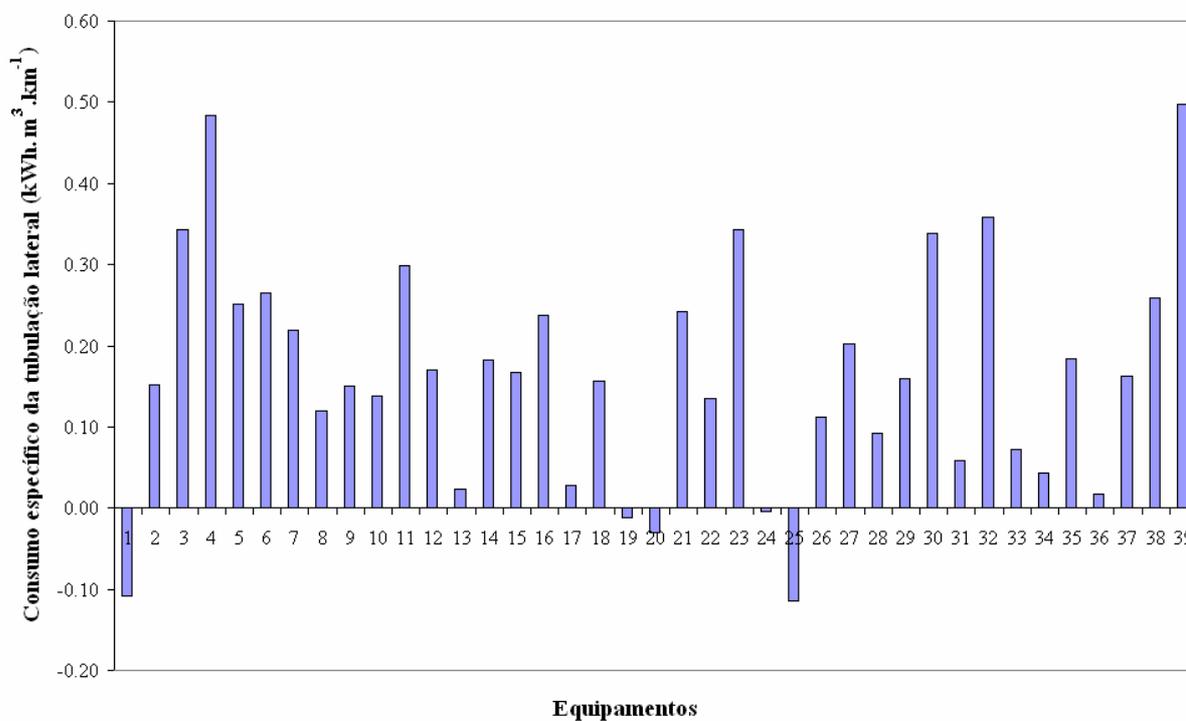


Figura 6.9 – Consumo específico da tubulação lateral dos equipamentos estudados nas duas Regiões. Cruz Alta, RS (equipamento 1 ao 25) e Região de Santo Augusto, RS (equipamento 26 ao 39).

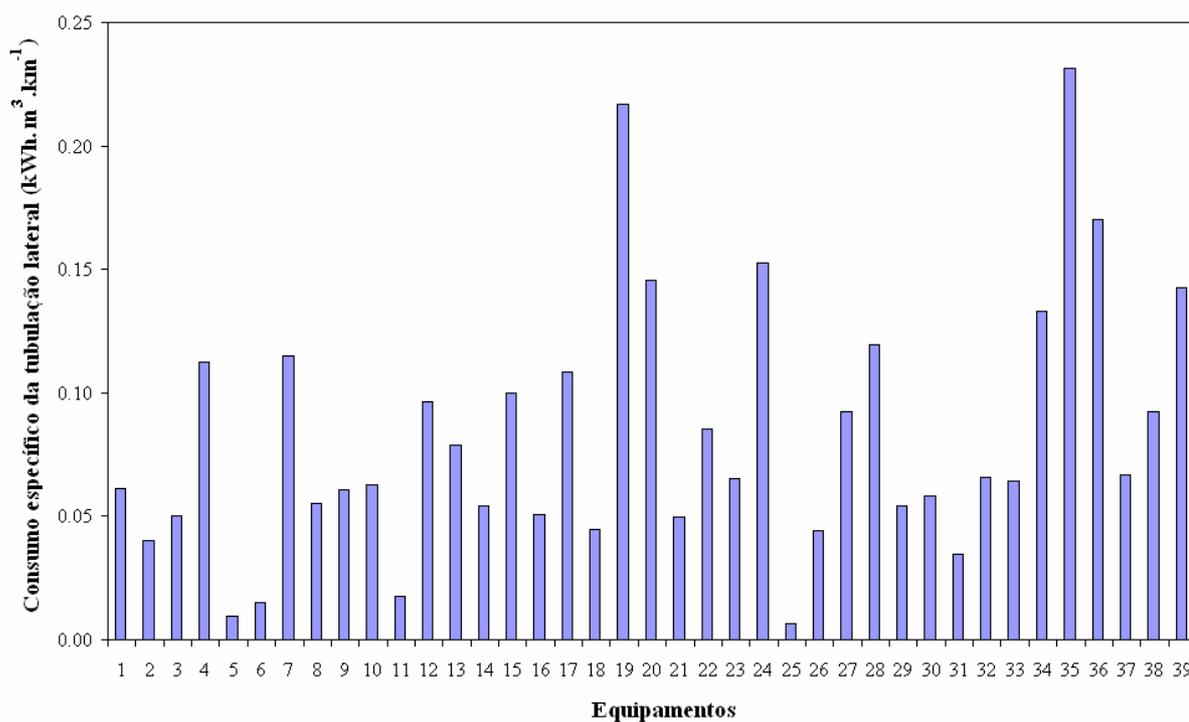


Figura 6.10 – Consumo específico do sistema de adução dos equipamentos estudados nas duas Regiões. Cruz Alta, RS (equipamento 1 ao 25) e Região de Santo Augusto, RS (equipamento 26 ao 39).

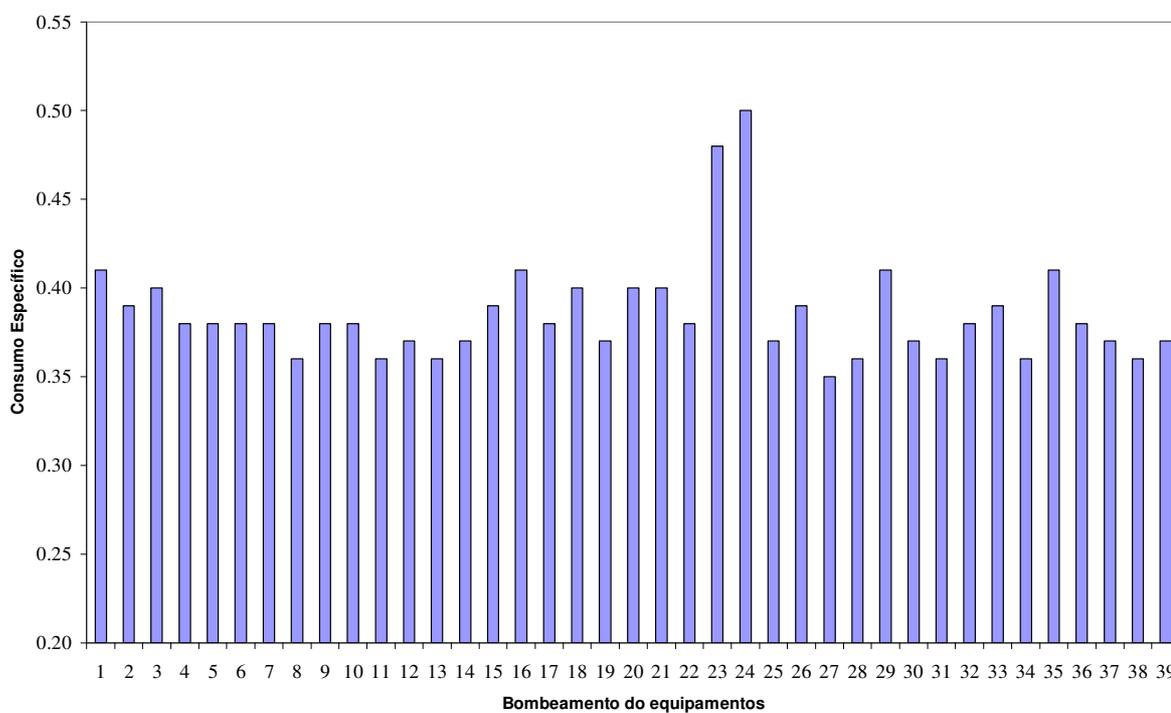


Figura 6.11 – Consumo específico do sistema de bombeamento dos equipamentos estudados nas duas Regiões. Cruz Alta, RS (equipamento 1 ao 25) e Região de Santo Augusto, RS (equipamento 26 ao 39).

Destaca-se, ainda, na Figura 6.10, o Consumo Específico Normalizado da adutora do equipamento 19, pois, enquanto esta tubulação consome 0,22 kWh no equipamento 5, 6 e 25 necessitam 0,01 kWh cada, para bombear um metro cúbico em um quilômetro de tubulação, ou seja, 22 vezes maior.

Outro ponto a ser destacado consiste no indicador de eficiência da linha lateral. Observa-se um Consumo Específico Normalizado na Tubulação de 0,48 e 0,50 kWh.m⁻³.km⁻¹ neste elemento do equipamento 4 e 5 devido, como já apresentado, ao excesso de pressão no final da tubulação, desnecessário aos aspersores.

Ainda na Figura 6.8 deve-se observar o Consumo Específico associado aos aspersores do equipamento 4, 24, 34 e 35. Estes equipamentos necessitam de 1,49, 1,93, 1,4 e 1,59 kWh.mm⁻¹.ha⁻¹, respectivamente, ao passo que o menor valor encontrado refere-se ao equipamento 36, 0,65 kWh.mm⁻¹.ha⁻¹. Isto se deve ao fato que, os equipamentos que necessitam maior potência na aspersão são aqueles que utilizam canhões finais sem bomba reforço, consumindo maior pressão para o adequado funcionamento. Aqueles equipamentos com menor consumo específico na aspersão utilizam reguladores de pressão de 10 PSI, também com menor pressão necessária entre os demais.

Avaliando os elementos, foi possível calcular três indicadores de eficiência energética para o sistema de irrigação completo. Trata-se do Consumo Específico (C_E), usualmente utilizado pelos profissionais da área, o Consumo Específico Normalizado na Irrigação (C_{ENI}) e a Eficiência da Irrigação (E_I), conforme Tabela 6.12 e 6.13 e Figura 6.12.

Tabela 6.12 – Consumo específico e eficiência nos equipamentos de irrigação na Região de Cruz Alta, RS.

Pivô	Consumo Específico Normalizado (kWh.mm ⁻¹ .ha ⁻¹ .100m)	Consumo Específico (kWh.m ⁻³)	Eficiência de Irrigação (%)	
REGIÃO DE CRUZ ALTA	1	8,20	0,27	35,59
	2	9,14	0,40	31,76
	3	15,20	0,43	19,32
	4	13,74	0,45	21,05
	5	8,35	0,45	33,62
	6	9,80	0,49	29,50
	7	9,67	0,43	29,90
	8	7,89	0,44	35,58
	9	9,76	0,33	29,46
	10	8,27	0,37	34,77
	11	11,55	0,38	24,31
	12	11,23	0,29	25,01
	13	11,91	0,27	24,35
	14	10,02	0,35	28,86
	15	8,36	0,36	34,79
	16	11,93	0,46	24,11
	17	7,37	0,38	39,44
	18	8,61	0,37	33,58
	19	8,72	0,37	33,16
	20	10,00	0,43	28,91
	21	8,81	0,53	31,89
	22	10,61	0,31	27,41
	23	13,06	0,48	22,02
	24	15,33	0,57	18,76
	25	8,84	0,38	31,78

Tabela 6.13 – Consumo específico e eficiência nos equipamentos de irrigação na Região de Santo Augusto, RS.

Pivô	Consumo Específico Normalizado (kWh.mm ⁻¹ .ha ⁻¹ .100m)	Consumo Específico (kWh.m ⁻³)	Eficiência de Irrigação (%)	
REGIÃO DE SANTO AUGUSTO	26	10,25	0,34	28,22
	27	8,57	0,41	33,75
	28	9,48	0,39	30,51
	29	11,26	0,49	25,55
	30	7,94	0,36	35,38
	31	7,81	0,45	37,02
	32	10,54	0,39	27,59
	33	9,00	0,45	32,14
	34	8,49	0,47	33,08
	35	14,23	0,40	20,69
	36	9,60	0,45	30,11
	37	8,37	0,49	34,35
	38	9,96	0,41	28,19
	39	12,44	0,50	22,99

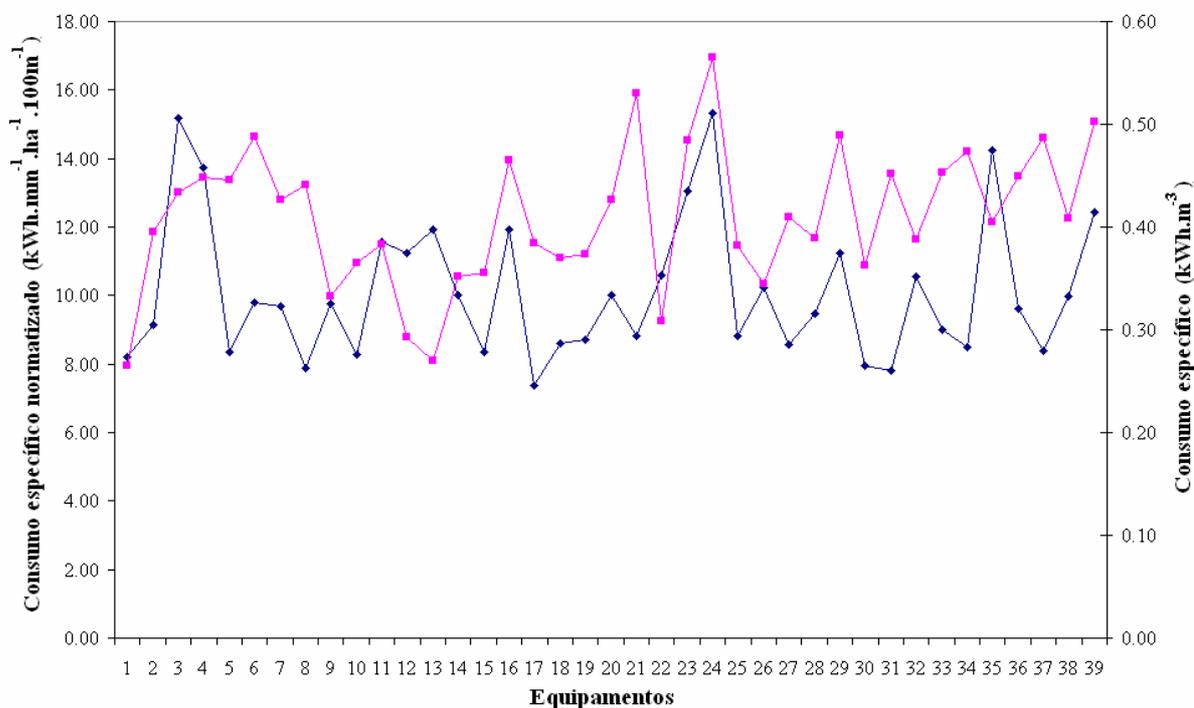


Figura 6.12 – Consumo específico normalizado e consumo específico dos equipamentos de irrigação estudados nas duas Regiões. Cruz Alta, RS (equipamento 1 ao 25) e Região de Santo Augusto, RS (equipamento 26 ao 39).

O Consumo Específico pode fornecer diretamente a energia por volume de água bombeado. Trata-se, então, de um indicador dependente das condições topográficas locais, todavia, importante para comparação entre diferentes projetos de um mesmo sistema de irrigação e para o acompanhamento da depreciação da eficiência do equipamento.

O Consumo Específico Normalizado na Irrigação para uma lâmina útil garantida em 80% da área, consiste em um indicador geral, possibilitando os sistemas de irrigação pivôs centrais serem comparados entre si. A partir dos ensaios realizados foram determinados valores iguais a 15,20, 13,74, 13,06, 15,33, 14,23 e 12,44 kW.h.mm⁻¹.ha⁻¹.100m⁻¹ para os equipamentos 3, 4, 23, 24, 35 e 39 respectivamente (Tabela 6.12 e 6.13, e Figura 6.12).

Pode se observar que, apesar do conjunto motobomba do equipamento 29 apresentar o terceiro pior rendimento (66,46%) e consumo específico (0,41 kW.h.m⁻³), na avaliação geral, utilizando o Consumo Específico Normalizado, o equipamento está apresentando um valor pouco superior a média que é de 10,11 kW.h.mm⁻¹.ha⁻¹.100m⁻¹.

O equipamento mais eficiente em relação ao Consumo Específico Normalizado foi o equipamento 17 apresentando 7,37 kW.h.mm⁻¹.ha⁻¹.100m⁻¹, e segundo a Eficiência de Irrigação, apresentando 39,44%.

O Consumo Específico Normalizado médio para a Região de Cruz Alta foi de 9,99 kW.h.mm⁻¹.ha⁻¹.100m⁻¹, com desvio padrão de 2,05 kW.h.mm⁻¹.ha⁻¹.100m⁻¹; e para a Região de Santo Augusto foi de 10,24 kW.h.mm⁻¹.ha⁻¹.100m⁻¹, com desvio padrão de 2,14 kW.h.mm⁻¹.ha⁻¹.100m⁻¹.

Quando os valores encontrados nas duas regiões são comparados com o C_{ENI} proposto como padrão por Lima (2008), 72% dos equipamentos da Região de Cruz Alta estão acima do padrão (8,68 kWh.mm⁻¹.ha⁻¹.100m⁻¹), e na Região de Santo Augusto 64,28% estão com o consumo acima do padrão.

A Eficiência de Irrigação média para a Região de Cruz Alta foi de 29,85%, com desvio padrão de 5,41%; e para a Região de Santo Augusto foi de 29,02%, com desvio padrão de 5,15%.

Assim, apesar do indicador de uniformidade de distribuição de água, Coeficiente de Christiansen, ou outro, e a Eficiência de Aplicação fornecerem dados importantes a respeito do funcionamento hídrico do sistema, a avaliação energética por meio do Consumo Específico Normalizado e Eficiência de Irrigação, complementam a avaliação e são eficazes para caracterização do aproveitamento energético na irrigação utilizando pivô central.

Deve ser entendido que a Eficiência de Irrigação de um equipamento, desta forma calculada, nunca irá se aproximar de 100%, pois utiliza a potência útil que está relacionada com a altura geométrica da instalação. A minimização da potência utilizada no bombeamento, na adutora, na linha lateral, no sistema de aspersão faz com que a potência útil seja mais representativa em relação a potência total, e assim aumenta a Eficiência de Irrigação.

CAPÍTULO VII

Neste Capítulo são apresentadas as considerações finais do trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

7.1 Considerações finais

O Brasil é considerado ainda um país com pouca expressão na agricultura irrigada mundial, mas demonstra um crescimento gradual em seu uso, principalmente pelo potencial de solos aptos a irrigação e por sua condição hídrica. Por outro lado, a questão ambiental, energética e social, parece não estarem bem consolidadas.

Buscando o esclarecimento sobre alguns assuntos relacionados à irrigação, apresentaram-se discussões do posicionamento da sociedade, hoje, frente a esta técnica. Em relação a discussão sobre avaliação técnica, buscou-se discutir a concepção de projetos, desde sua fundamentação teórica, até a melhor maneira de implementação. O equipamento pivô central também foi motivo de apresentação, atendendo ao objetivo do esclarecimento de termos e inovações sobre a técnica.

A fundamentação teórica e a discussão, base deste trabalho, encaminharam-se para a questão em torno da busca da eficiência da técnica. Para discutir a implementação de medidas de eficiência energética em sistemas de irrigação pivôs centrais, iniciou-se com a metodologia utilizada para a avaliação destes sistemas. Após a avaliação, calculou-se indicadores de eficiência e adequou-se os equipamentos em um padrão de eficiência, de forma a englobar as condições de desempenho energético e agrícola da irrigação.

A avaliação atualmente utilizada para sistemas de irrigação é realizada principalmente por meio da Eficiência de Aplicação, com auxílio de coeficientes de uniformidade e com a avaliação da potência instalada. Com o uso dos indicadores estudados na metodologia, indicadores de aplicação da água e indicadores de energia, têm-se um mesmo parâmetro para

comparação de sistemas instalados em condições diferenciadas. Estes valores têm maior aplicabilidade para as avaliações que são realizadas nos equipamentos.

A base de dados analisada permite uma maior avaliação da metodologia utilizada, já que esta metodologia antes avaliada com apenas quatro equipamentos, e agora sendo avaliada com 39 equipamentos distribuídos em duas regiões diferentes do Rio Grande do Sul. Avaliou-se dados característicos das duas regiões do estudo e os indicadores Consumo Específico do Aspersor (C_{Easp}), Consumo Específico Normalizado na Irrigação (C_{ENI}) e a Eficiência de Irrigação (EI), da metodologia.

Com relação aos dados regionais, tanto a Região de Cruz Alta quanto a de Santo Augusto, apresentaram a maior frequência de equipamentos na faixa média de área entre 40 ha e 100 ha, com as frequências de 71,43% e 67,12%, respectivamente.

O desnível geométrico total médio encontrado nas duas regiões foi de 47,40 metros, com desvio em relação a média de 11,10 metros. Pelo estudo, a tendência do desnível é manter-se próximo a média, independente do aumento de área que o equipamento possa ter.

A adequação das potências realmente consumidas e as calculadas nos conjuntos motobomba devem se concentrar em motores de até 100 cv e motores acima de 200 cv, onde aparecem os maiores potenciais de adequação.

A uniformidade dos equipamentos de irrigação por pivô central, através do CUC e do CUD nas duas regiões, apresenta em média um bom desempenho, segundo a norma NBR 14244. Apesar disto, existem equipamentos com uniformidade muito baixa, e esta condição está intimamente ligada aos dois defeitos com maior ocorrência nos equipamentos estudados, o vazamento de água e os problemas no sistema de aspersão.

O Consumo Específico Normalizado na Irrigação (C_{ENI}) determina a energia ativa necessária para irrigar adequadamente pelo menos 80% de um hectare quando a altura geométrica entre o manancial e a altura desejada para a cultura na condição mais desfavorável é igual a 100 metros. Obteve-se uma média na Região de Cruz Alta de $9,99 \text{ kW.h.mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}.\text{100m}^{-1}$, com pico de $15,33 \text{ kW.h.mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}.\text{100m}^{-1}$ para o pivô 24; e para a Região de Santo Augusto a média foi de $10,24 \text{ kW.h.mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}.\text{100m}^{-1}$, com pico de $14,23 \text{ kW.h.mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}.\text{100m}^{-1}$ para o pivô 35.

O segundo indicador proposto, Eficiência de Irrigação, associa a energia absorvida pelo motor com a energia útil. A energia útil definida como a potência média ao longo de uma hora necessária ao deslocamento do volume disponível à zona radicular da planta em pelo menos 80% da área, considerando a altura geométrica entre o manancial e a altura desejada para a cultura na condição mais desfavorável. Na região de Cruz Alta obteve-se Eficiência de

Irrigação média igual a 29,85%, com desvio padrão de 5,41%; e para a Região de Santo Augusto obteve-se em média 29,02%, com desvio padrão de 5,15%. A melhor Eficiência de Irrigação encontrada foi do equipamento 17 da Região de Cruz Alta com 39,44%.

Analisaram-se, detalhadamente, os principais elementos componentes dos equipamentos que consomem energia. Assim, a partir da estratificação dos equipamentos de irrigação em conjunto motobomba, tubulação de sucção e adutora, linha lateral e sistema de aspersão, foi possível caracterizar a energia dissipada em cada elemento e a total, bem como calcular os indicadores de eficiência propostos.

Com rendimentos nos conjuntos motobomba variando entre 58 e 81%, na Região de Cruz Alta; e entre 70 e 83%, na Região de Santo Augusto. Apesar da média dos rendimentos apresentarem-se em 74,03% e 76,6%, nas duas regiões respectivamente, quando calculado o potencial de redução de potência obtém-se no equipamento 16, da Região de Cruz Alta, um potencial de redução de 29,41 cv, e no equipamento 29, da Região de Santo Augusto, um potencial de 31,32 cv.

Na Região de Cruz Alta encontram-se 24% dos equipamentos com menos de 5% de discrepância entre o máximo de rendimento possível para a bomba, calculado pela velocidade específica e pela vazão e pressão de trabalho, e o rendimento medido. Também se encontravam 56% dos equipamentos com variação entre 5 e 10% e 20% dos equipamentos com discrepância maior que 10%.

Na Região de Santo Augusto, 28% dos equipamentos estavam-se com até 5% de discrepância, 64% dos equipamentos com variação entre 5 e 10% e 7% com uma discrepância maior que 10%.

Encontrou-se uma variação de até 1016% na Região de Cruz Alta, e 619% na Região de Santo Augusto, entre o valor calculado e o valor medido para a perda de carga na tubulação de adução.

Pôde-se verificar que a perda de carga em 100 m variou nas adutoras ensaiada entre 0,17 e 5,9 mca o que propiciou uma perda de potência elétrica de 1,8 kW e 68,15 kW respectivamente, na Região de Cruz Alta. Também, a perda de carga, variou entre 0,95 e 9,0 mca, na Região de Santo Augusto, o que propiciou uma perda de potência elétrica de 44 kW e 10 kW respectivamente. Desta forma, o indicador Consumo Específico Normalizado na Tubulação na Região de Cruz Alta variou entre $0,006 \text{ kW.h.m}^{-3}.\text{km}^{-1}$ a $0,204 \text{ kW.h.m}^{-3}.\text{km}^{-1}$, para a Região de Santo Augusto varia entre $0,033 \text{ kW.h.m}^{-3}.\text{km}^{-1}$ a $0,214 \text{ kW.h.m}^{-3}.\text{km}^{-1}$.

Utilizando a Equação de Bresse para o cálculo econômico do diâmetro das adutoras, verificou-se que 48,7% das tubulações apresentavam-se abaixo do diâmetro economicamente

recomendado. Na Região de Cruz Alta, em 36% das tubulações apareceram problemas de dimensionamento e, na Região de Santo Augusto, 71% tiveram problemas, segundo o critério adotado.

Na linha lateral verificou-se que a situação mais crítica, na Região de Cruz Alta, refere-se ao equipamento 4 com um consumo específico normalizado de $0,48 \text{ kWh.m}^{-3}.\text{km}^{-1}$. Na Região de Santo Augusto, o equipamento 39 apresentou-se com consumo específico normalizado de $0,50 \text{ kW.h.m}^{-3}.\text{km}^{-1}$. Encontrou-se uma Perda de Carga em 100 m igual a 9,9 mca, na Região de Cruz Alta, e 12,5 mca na Região de Santo Augusto, para o equipamento 3 e 32 respectivamente.

O indicador proposto para a aspersão associa os parâmetros agrícolas e energéticos na avaliação do pivô central de irrigação. Assim, considerando uma área adequadamente irrigada de 80%, define-se o volume útil do sistema caracterizado por Eficiências de Aplicação (EA_{80}). Desta forma, observou-se que os aspersores do equipamento 4 da Região de Cruz Alta consomem $1,49 \text{ kW.h.mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$, ao passo que, o equipamento 15, da mesma região necessitou de 0,67 kW.h para garantir um milímetro de lâmina d'água em pelo menos 80% de um hectare. Também podem ser descritas as potências consumidas nesta etapa para os mesmos equipamentos, 29,46 kW e 12,21 kW respectivamente. Para a Região de Santo Augusto, o equipamento 36 apresentou-se com consumo específico de $0,65 \text{ kW.h.mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ e potência de 14,66 kW, o equipamento 35, com consumo específico de $1,59 \text{ kW.h.mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ e potência de 20,04 kW.

A variação de pressão necessária no final da tubulação encontrada na Região de Cruz Alta, em 7 equipamentos, ou seja, em 28%, a pressão que se observou foi menor que a pressão realmente necessária ao aspersor; em 8% a pressão variou até 50% acima do valor; em 24% variou entre 50 e 100% do valor; em 28% entre 100 e 200% do valor e; em 12% ficaram acima de 200% do valor esperado. Para a Região de Santo Augusto, 3 equipamentos, 23%, a pressão que se observou foi menor que a pressão realmente necessária ao aspersor; 53% têm a pressão variando até 50% acima do valor; 23% entre 50 e 100% do valor e; 7% ficam com a pressão entre 100% e 200% do valor esperado.

O fluxo energético dos principais elementos do sistema de irrigação por pivô central: bombeamento, adução, linha lateral, sistema de aspersão e potência útil, possibilita uma melhor visualização do desempenho de cada um, sendo importante na determinação de melhorias a serem implementadas.

Assim, sob as condições analisadas, conclui-se que, segundo o Padrão de Eficiência Energética o Consumo Específico Normalizado na Irrigação proposto por Lima (2008), 72%

dos equipamentos da Região de Cruz Alta estão acima do padrão ($8,68 \text{ kWh} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 100\text{m}^{-1}$), e na Região de Santo Augusto 64,28% estão com o consumo acima do padrão.

A Eficiência de Irrigação média para a Região de Cruz Alta foi de 29,85%, com desvio padrão de 5,41%; e para a Região de Santo Augusto é de 29,02%, com desvio padrão de 5,15%.

Como conclusão da eficiência dos sistemas tem-se que, os procedimentos de avaliação utilizados atualmente, com a avaliação hídrica e energética separadamente, trazem contribuições importantes, mas na metodologia utilizada, a associação destes parâmetros no indicador Consumo Específico Normalizado na Irrigação (C_{ENI}) possibilita a comparação entre equipamentos e projetos, sendo de maior significância e relevância para ser utilizado na pesquisa e para a aplicação prática e direta entre os usuários. Com isso deve ser amplamente estudada para sua consolidação como parâmetro.

7.2 Recomendações para trabalhos futuros

Como trabalhos futuros são sugeridos:

- Estudo sobre o parâmetro a ser adotado para o Consumo Específico Normalizado na Irrigação (C_{ENI});
- Desenvolvimento de um software de projeto e avaliação energética de pivô central, com simulação da eficiência dos elementos e determinação dos indicadores;
- Estudo e ampliação dos indicadores para os outros sistemas de irrigação.

BIBLIOGRAFIA

ABIMAQ - Associação Brasileira de Máquinas Agrícolas. Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação. **Importância da irrigação no desenvolvimento do agronegócio**. São Paulo, 2002. 45 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Informações do setor elétrico - gestão dos potenciais hidráulicos**. 2001. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 13 dez. 2001.

ALFARO, J.F.; MARIN, V. Uso de água y energia para riego en America Latina. 1991. Disponível em: <http://unesco.org.uy/phi/libros/uso_eficiente/alfaro.html>. Acesso em: 08 set. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14244**: equipamentos de irrigação mecanizada – pivô central e lateral móvel providos de emissores fixos ou rotativos – determinação da uniformidade de distribuição de água. São Paulo, 1998. 11 p.

AZEVEDO NETTO, J.M. de.; ALVAREZ, G. A. **Manual de hidráulica**. 6. ed. São Paulo: E. Blucher, 1977. 333 p.

AZEVEDO, H. J. et al. Influência de elementos do clima no desperdício de energia em um sistema de irrigação por aspersão de alta pressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 336-341, 1999.

BARRETO, A. N.; SILVA, A. A. G.; BOLFE, E. L. **Irrigação e drenagem na empresa agrícola**: impacto ambiental versus sustentabilidade. Aracajú: Embrapa Tabuleiros Costeiros; Campina Grande: Embrapa Algodão, 2004. 418 p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. Viçosa: UFV, 2005. 611 p.

BRASIL. Lei 10.295, de 17 de outubro de 2001. Lei de eficiência energética. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 18 out. 2001

_____. Decreto 4.059, de 19 de dezembro de 2001. Regulamenta a Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 20 dez. 2001.

_____. Ministério do Meio Ambiente. ANA – Agência Nacional de Águas. **Agricultura irrigada e o uso racional da água**. Brasília, DF, 2004b. 30 p.

BRONER, I. **Center-pivot irrigation systems**. Colorado State University Cooperative Extension. Disponível em: <www.ext.colostate.edu/pubs/crops/04704.html>. Acesso em: 02 fev. 2005.

BROWN, L. R. (Org.). **Salve o planeta! Qualidade de vida – 1990**. Worldwatch Institute. São Paulo: Globo, 1990.

CAMPBELL, B.H. **Failed motors: rewind or replace?**. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 3, n. 1, p. 45–50, 1997.

CAMPANA, S. **Racionalização do uso de energia elétrica em sistemas de irrigação dos tipos pivô central e aspersão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2000.

CARVALHO, J. de A. Hidráulica básica. In: MIRANDA, J. H. de; PIRES, R. C. de M. (Eds.). **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2003. p. 1-106 (Série Engenharia Agrícola. Irrigação; 2).

CARVALHO, J. A. et al. Utilização do inversor de frequência em sistemas de irrigação para controle de vazão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 51-56, 2000.

CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Estudo de otimização energética**. Belo Horizonte: CEMIG. 1993. 22 p.

CHRISTIANSEN, J. E. Irrigation by sprinkling. Berkeley: University of California, 1942. Não paginado. (University of California. California Agricultural Experiment Station. Bulletin, 670).

CHRISTOFIDIS, D. "**Water, irrigation and the Food Crisis**", in **water. Resources Development**, Londres, v. 14, n. 3, p. 405-415, 1988.

CHRISTOFIDIS, D. **Água: gênese, gênero e sustentabilidade alimentar no Brasil**. Brasília, 2006a. 18 p. Disponível em: <<http://www.pt.genderandwater.org/content/download/2996/33129/file/AguasustentabilidadealimentarBrasil1.pdf>>. Acesso em: 08 agosto 2009.

_____. Irrigação, a fronteira hídrica e a produção de alimentos. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 54, p. 46-55, 2002.

CODEVASF; SUDENE; OEA. Plano diretor para o desenvolvimento do Vale do São Francisco – PLANVASF. Brasília, 1989. 192 p.

COELHO, R. D. **Regulagens de aspersores e seus efeitos sobre a uniformidade de aplicação de água e produtividade das culturas**. 1990. 141 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, ESALQ, Piracicaba, 1990.

COELHO, R. D.; RESENDE, R. S.; FARIA, L. F. Economia de água com nova tecnologia de irrigação. **Agrianual**, São Paulo, SP, p. 60-62, 2002

COLOMBO, A. Pivô central. In: Miranda, J. H.; Pires, R. C. M. (Eds.). **Irrigação**. Jaboticabal: FUNEP, 2003. p. 209 – 258. (Série Engenharia Agrícola. Irrigação; 2)

DAKER, A. **Irrigação e drenagem**. 7. ed. Rio de Janeiro: F. Bastos, 1988. 543 p.

DUKE, H. R.; HEERMANN, D. F.; DAWSON, L. J. Appropriate depths of application for scheduling center pivot irrigations. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 35, n. 5, p. 1457-1467, 1992.

EVANS, R.; SNEED, R. E. **Selection and management of efficient center-pivot and linear move irrigation systems**. Carolina, 1996. Disponível em: <<http://www.bae.ncsu.edu/programs/extension/evans/ebae-91-151.html>>. Acesso em: 23 out. 2008.

EVANS, R. G. **Center pivot irrigation**. Sidney, 1999. Disponível em <http://www.sidney.ars.usda.gov/Site_Publisher_Site/pdfs/personnel/center%20pivot%20design%202.pdf>. Acesso em: 25 julho 2008.

FAO - Food and Agricultural Organization of the United Nations. **The state of food and agriculture: 2000**. Roma: [s.n.], 2000. p. 329.

_____. **Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistical Databases (FAOSTAT), FAOSTAT Agriculture Data, 2000**. Disponível em:<<http://www.fao.org>>. Acesso em: 5 nov. 2006.

_____. **Crops and drops: making the best use of water for agriculture**. Roma, 2002. Disponível em: <<http://www.fao.org/landandwater/aglw/index.stm>>. Acesso em: 25 julho 2008.

_____. **Agriculture, food and water**. 2003. 64 p. Disponível em:<<http://www.fao.org>> Acesso em: 22 julho 2008.

FARIA, M. A.; VIEIRA, J. **Irrigação por aspersão: sistemas mais usados no Brasil. Informe Agropecuário**, v. 12, n. 139, p. 27-39, junho 1986.

FAVETTA, G.M. **Estudo econômico do sistema de adução em equipamentos de irrigação do tipo pivô central**. Piracicaba, 1998. 110 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

FOLEGATTI, M. V.; PESSOA, P. C. S.; PAZ, V. P. S. Avaliação do desempenho de um pivô central de grande porte e baixa pressão. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 55, n. 1, p. 119-127, 1998.

FRIZZONE, J. A.; NETO, D. D. Avaliação de sistemas de irrigação. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. (Eds.) **Irrigação**. Jaboticabal: FUNEP, 2003. p. 573 – 651 (Série Engenharia Agrícola. Irrigação; 2)

GILLEY, J. R. et al. Energy management. In : HOFFMAN, G. J.; HOWEL, T. A.; SOLOMON, K. N. (Eds.) **Management of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, 1990. p.719-746.

GILLEY, J. R.; WATTS, D. G. Possible energy savings in irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, v. 103, n. 1R4, p. 445-457, Dec. 1977.

GOMES, H. P. **Sistema de abastecimento de água: dimensionamento econômico e operação de redes e elevatória**. 2. ed. João Pessoa: Ed. Universitária/UFPB, 2004. 242 p.

GUERRA, A.F. **Adequação e manejo das irrigações por aspersão por pivô central no cerrado**, 2004. Disponível em: <<http://www.agronline.com.br/artigos/artigo.php?id=141>>. Acesso em: 22 maio 2008.

HAN, S.; EVANS, R. G.; KROEGER, M. W. Sprinkler distribution patterns in windy conditions. **Transactions of the ASAE**, v. 37, n. 5, p. 1481-1489, 1994.

HEERMANN, D.F. et al. Distribution functions to represent center-pivot water distribution. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 35, n. 5, p. 1465-1472, 1992.

HEERMANN, D.F.; HEIN, P.R. Performance characteristics of self-propelled center-pivot sprinkler irrigation system. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.11, n.1, p.11-15, 1968.

HILL, R. Energy conservation with irrigation water management. In: **UTAH STATE UNIVERSITY EXTENSIO**. Utah, 1999. Disponível em: <http://extension.usu.edu/files/publications/publication/AG_BIE_WM_02.pdf>. Acesso em: 06 out. 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - (IBGE). **Censo Agropecuário de 1995 -1996**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 05 jan. 2009.

IWA – International Water Association. Performance indicators for water supply services. **Laboratório Nacional de Engenharia Civil**, Lisboa, 2000. 200 p.

KELLER, J. **Sprinkler irrigation**. Logan: Utha State University, 1984. 621 p.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 2, p. 678-684, July/Aug. 1974.

LETEY, J.; VAUX, H. J.; FEINERMAN, E. Optimum crop water application as affected by uniformity of water infiltration. **Agronomy Journal**, Madson, v. 76, n. 3, p. 435-441, 1984.

LIMA, A. C. de. **Desenvolvimento de indicadores de eficiência energética para avaliação de pivôs centrais de irrigação**. 2008. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

LOPES, D. de C. et al. Programa computacional para adequação de força motriz considerando o remanejamento dos motores existentes. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 14, n. 1, p. 51-63, 2006.

LOPES, A. S.; BASTOS, A. R. R.; DAHER, E. Fertilizantes nitrogenados no Brasil: um problema de escassez. **Informações Agrônomicas**, n. 120, p. 65, 2007. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 21 julho 2008.

MAROUELLI, W.A.; SILVA, W.L.C. **Seleção de sistemas de irrigação para hortaliças**. Brasília: Embrapa, 1998. 15 p.

MELO, G. L. **Caracterização de sistemas de cultivo em áreas irrigadas por aspersão no Rio Grande do Sul**. 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

MELO, J. F. **Custo da irrigação por aspersão em Minas Gerais**, 1993. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1993.

MERRIAM, J.L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Logan: Utah State University. 1978. 271 p.

MICHELON, C. J. **Qualidade física de solos irrigados do Rio Grande do Sul e do Brasil central**. 2005. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

MUNDIM, P. M. **Uniformidade de distribuição de água por aspersão convencional na presença da cultura do milho**. 1996. 82 f. Dissertação – Universidade de São Paulo - ESALQ, Piracicaba, 1996.

PAHL, G. et al. **Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações**. São Paulo: E. Blücher, 2005. 411 p.

PAZ, V. P. da S.; TEODORO, R. E. F; MENDONÇA, F. C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 465-473, 2000.

PEREIRA, A. S. **Desenvolvimento de um protótipo aplicador de produtos químicos para um sistema de irrigação pivô central**. 2001. 64 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Universidade de São Paulo, ESALQ, Piracicaba, 2001.

PILLAY, P. Applying energy-efficient motors in the petrochemical industry. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 3, n. 1, p. 32–40, 1997.

ROLLAND, L. **Mechanized sprinkler irrigation**. Rome: FAO, 1982. 409 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 35).

SCHENKEL, R. **Distribuição de água do canhão final em sistema de irrigação por pivô central**. 1992. 126 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.

SENNINGER IRRIGATION INC. **Catálogo de produtos**. Disponível em: <www.Senninger.com>. Acesso em: 12 mar. 2009.

SILVA, E. M.; AZEVEDO, J. A.; LIMA, J. E. F. W. **Análise de desempenho da irrigação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. 84 p.

SILVA, D. D.; RAMOS, M. M.; MARTINEZ, M. A.; DENÍCULI, W. Uniformidade de distribuição de água em sistemas de aspersão, com utilização de aspensor fixo com placa defletora auxiliar. **Engenharia Agrícola**, v. 5, n. 4, p. 281-292, 1997.

SOLOMON, K. H. **Irrigation system selection - Center for irrigation technology : irrigation notes**. California: [s.n.], 1988. (California State University).

VALENZUELA, J. et al. **Agricultura sustentable**. Chile: Ed. Universidade Talca, 1994. 90 p.

VIEIRA, A. T. **Caracterização hidráulica de um tubo gotejador**. 1996. 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

VILELA, L. A. A. **Irrigação por autopropelido e pivô central**. Lavras: FAEPE, 1999. 82 p.

WEG. **Catálogo eletrônico de produtos**. Jaraguá do Sul, 1999. Disponível em: <<http://www.weg.com.br>>. Acesso em: 15 maio 2009.

WILLIAMS, J. R.; BULLER, G. J. D.; MANGES, H. L. A microcomputer model for irrigation system evaluation. **Southern Journal of Agricultural Economics**, Kansas, n. 87-81-J, p. 145-152, 1988.

YUNG, C. Tips for improving motor efficiency: enhancing reliability and efficiency for medium-voltage machines. **Ieee Industry Applications Magazine**, nov./dez., 2007.

ZOCOLER, J. L. Avaliação do desempenho de sistemas de irrigação In: CURSO CAPACITAÇÃO EM AGRICULTURA IRRIGADA, 1999, Ilha Solteira. **Anais...** Ilha Solteira: UNESP/FEIS, 1999, 55 p.

ZOCOLER, J. L. et al. Análise dos custos de um sistema elevatório de água em função do diâmetro da tubulação de recalque e modalidades de aplicação das tarifas de energia elétrica. **Engenharia Agrícola**, v. 4, n. 3, p. 53-67, 1999.

ZOCOLER, J. L.; FRIZZONE, J. A. Modelo de otimização de sistemas elevatórios de água – OSEA – aplicado em um sistema para suprimento de um equipamento de irrigação do tipo pivô central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: [s.n.], 2001.

ZOCOLER, J. L. Análise econômica de sistema de irrigação. In: MIRANDA, J. H. de; PIRES, R. C. de M. (Eds.). **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2003. p. 653-703 (Série Engenharia Agrícola. Irrigação; 2).