

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

**ÍNDICES DE DESEMPENHO PARA ESTAÇÕES DE  
BOMBEAMENTO EM LAVOURAS DE ARROZ  
IRRIGADO**

**TESE DE DOUTORADO**

**Luciana Marini Kopp**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

# **INDICES DE DESEMPENHO PARA ESTAÇÕES DE BOMBAMENTO EM LAVOURAS DE ARROZ IRRIGADO**

**Luciana Marini Köpp**

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

**Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Marcia Xavier Peiter**  
**Coorientador: Prof. Adroaldo Dias Robaina**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Kopp, Luciana Marini  
Índices de desempenho para estações de bombeamento em  
lavouras de arroz irrigado / Luciana Marini Kopp.-2015.  
107 f.; 30cm

Orientadora: Marcia Xavier Peiter  
Coorientador: Adroaldo Dias Robaina  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2015

1. Irrigação por inundação 2. Eficientização 3. Bombas  
hidráulicas 4. Performance I. Peiter, Marcia Xavier II.  
Robaina, Adroaldo Dias III. Título.

---

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a Luciana Marini Kopp. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: [lucianakopp@gmail.com](mailto:lucianakopp@gmail.com)

---

**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

**INDICES DE DESEMPENHO PARA ESTAÇÕES DE BOMBEAMENTO  
EM LAVOURAS DE ARROZ IRRIGADO**

elaborada por  
**Luciana Marini Kopp**

como requisito parcial para a obtenção de grau de  
**Doutor em Engenharia Agrícola**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Marcia Xavier Peiter, Dr<sup>a</sup>.** (UFSM)  
(Presidente/Orientadora)

---

**Adroaldo Dias Robaina, Dr.** (UFSM)  
(Coorientador)

---

**Airton dos Santos Alonço, Dr.** (UFSM)

---

**Fátima Cibele Soares, Dr<sup>a</sup>.** (UNIPAMPA - Campus Alegrete)

---

**Ricardo Luis Schons, Dr.** (Instituto Federal Farroupilha)

---

**João Fernando Zamberlan, Dr.** (UNICRUZ)

Santa Maria, 08 de maio de 2015.

*Ao meu filho **Marcelo** a quem privei da minha companhia em momentos importantes de sua adolescência... Anjo bom, amor perfeito!*

*Ao meu amor **Carlos Fernando**, meu companheiro de jornada... que ausente esteve sempre presente me apoiando!*

*Ao meu filho **Guilherme** que com sua ansiedade me ensinou a ser mais tolerante e paciente... amor, puro amor!*

Dedico!

## AGRADECIMENTOS

A Deus que me concedeu a vida ilumina meu caminho e me oportunizou mais esse momento de aprendizado.

Ao meu Guia Espiritual, que esteve sempre presente, que me intuiu em todo caminho, que me protegeu nos milhares de quilômetros que precisei rodar e que me ajudou a manter meu espírito em sintonia com o bem.

A Prof<sup>a</sup> Márcia Xavier Peiter, minha orientadora pelos ensinamentos, paciência, orientação e carinho.

Ao Prof. Adroaldo Dias Robaina, meu coorientador, pelos ensinamentos, atenção, orientação e profissionalismo.

Aos membros da banca de defesa de qualificação e de Tese, pela disponibilização de tempo e atenção e pelas importantes contribuições neste trabalho.

A AESSUL pela oportunidade da coleta de dados e do aprendizado nos projetos realizados.

A Unipampa, por ter me concedido a oportunidade de qualificação.

A UFSM e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade.

A UFPEL pela concessão de bolsa de iniciação a pesquisa para auxílio na elaboração desta Tese.

Aos Engenheiros Agrônomos Juliano Ritter e Cleiton José Ramão, meus ex alunos, pelas informações e motivação.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Rural da UFPEL pelo apoio no processo de Doutorado.

Aos colegas de curso. Em especial aqueles do Laboratório de Engenharia de Irrigação, que me ajudaram a ver que as relações humanas são fundamentais na busca do crescimento.

Aos Professores Breno Köpp e Maria Elisabeth Marini Köpp, meus pais, que me ensinaram o caminho do bem e a querer sempre ser feliz!

Aos meus filhos Guilherme e Marcelo... minha fonte inspiradora... pela compreensão.

Ao meu amor Carlos pela incrível logística, por acreditar em mim e me incentivar todo tempo....

A todos da minha família pelo incentivo.

A mim mesma por ter tido a coragem de fazer esta escolha aos 50 do primeiro tempo; por não ter desistido; por ter tido a paciência necessária; por ter suportado a saudade do meu marido, dos meus filhos e da minha casa; e, por ter a humildade de saber que ainda tenho muito a aprender.

*Ando devagar  
Porque já tive pressa  
E levo esse sorriso  
Porque já chorei demais*

*Hoje me sinto mais forte  
Mais feliz, quem sabe  
Só levo a certeza  
De que muito pouco sei  
Ou nada sei...*

*.....Cada um de nós compõe a sua história  
Cada ser em si  
Carrega o dom de ser capaz  
E ser feliz*

**Almir Sater**

## RESUMO

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

### INDICES DE DESEMPENHO PARA ESTAÇÕES DE BOMBEAMENTO EM LAVOURAS DE ARROZ IRRIGADO

Autora: Luciana Marini Kopp  
Orientadora: Marcia Xavier Peiter  
Santa Maria, 08 de maio de 2015.

O Estado do Rio Grande do Sul (RS) cultivou, na safra 2013/2014, 1.120.112 ha de arroz irrigado, perfazendo 46,18% da área cultivada com o cereal no Brasil, contribuindo com 66,21% da produção nacional. A região da Fronteira Oeste do RS cultivou uma área de 333.695 ha e, em 85,7% desta são utilizadas estações de bombeamento de água, fazendo com que o custo da irrigação represente 10,74% do custo total de produção deste cereal, sendo um dos mais expressivos. A eficiência do uso de energia no processo de irrigação das lavouras de arroz esta atrelada a aspectos agronômicos (definição das cultivares e escolha adequada da área) e de engenharia (escolha de bomba com rendimento adequado, motor com potência útil ajustada à necessidade, acoplamento compatível com a potência instalada, dimensionamento de tubulação, posicionamento do conjunto bomba-motor e uso de peças especiais). A falta de parâmetros que possam definir a qualidade do dimensionamento das estações de bombeamento gera insegurança em relação ao bom uso da energia no processo. Índices de desempenho são indicadores que podem ser usados para estabelecer a qualidade das estações de bombeamento, no que se refere aos aspectos de dimensionamento. Este trabalho teve como objetivo propor índices de desempenho e classificá-los de forma a gerar referências, a serem usadas para avaliação de estações de bombeamento de água em lavouras de arroz irrigado. Foram avaliadas 160 estações de bombeamento, localizadas na Fronteira Oeste do RS, em condições normais de trabalho. Para cada uma delas foram determinadas as tubulações adequadas, através de análise de minimização de custo total (fixo mais operacional) para um período de 10 anos de operação, e verificada a possível economia de energia gerada pela troca das mesmas. Da mesma forma foram propostas substituição de equipamentos (bombas e motores) buscando, entre os disponíveis comercialmente, aqueles de melhor rendimento operacional para as condições de trabalho de cada estação. Foram propostos nove índices de desempenho e aplicados as situações inicialmente encontradas em campo e aquelas otimizadas pela substituição de tubulações, bombas e motores. A variabilidade encontrada permitiu que os mesmos fossem categorizados e então proposta uma classificação de índices de desempenho como “excelente”, “muito bom”, “bom”, “ruim” e “muito ruim”.

**Palavras-chave:** Irrigação por inundação. Eficientização. Bombas hidráulicas. Performance.



## **ABSTRACT**

Doctor Teses  
Agricultural Engineering Post Graduation Program  
Santa Maria Federal University, RS, Brazil

### **PERFORMANCE INDEX FOR PUMPING STATIONS IN RICE CROP IRRIGATION**

Author: Luciana Marini Kopp  
Advisor: Marcia Xavier Peiter  
Santa Maria may 08, 2015.

The state of Rio Grande do Sul (RS) grown in crop 2013/2014, 1,120,112 ha of rice, making up 46.18% of the cultivated area in Brazil, accounting for 66.21% of national production. The Fronteira Oeste of RS cultivated an area of 333,695 ha and 85.7% of this water pumping stations are used, making the cost of irrigation represents 10.74% of the total cost of production of cereal, one of the most expressive. The efficiency of energy use in the process of irrigation of rice fields linked to this agronomic aspects (definition of cultivars and suitable choice of the area) and engineering (pump of choice with adequate efficiency, adjusted net power engine with the need, compatible coupling with installed capacity, pipe sizing, positioning the pump-motor assembly and use of special parts). The lack of parameters that can define the quality of the design of pumping stations creates uncertainty regarding the proper use of energy in the process. Performance indices are indicators that can be used to establish the quality of pumping stations, with regard to aspects sizing. This work aimed to propose performance indexes and ranks them in order to generate referrals, to be used for evaluation of water pumping stations in irrigated rice fields. We evaluated 160 pumping stations, located on the Western Border of RS, under normal working conditions. For each of them were determined appropriate piping, through total cost minimization analysis (fixed more operational) for a period of 10 years of operation, and checked the possible power savings from the same exchange. Similarly been proposed replacement of equipment (pumps and motors) seeking, among commercially available, those with higher operating efficiency for the working conditions of each season. Were proposed nine performance indices and applied situations initially found in the field and those optimized by the replacement of pipes, pumps and motors. The variability found allowed them to be categorized and then was proposed performance index rating as "excellent", "very good", "good", "bad" and "very bad".

**Keywords:** Flood irrigation. Efficiency. Hydraulic pumps. Performance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Distribuição do cultivo de arroz irrigado no RS.....	25
Figura 2.	Acoplamento por polia e correias (a) eixo horizontal e (b) eixo vertical, encontradas em Uruguaiana.....	31
Figura 3.	Aspecto da tubulação de aço soldado usada nas lavouras de arroz.....	33
Figura 4.	Peças especiais usadas em tubulações em lavouras de arroz irrigado, (a) curva de chapa de aço soldada, (b) válvula de retenção, (c) ventosa, (d) junta de dilatação, (e) esquema de junta de dilatação de pneu.....	34
Figura 5.	Posicionamento padrão de uma EB.....	34
Figura 6.	Estruturas flutuantes para sustentação de Estações de bombeamento. (a) vista do posicionamento da bomba, (b) vista da junta de dilatação na tubulação de recalque, (c) vista de acoplamento direto entre bomba e motor.....	35
Figura 7.	Fluxograma das atividades desenvolvidas para obtenção dos objetivos propostos.....	42
Figura 8.	Distribuição das áreas atendidas pelas 160 estações de bombeamento estudadas.....	55
Figura 9.	Distribuição da vazão nas 160 estações de bombeamento estudadas.....	56
Figura 10.	Distribuição da vazão unitária nas 160 estações de bombeamento estudadas.....	56
Figura 11.	Aspecto das curvas utilizadas na saída das bombas instaladas em posição com eixo horizontal.....	57
Figura 12.	Distribuição dos diâmetros das tubulações de recalque nas 160 estações de bombeamento estudadas.....	58
Figura 13.	Distribuição da velocidade na tubulação de recalque para as 160 estações de bombeamento estudadas.....	59
Figura 14.	Tubulação com elevada turbulência na saída.....	59
Figura 15.	Distribuição dos comprimentos da tubulação de recalque nas 160 estações de bombeamento estudadas.....	60
Figura 16.	Balsa usada para apoiar EB.....	62
Figura 17.	Distribuição da potencia ativa e da potência nominal para as 160 estações de bombeamento estudadas.....	63
Figura 18.	Distribuição da relação entre a potência ativa e a potência nominal para as 160 estações de bombeamento estudadas.....	64
Figura 19.	Motores elétricos encontrados em campo.....	64
Figura 20.	Distribuição das marcas de bombas encontradas entre as 160 estações de bombeamento estudadas.....	65
Figura 21.	Distribuição do rendimento global das 160 estações de bombeamento estudadas.....	67
Figura 22.	Distribuição das alturas manométricas das 160 estações de bombeamento estudadas.....	67

Figura 23. Distribuição da perda de carga percentual em relação à altura geométrica para as 160 estações de bombeamento estudadas.....	68
Figura 24. Distribuição dos diâmetros antes e após o processo de otimização das 160 estações de bombeamento estudadas.....	70
Figura 25. Distribuição das velocidades antes e após o processo de otimização das 160 estações de bombeamento estudadas.....	70
Figura 26. Distribuição do índice de desempenho $Id_0$ , antes e depois do processo de otimização para as 160 estações de bombeamento estudadas.....	75
Figura 27. Distribuição do índice de desempenho $Id_1$ , antes e depois do processo de otimização para as 160 estações de bombeamento estudadas.....	75
Figura 28. Distribuição do índice de desempenho $Id_2$ , antes e depois do processo de otimização para as 160 estações de bombeamento estudadas.....	76
Figura 29. Distribuição do índice de desempenho $Id_3$ , antes e depois do processo de otimização para as 160 estações de bombeamento estudadas.....	77
Figura 30. Distribuição do índice de desempenho $Id_4$ , antes e depois do processo de otimização para as 160 estações de bombeamento estudadas.....	78
Figura 31. Distribuição do índice de desempenho $Id_5$ , antes e depois do processo de otimização para as 160 estações de bombeamento estudadas.....	78
Figura 32. Distribuição do índice de desempenho $Id_6$ , antes e depois do processo de otimização para as 160 estações de bombeamento estudadas.....	79
Figura 33. Distribuição do índice de desempenho $Id_7$ , antes e depois do processo de otimização para as 160 estações de bombeamento estudadas.....	80
Figura 34. Distribuição do rendimento global ( $\eta_g$ ), antes e depois do processo de otimização, para as 160 estações de bombeamento estudadas.....	80
Figura 35. Distribuição das frequências relativas aos padrões de dimensionamento tendo como critério o índice $Id_0$ para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.....	103
Figura 36. Distribuição das frequências relativas aos padrões de dimensionamento tendo como critério o índice $Id_1$ para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.....	103
Figura 37. Distribuição das frequências relativas aos padrões de dimensionamento tendo como critério o índice $Id_2$ para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.....	104
Figura 38. Distribuição das frequências relativas aos padrões de dimensionamento tendo como critério o índice $Id_3$ para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.....	104
Figura 39. Distribuição das frequências relativas aos padrões de dimensionamento tendo como critério o índice $Id_4$ para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.....	105
Figura 40. Distribuição das frequências relativas aos padrões de dimensionamento tendo como critério o índice $Id_5$ para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.....	105

- Figura 41. Distribuição das frequências relativas aos padrões de dimensionamento tendo como critério o índice  $Id_6$  para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor. .... 106
- Figura 42. Distribuição das frequências relativas aos padrões de dimensionamento tendo como critério o índice  $Id_7$  para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor. .... 106
- Figura 43. Distribuição das frequências relativas aos padrões de dimensionamento tendo como critério o rendimento global ( $\eta_g$ ) para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de tubulação, bomba e motor. .... 107

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Área cultivada, produção e produtividade de arroz em quatro municípios da Fronteira Oeste e no estado do RS na safra 2013/2014 (IRGA, 2014).....	26
Tabela 2.	Diâmetros, espessura de chapa e massa dos tubos de aço soldado usados na irrigação de lavouras de arroz.....	50
Tabela 3.	Distribuição das 160 estações de bombeamento em relação a posição na linha de recalque e presença de juntas de dilatação.....	61
Tabela 4.	Potência demandada, consumo e desembolso para três situações avaliadas em 160 estações de bombeamento de água em lavouras de arroz na FO do RS. ....	72
Tabela 5.	Distribuição das 68 bombas comercialmente disponíveis e selecionadas em relação a altura manométrica correspondente ao ponto de trabalho de máximo rendimento e máxima vazão. ....	72
Tabela 6.	Distribuição das 68 bombas comercialmente disponíveis e selecionadas em relação à vazão correspondente ao ponto de trabalho de máximo rendimento e máxima altura manométrica .....	73
Tabela 7.	Grandezas medidas em situação real de funcionamento (antes) e estimadas para situação otimizada pela adequação da tubulação, bomba e motor (depois) para as 160 estações de bombeamento estudadas.....	81
Tabela 8.	Valor médio dos índices de desempenho avaliados em situação real de funcionamento (antes) e estimadas para situação otimizada pela adequação da tubulação, bomba e motor (depois) para as 160 estações de bombeamento estudadas.....	81
Tabela 9.	Proposta de padrões de dimensionamento tendo como critério o índice $Id_0$ e categorização para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor. ....	84
Tabela 10.	Proposta de padrões de dimensionamento tendo como critério o índice $Id_1$ e categorização para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor. ....	85
Tabela 11.	Proposta de padrões de dimensionamento tendo como critério o índice $Id_2$ e categorização para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor .....	85
Tabela 12.	Proposta de padrões de dimensionamento tendo como critério o índice $Id_3$ e categorização para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor. ....	86
Tabela 13.	Proposta de padrões de dimensionamento tendo como critério o índice $Id_4$ e categorização para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor .....	87
Tabela 14.	Proposta de padrões de dimensionamento tendo como critério o índice $Id_5$ e categorização para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor. ....	88

Tabela 15. Proposta de padrões de dimensionamento tendo como critério o índice $Id_6$ e categorização para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor. ....	88
Tabela 16. Proposta de padrões de dimensionamento tendo como critério o índice $Id_7$ e categorização para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor. ....	89
Tabela 17. Proposta de padrões de dimensionamento tendo como critério o rendimento global ( $\eta_g$ ) e categorização para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor. ....	91
Tabela 18. Classificação dos índices propostos para projetos e diagnósticos de estações de bombeamento para lavouras de arroz irrigado.....	92
Tabela 19. Relação entre índices estudados .....	93
Tabela 20. Relação entre índices de desempenho e grandezas avaliadas .....	94

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Índices de desempenho usados para avaliar o funcionamento das 160 EB estudadas.....	47
Quadro 2. Grandezas utilizadas para definir os dez índices de desempenho propostos para uso em estações de bombeamento de água em lavouras de arroz irrigado.....	73
Quadro 3. Relação dos índices de desempenho estudados e as grandezas envolvidas em sua determinação. ....	92

## **LISTA DE APÊNDICES**

- Apêndice 1. Planilha utilizada para determinação do diâmetro adequado a condição técnica e econômica, para as EB estudadas. .... 102
- Apêndice 2. Figuras que caracterizam a distribuição das categorias dos índices estudados..... 103



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\rho$	massa específica
$\gamma$	peso específico
$\eta_{\text{global}}$	rendimento global
AMT	altura manométrica total
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
A	área
C	coeficiente de rugosidade de Hazzen- Williams
c	consumo
$C_d$	custo do quilowatt em demanda
$C_f$	custo fixo
$C_{\text{HP}}$	custo do quilowatt hora em horário reservado de portaria
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
$C_{\text{TH}}$	custo do quilowatt hora em tarifa horosazonal verde
d	diâmetro
$D_r$	diâmetro de recalque
$D_s$	diâmetro de sucção
EB	estações de bombeamento
FO	fronteira oeste
FS	fator de serviço
h	hora
hg	altura geométrica
ha	hectare
hgs	altura geométrica de sucção
hgr	altura geométrica de recalque
I	corrente elétrica
$Id_0$	índice de desempenho 0
$Id_1$	índice de desempenho 1
$Id_2$	índice de desempenho 2
$Id_3$	índice de desempenho 3
$Id_4$	índice de desempenho 4

Id <sub>5</sub>	índice de desempenho 5
Id <sub>6</sub>	índice de desempenho 6
Id <sub>7</sub>	índice de desempenho 7
IRGA	Instituto Rio Grandense do Arroz
k	quilo
L	comprimento
L <sub>s</sub>	comprimento da tubulação de sucção
L <sub>r</sub>	comprimento da tubulação de sucção
L	litro
L <sub>virtual</sub>	comprimento virtual
m	metro
N	número de diâmetros equivalente ao comprimento virtual da peça especial
n	rotação
NBR	Norma Brasileira
n <sub>s</sub>	velocidade específica
p	preço do Kg da chapa de aço
P <sub>ativa</sub>	potência ativa
P <sub>hid</sub>	potência hidráulica
Q	vazão
R\$	Real
rpm	rotação por minuto
RS	Rio Grande do Sul
S	segundo
V	Volt
Vol	volume
W	Watt

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
1.1 Objetivos.....	23
1.1.1 Objetivo geral.....	23
1.1.2 Objetivos específicos .....	23
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>25</b>
2.1 Produção de arroz irrigado.....	25
2.2 Irrigação da lavoura de arroz .....	26
2.3 Estações de bombeamento (EB) .....	28
2.3.1 Bombas.....	28
2.3.2 Motores .....	29
2.3.3 Transmissão .....	30
2.3.4 Tubulações .....	31
2.3.5 Peças especiais .....	33
2.3.6 Posicionamento das estações de bombeamento .....	34
2.4 Eficiência no uso da energia .....	35
2.5 Rendimento global .....	37
2.6 Estrutura tarifária de energia.....	38
2.7 Índices de desempenho .....	39
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>41</b>
3.1 Coleta de dados das estações de bombeamento selecionadas.....	41
3.2 Análise dos dados coletados com ênfase na eficiência energética do sistema.....	43
3.2.1 Altura manométrica.....	44
3.2.2 Potência hidráulica .....	44
3.2.3 Potência ativa .....	45
3.2.4 Rendimento global .....	45
3.2.5 Índices de desempenho .....	46
3.3 Projeto de adequação para as estações de bombeamento selecionadas .....	49
3.4 Análise comparativa entre as estações de bombeamento selecionadas e as projetadas.....	52
3.4.1 Classificação dos índices de desempenho.....	52
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>54</b>
4.1 Caracterização das estações estudadas.....	54
4.1.1 Área atendida .....	54
4.1.2 Vazão.....	54
4.1.3 Tubulações .....	57
4.1.4 Estruturas de apoio.....	61

4.1.5 Potência ativa e nominal .....	62
4.1.6 Bombas.....	65
4.1.7 Rendimento global .....	66
4.1.8 Altura manométrica.....	66
4.2 Adequação das estações de bombeamento .....	68
4.2.1 Tubulações e velocidade .....	69
4.2.2 Escolha de bombas e motores .....	71
4.2.3 Índices de desempenho calculados a partir dos projetos.....	73
4.3 Análise comparativa dos índices de desempenho .....	81
4.4 Proposta de índices de desempenho e suas classes, para estações de bombeamento. ....	82
4.4.1 Índice de desempenho $Id_0$ ( $W ha^{-1} m^{-1}$ ).....	83
4.4.2 Índice de desempenho $Id_1$ ( $kW ha^{-1}$ ).....	84
4.4.3 Índice de desempenho $Id_2$ ( $kWh ha^{-1}$ ).....	85
4.4.4 Índice de desempenho $Id_3$ ( $kWh m^{-3}$ ).....	86
4.4.5 Índice de desempenho $Id_4$ ( $kW (m^3 s^{-1})^{-1} m^{-1}$ ).....	87
4.4.6 Índice de desempenho $Id_5$ ( $kW (m^3 s^{-1})^{-1} m^{-1}$ ).....	87
4.4.7 Índice de desempenho $Id_6$ ( $W ha^{-1} m^{-1}$ ).....	88
4.4.8 Índice de desempenho $Id_7$ ( $kWh m^{-3}(100m)^{-1}$ ).....	89
4.4.9 Índice de desempenho- rendimento global ( $\eta_g$ (%)) .....	90
4.5 Análise conjunta dos índices de desempenho .....	91
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>95</b>
<b>6 RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>96</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>97</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A irrigação é uma prática que permite a obtenção de produtividade superior a do cultivo de sequeiro, quando todos os demais aspectos técnicos são atendidos. O Brasil apresenta, segundo IBGE (2006), cerca de 29,5 milhões de hectares aptos ao cultivo irrigado, sem causar dano ambiental. Atualmente, segundo dados da Agência Nacional de Águas (ANA), são 5,5 milhões de hectares irrigados no País sendo as culturas mais expressivas: cana-de-açúcar (1,7 milhão de hectares); arroz (1,1 milhão de hectares); soja (624 mil hectares); milho em grão (559 mil hectares) e o feijão de cor (195 mil hectares). O estado que concentra a maior área de lavouras irrigadas é o Rio Grande do Sul (RS) com mais de um milhão de hectares, onde a cultura de maior expressão é o arroz, sendo o seu cultivo disperso em praticamente todo estado, com a maior concentração na FO. No Brasil a produtividade média de arroz na safra 2013/2014 foi de 5208 kg ha<sup>-1</sup>, enquanto o RS colheu em média 7.251 kg ha<sup>-1</sup> em 1.120.112 ha cultivadas (CONAB, 2014).

As lavouras do RS são irrigadas pelo sistema de irrigação superficial, com inundação contínua que se caracteriza por baixa eficiência. Se associa ao elevado consumo de água o uso significativo de energia, em função de que em mais de 85,7% das áreas a adução é feita por sistemas de bombeamento eletromecânicos, através de conjuntos elevatórios, para posterior distribuição do ponto mais alto da área (IRGA, 2006).

O uso expressivo dos insumos energia e água, na lavoura de arroz, tem sido criticado por órgãos ambientalistas que indicam esta cultura como causadora de alto impacto ambiental. Pesquisas agrônômicas têm procurado reduzir os volumes de água utilizados ou aumentar a eficiência de uso da água, produzindo uma maior quantidade de grãos por unidade de volume de água utilizado, através do desenvolvimento de cultivares de porte mais baixo, ciclo mais curto e mais resistentes ao frio. Isso indiretamente conduz a diminuição do uso de energia. Alguns trabalhos foram conduzidos objetivando analisar a energia consumida em estações de bombeamento (EB) em lavouras de arroz, porém escassas publicações foram geradas podendo-se citar: Marcolin e Robaina (2002) que estudaram EB na região central do estado do RS, Ocácia et al. (2002) que levantaram dados relativos a Fronteira Oeste (FO) do RS, Corrêa (2007) que estudou a relação da área irrigada com a vazão e a potência consumida, Moises (2009) que estudou EB na região de Cachoeira do Sul, Ritter (2011) que abordou aspectos relacionados a antes e depois do processo de eficiência na FO e Ramão (2011) que efetuou um diagnóstico de EB no município de Itaqui.

A irrigação é dos itens de maior impacto respondendo diretamente, segundo IRGA (2014), por 10,74% do custo de produção de arroz irrigado. Este, apesar de ser considerado alto pelos produtores, é reduzido pelo fato de termos no país uma política de subsídio ao custo de energia, em sistemas agrícolas irrigados, através da resolução normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010 (artigo 107) da Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Assim, a substituição de itens (bomba, motor, tubulação) apresenta baixa viabilidade econômica, pois o custo da energia elétrica desperdiçada faz com que o período de retorno de investimentos em equipamentos novos seja muito alto.

A falta de parâmetros que determinem ou indiquem o bom dimensionamento dos sistemas dificulta a avaliação dos mesmos. O empirismo é fator determinante nos dimensionamentos que, por serem sazonais, não são planejados para suprir as necessidades específicas das lavouras, ou seja, possuem parâmetros de dimensionamento variáveis de safra para safra, ajustando-se a disponibilidade de água e a alteração de local dentro de um rodízio de áreas usual no sistema produtivo de arroz irrigado. Além disso, a inexistência de planejamento, por parte de profissional habilitado, leva muitas vezes a projetos inadequados pela opção de tubulação e/ou equipamentos que não atendem da melhor forma a necessidade em função de aspectos comerciais, ou também pelo improviso no uso dos mesmos.

O processo de elevação de água em lavouras de arroz é realizado por EB com características singulares em relação às instalações convencionais. Além disso, a expressividade da área irrigada, em relação ao restante do país, e os volumes de água e de energia utilizados no processo justificam estudos que permitam otimizar o uso destes recursos.

O uso de indicadores que envolvam grandezas hidráulicas e elétricas pode auxiliar no diagnóstico de EB, tanto em funcionamento, quanto em projetos de novos conjuntos. Neste sentido índices de desempenho são uma ferramenta de avaliação já utilizados em diversos segmentos da engenharia. A inexistência de índices de desempenho para avaliação de EB em lavouras de arroz irrigado motiva este trabalho, que sistematiza informações estabelecendo parâmetros para avaliar o processo de irrigação das lavouras de arroz na FO do RS e ao mesmo tempo indica padrões a serem usados como sinalizadores da qualidade do dimensionamento focados na otimização do uso do recurso energético.

As seguintes hipóteses foram norteadoras deste trabalho:

- Quantificando grandezas hidráulicas, elétricas e físicas de estações de bombeamento é possível associá-las determinando índices que indiquem o desempenho das mesmas,

em relação ao uso de energia no processo de bombeamento da água, permitindo compará-las.

- Se a tubulação, bomba e motor usados no processo de bombeamento são elementos que determinam a quantidade de energia usada para atender uma necessidade, então esses elementos quando bem escolhidos podem otimizar o uso da energia, contribuindo para um processo mais eficiente.
- Se forem definidos parâmetros que indiquem a qualidade do desempenho de uma estação de bombeamento é possível identificar o seu padrão de dimensionamento com vista a avaliar projetos e diagnosticar situações operacionais.

Com foco nas hipóteses apresentadas foram elaborados os objetivos deste trabalho a seguir descritos.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Propor classificação de índices de desempenho (ID) para as estações de bombeamento de água, usadas em irrigação superficial, de forma a permitir identificar seu padrão de dimensionamento com foco no uso eficiente da energia no processo de irrigação.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Em relação a estações de bombeamento de água utilizadas para irrigação de lavouras de arroz, pretende-se:

- a) Descrever as características dos sistemas de bombeamento em uso em relação aos aspectos de concepção e funcionamento.
- b) Otimizar o dimensionamento buscando a tubulação, bomba e motor adequados as necessidades operacionais, entre as possibilidades disponíveis no mercado, com foco na redução de uso de energia.
- c) Identificar a possível economia através da comparação da situação encontrada em campo com aquela otimizada .

- d) Determinar índices de desempenho que possam representar o padrão de dimensionamento das estações de bombeamento e permitam a comparação em diferentes situações físicas.
- e) Classificar os índices de desempenho de forma a permitir a identificação do padrão de dimensionamento de estações de bombeamento em lavouras de arroz.



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Produção de arroz irrigado

A lavoura de arroz irrigado do RS cultivou 1.120.112 ha na safra 2013/2014, correspondendo a 46,18% da área cultivada no país (2.425.300 ha). O total produzido representa 66,21% e a produtividade ( $7.251 \text{ kg ha}^{-1}$ ) foi 39,2% superior a obtida nacionalmente ( $5.208 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Dentre os cultivos irrigados de verão no RS o arroz destaca-se por sua área e produção. Observa-se na Figura 1 que a maior concentração de área produtiva localiza-se na FO, onde estão 4 dos 10 municípios de maior produção nacional: Uruguaiiana (5,1%), Itaqui (4,8%), Alegrete (4,0%) e São Borja (3,2%) (CONAB, 2014). A Tabela 1 apresenta a área, produção e produtividade destes municípios, da região da FO e do estado do RS.

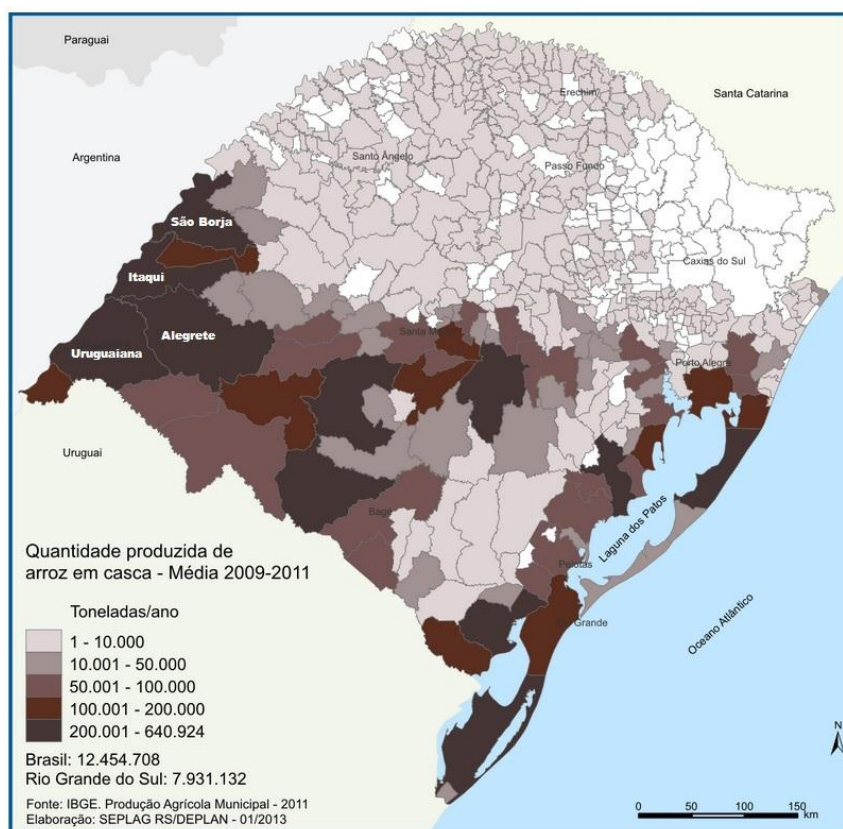


Figura 1. Distribuição do cultivo de arroz irrigado no RS.

Tabela 1. Área cultivada, produção e produtividade de arroz em quatro municípios da Fronteira Oeste e no estado do RS na safra 2013/2014 (IRGA, 2014).

Local	Área (ha)	Produção (Mg)	Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> )
Alegrete	62.842	477.677	7.601
Itaqui	97.030	712.678	7.385
São Borja	51.853	402.644	7.765
Uruguaiana	105.248	879.307	8.355
Fronteira Oeste	333.695	2.609.789	7.833
Estado RS	1.120.112	8.116.669	7.251

As lavouras de arroz do RS são potencialmente produtivas em função da adoção da irrigação como prática usual, da disponibilidade de recursos naturais (água e radiação solar) e da evolução de aspectos técnicos relacionados a genética e manejo desenvolvidos nas últimas décadas.

Aspectos agronômicos têm sido estudados visando reduzir o uso de água nas lavouras de arroz (EBERHARDT, 1994; MARCOLIN; MACEDO, 2001; STONE, 2005; CORRÊA, 2007, SARTORI, 2013) evidenciando ser possível atingir altos rendimentos de grãos com volumes de água inferiores aos comumente utilizados, em torno de 12.000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (VIANNA, 1997), quando as condições de adequação da área e manejo da água são melhoradas.

Entre 1975 e 2005, o Brasil reduziu a área de plantio em torno de 26% e, mesmo assim, aumentou sua produção de arroz em 69%, graças ao aumento de 128% na produtividade média (MAPA, 2014). No entanto escassos são os trabalhos que avaliam as EB como fonte potencial de redução de uso de água e de energia elétrica. Produzir mais gastando menos é o objetivo do sistema produtivo de arroz irrigado.

## 2.2 Irrigação da lavoura de arroz

O RS é o estado que concentra a maior área de lavouras irrigadas com mais de um milhão de hectares, em seguida estão São Paulo (770 mil hectares), Minas Gerais (525 mil hectares), Bahia (299 mil hectares) e Goiás (270 mil hectares) (MIN, 2013).

O método de irrigação adotado nas lavouras de arroz no RS é de irrigação superficial por inundação contínua onde a água é colocada no tabuleiro mais elevado e após ter sua lâmina estabelecida, passa ao tabuleiro imediatamente inferior, e assim por diante, até o último.

A adução de água é feita por sistemas de bombeamento eletromecânicos que a captam de reservatórios, rios ou arroios e conduzem até o ponto de distribuição de onde passa a ser conduzida em canais de terra. No RS 79% das EB são acionadas por motores elétricos, 6,7% por motores Diesel e 14,3% usam o desnível natural do terreno (IRGA, 2006).

Segundo Stone (2005) 76% das lavouras de arroz irrigado do país estão localizadas no RS, onde há predomínio de utilização de tabuleiros em contorno, que requerem menor sistematização do solo sendo geralmente feito apenas um aplainamento visando eliminar as irregularidades excessivas do terreno.

O dimensionamento dos conjuntos elevatórios é realizado com base na vazão unitária requerida que por sua vez é dependente da lâmina adotada, tempo de bombeamento diário, aspectos físicos do solo e da topografia da área irrigada. Estudos têm sido conduzidos visando identificar o volume total e a vazão unitária a ser usada para manter produtividade com menor uso de água na produção do arroz irrigado, de forma a aumentar a eficiência do uso da água (STONE, 2005; SARTORI et al., 2013).

A Sociedade Sul Brasileira de Arroz Irrigado (SOSBAI, 2012) recomenda vazões unitárias entre 1,0 e 1,4 L s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> o que induz a um volume utilizado da ordem de 6.048 a 12.096 m<sup>3</sup>, considerando-se um período de irrigação de 80 a 100 dias e jornada de 21 horas de irrigação diária, respeitando o horário de ponta, pelo uso da tarifa horo sazonal verde. Marcolin e Macedo (2001) avaliando a média de cinco safras consecutivas totalizaram o uso de 8.000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, com vazão unitária de 1,06 L s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>. Gomes et al. (2004) indicaram vazões unitárias de 1,5 a 2,0 L s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> de 80 a 100 dias perfazendo um volume total de 9.072 a 15.120 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ciclo. Stone (2005) afirma que a adoção de cultivares precoces, altamente produtivas, tem contribuído para aumentar em 2,5 a 3,5 vezes a produtividade da água na Ásia e que o ajuste de práticas culturais, como melhor manejo de nutrientes e de plantas daninhas, resultou em maiores produtividades do arroz, sem que a quantidade de água usada tenha aumentado. Assim evidenciamos que aspectos agronômicos são de relevância no uso racional do recurso hídrico para produção do arroz sob sistema de irrigação por inundação com lâmina contínua, sistema predominantemente utilizado no cultivo deste cereal.

Sob o aspecto de engenharia, os fatores determinantes do uso de água são a vazão adotada e o tempo de bombeamento, sendo possível altera-los desde que sejam atendidas as necessidades agronômicas do processo.

A irrigação das lavouras de arroz é normalmente conduzida em regime de 21 horas diárias de bombeamento de água, durante um período que varia de 80 a 100 dias, dependendo

do ciclo da cultivar, de aspectos relacionados ao clima do ano agrícola de cultivo e das características físicas do solo.

### 2.3 Estações de bombeamento (EB)

As EB usadas nas lavouras de arroz são compostas de uma bomba hidráulica, um motor de acionamento, um sistema de transmissão mecânica, tubulações de sucção e de recalque, peças especiais e um sistema de suporte. A seguir são apresentadas as características de cada um destes itens componentes.

#### 2.3.1 Bombas

As bombas utilizadas na FO do RS, para irrigação de arroz, apresentam em sua maioria a característica de serem do tipo turbo bombas com fluxo radial, transportando grandes vazões a médias alturas podendo apresentar rendimentos superiores a 85%. As perdas de energia produzidas pela bomba se dividem em internas, que ocorrem pelo movimento do fluido, e externas que são aquelas que ocorrem nos mancais e elementos de vedação (ANDRADE FILHO, 2012).

As bombas se classificam, de acordo com sua velocidade específica ( $\eta_s$ ) (equação 1) em radial centrífuga lenta ( $\eta_s < 80$ ), radial centrífuga normal ( $80 < \eta_s < 150$ ), radial centrífuga rápida ( $150 < \eta_s < 365$ ), mista ( $365 < \eta_s < 547$ ), semiaxial ( $547 < \eta_s < 1095$ ), axial ( $\eta_s > 1095$ ) (CARVALHO; OLIVEIRA, 2008). A eficiência da bomba está relacionada a  $\eta_s$  e a vazão recalçada pela mesma, sendo que os mais altos rendimentos são obtidos para a vazões superiores a  $650 \text{ L s}^{-1}$  e  $\eta_s$  entre 40 e 60 rpm (ANDRADE FILHO, 2012). Em muitas situações as bombas axiais poderiam apresentar rendimento superior ao encontrado pelo improviso de usar uma bomba radial em situações de baixas alturas e elevadas vazões. Este fato é relatado por Moises (2009) que observou esta prática na região de Cachoeira do Sul - RS. No entanto, a condição de rodízio de áreas faz com que seja feita opção pelas bombas radiais que se adaptam as necessidades futuras.

$$\eta_s = 3,65 \cdot \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{AMT^{3/4}} \quad (1)$$

Onde:

$\eta_s$  é a velocidade específica (rpm);

$n$  é a rotação da bomba (rpm);

$Q$  é a vazão ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );

AMT é a altura manométrica total (m).

### 2.3.2 Motores

Os motores elétricos instalados atualmente em EB são de categoria N e de alto rendimento para atenderem a Portaria Nº 553 da Lei de Eficiência Energética Nº 10.295 que entrou em vigor em dezembro de 2009. Moreira (2008) observou uma economia de 7,5% quando do uso de motores de alto rendimento comparativamente a motores standard. Já Zocoler et al. (2013) estudando a viabilidade de substituição de motores standard por motores de alto rendimento, em pivô central, concluiu não existir retorno econômico para usuários de tarifa horosazonal verde.

A maioria dos motores em uso são do tipo standard e muitos deles rebobinados mais de uma vez, pois a energia fornecida não possui estabilidade havendo rotineiramente quedas de tensão que produzem elevação da corrente elétrica e avaria dos mesmos. A rebobinagem (recondicionamento) é uma prática que por si só pode reduzir a eficiência do motor de 3 a 4% (ELETROBRAS, 2014).

A utilização de motores elétricos com potencia ativa superior a sua potencia nominal é uma situação presente nas EB em lavouras de arroz, fato que ocorre pela variação da altura geométrica ao longo do ciclo de irrigação, com conseqüente aumento da altura manométrica. Neste sentido é importante conhecer o fator de serviço (FS) que é o fator que, aplicado à potência nominal, indica a carga permissível que pode ser aplicada continuamente ao motor, sob condições especificadas. Em relação a sobre carga da potência nominal a NBR 7094 dispõe que deva ser indicado na placa do motor o Fator de serviço que pode variar de 1,0 a 1,25, conforme a característica do mesmo.

Oliveira Filho et al. (2010) estudaram o uso de motores elétricos em relação ao seu dimensionamento, e concluíram que o uso de fatores de segurança leva a superdimensionamento e conduzem a diminuição da eficiência desses equipamentos motrizes. No estudo que conduziram encontraram potências superestimadas da ordem de 15 a 88% das potencias demandadas. Também avaliaram a bitola dos fios de ligação em instalações

elétricas rurais e concluíram que o uso de bitolas maiores podem gerar economia de energia por reduzir as perdas no sistema de distribuição.

As chaves de ligação dos motores elétricos, atualmente utilizadas, são do tipo soft-starter que produzem o ligamento dos mesmos em rampa suave, permitindo a eliminação do registro de gaveta, anteriormente usado na saída da bomba para produzir inclusão suave da carga através da sua abertura gradual. Estas chaves tem apresentado bom resultado, pois seu funcionamento se dá em curto espaço de tempo, apesar de serem um dispositivo eletrônico e portanto sujeito a dificuldade operacional pela variação da tensão comum na rede elétrica.

### 2.3.3 Transmissão

O processo transmissão de energia entre o motor elétrico e a bomba, pode ser feito por acoplamento direto com luva elástica, quando a rotação da bomba for igual a rotação do motor de acionamento, ou então por acoplamento mecânico com polias e correias (Figura 2), quando a rotação da bomba diferir daquela do motor (CARVALHO; OLIVEIRA, 2008).

As bombas utilizadas em lavouras de arroz, operam em baixas rotações (< 1800 rpm) o que implica no uso de acoplamento por polias e correias. Este acoplamento gera perdas energéticas e pode ser substituído por alteradores de rotação, denominados inversores de frequência que modificam a rotação do eixo do motor e conseqüentemente do eixo da bomba.

A rotação da bomba, em alguns casos, chega a valores abaixo de 500 rpm o que dificulta o uso direto de inversores de frequência que possuem valores limites para alteração da rotação do eixo motriz, o que em algumas situações faz com que seja alterada a rotação por polias e correias e instalado inversor de frequência para ajustar pequenas variações de rotação da bomba.

Moreira (2008) comparando a energia consumida quando do uso de inversores de frequência e de válvulas estranguladoras, para variação de vazão, observou uma economia de 71% no consumo de energia, enquanto Moraes et al. (2011) obtiveram economias variando de 7 a 62%. Loureiro (2009) associou o uso de software para monitoramento das grandezas hidráulicas e elétricas, encontrando uma economia de 55% de energia no sistema que usou inversor de frequência para alterar a rotação do motor de acionamento em detrimento daquele em que foi usada válvula de estrangulamento para controle da vazão. Assim observa-se a possibilidade de economia pelo uso de inversor de frequência para alteração na vazão, em substituição ao acoplamento por polias e correias. Porém tanto Moreira (2008) quanto

Loureiro (2009) indicam a necessidade de estudos que comprovem a viabilidade econômica do uso deste equipamento.

Os inversores de frequência começam a ser utilizados na lavoura de arroz, no entanto, a baixa qualidade da energia fornecida ainda é um fator limitante ao seu funcionamento por ser um equipamento eletrônico que necessita de estabilidade de tensão por todo período de funcionamento, diferentemente das chaves de ligação tipo soft-starter que também são eletrônicas porém são acionadas por períodos curtos.



Figura 2. Acoplamento por polia e correias (a) eixo horizontal e (b) eixo vertical, encontradas em Uruguiana.

#### 2.3.4 Tubulações

As tubulações usadas como adutoras nas lavouras de arroz irrigado no RS são feitas a partir de chapas de aço dobrada e soldada, em tamanhos específicos (Figura 3). Este processo é usado em função dos diâmetros utilizados (raramente menor de 320 mm) que implicaria em custo de frete elevado caso a opção fosse por tubos prontos, em função de não haver indústria de tubulações na região. O transporte das chapas é menos oneroso. Os diâmetros mais usados são os de 640 mm e de 480 mm, que correspondem a dobra das chapas de 1,50 m e 2,0 m, respectivamente.

As tubulações de aço carbono são feitas com chapa plana calhandrada no sentido do comprimento e com costura (solda) no sentido longitudinal (Figura 3). De acordo com Carvalho e Oliveira (2008) estes tubos apresentam qualidade inferior aos tubos sem costura.

Segundo Carvalho e Oliveira (2008) o dimensionamento da tubulação é um processo hidraulicamente indeterminado, que muitas vezes é resolvido assumindo uma restrição, sendo a maioria dos casos adotada uma velocidade máxima. Azevedo Netto et al.(1998) afirmaram que o critério econômico, que busca o diâmetro mais vantajoso, conduz a velocidades na faixa de 0,75 a 1,50 m s<sup>-1</sup>, enquanto Monachesi (2005) indica a NBR 12.214 como orientadora para valores de velocidade em tubulações indicando 1,5 m s<sup>-1</sup> como limitante para tubulações com diâmetro igual ou superior a 0,40 m. Assim pode-se inferir a necessidade de estudo com relação aos critérios usados na determinação dos diâmetros, pois atualmente é usado o critério da velocidade limite de 1,5 m s<sup>-1</sup>. Marcolin e Robaina (2002) estudando 21 EB na região central do RS encontraram a velocidade média de 2,58 m s<sup>-1</sup>, e indicam este fato como determinante para elevado consumo energético. Robaina et al. (2004) e Perroni et al. (2011) propuseram metodologias para determinação do diâmetro ótimo de recalque de EB de água para irrigação buscando o equilíbrio entre custo fixo e custo operacional. A análise do diâmetro e da velocidade não é simplista, e deve buscar o diâmetro econômico através da minimização do custo total devendo levar em conta fatores relativos ao custo fixo e ao custo operacional, dentro de um período de tempo correspondente a vida útil da tubulação (CARVALHO; OLIVEIRA, 2008).

A tubulação é um dos principais aspectos relatados como causa de excesso de perdas de energia em diversos trabalhos (MARCOLIN; ROBAINA, 2002; VIANNA, 1997; KAYA et al., 2008; ARNS, 1995; MOISES, 2009), pois é subdimensionada pela priorização do critério do desembolso na aquisição da mesma, de forma que o produtor analisa apenas o custo fixo inicial e não avalia o custo operacional. Este problema está fortemente atrelado ao fato de que a maioria (62,7%) das lavouras da FO do RS são conduzidas em terras arrendadas (IRGA, 2006), com contratos raramente superiores a 10 anos.

O comprimento das tubulações também é um fator que contribui para determinação da altura manométrica de projeto e conseqüentemente da potência necessária para acionar a bomba e recalcar a vazão na altura necessária. Neste sentido é usual a redução da tubulação com substituição de trechos longos por canais em terra elevados. Ramão (2011) verificou que 87% das EB trabalham com comprimento de tubulação menor que 300m.





Figura 3. Aspecto da tubulação de aço soldado usada nas lavouras de arroz.

#### 2.3.5 Peças especiais

Nas tubulações são empregadas peças especiais, também chamadas de acessórios que tem a finalidade de realizar ampliações ou reduções, alterar a direção do fluxo (curvas), restringir o fluxo (válvulas/ registros), impedir o retorno de água (válvula de retenção), admitir entradas de ar (ventosas), permitir a dilatação da tubulação (juntas de dilatação), além de outras. Estas peças devem ser usadas com parcimônia, pois produzem perdas de energia que aumentam a altura manométrica total do sistema e conseqüentemente o consumo energético.

Algumas peças especiais, usadas nas EB de água em lavouras de arroz irrigado, são apresentadas na Figura 4. As peças apresentadas são de construção artesanal. As juntas de dilatação são confeccionadas com pneus de caminhões e/ou tratores usados, respeitando-se a resistência dos mesmos, especialmente no que se refere a EB cuja altura manométrica de projeto

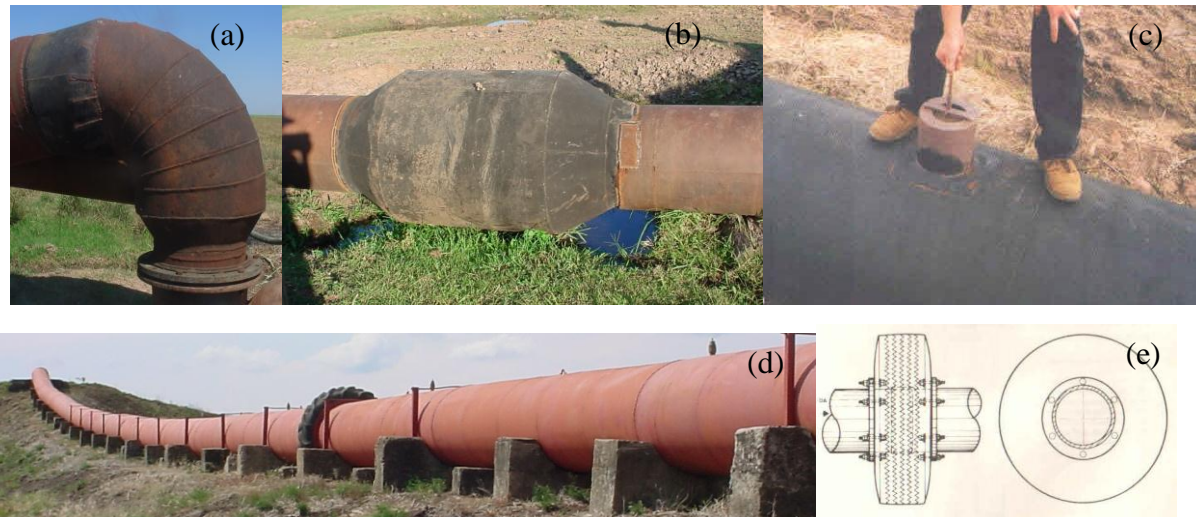


Figura 4. Peças especiais usadas em tubulações em lavouras de arroz irrigado, (a) curva de chapa de aço soldada, (b) válvula de retenção, (c) ventosa, (d) junta de dilatação, (e) esquema de junta de dilatação de pneu.

### 2.3.6 Posicionamento das estações de bombeamento

As EB normalmente são instaladas assumindo o posicionamento padrão sugerido por Azevedo Netto (1998), Carvalho e Oliveira (2008), Macintyre (1987) que está apresentado na Figura 5.

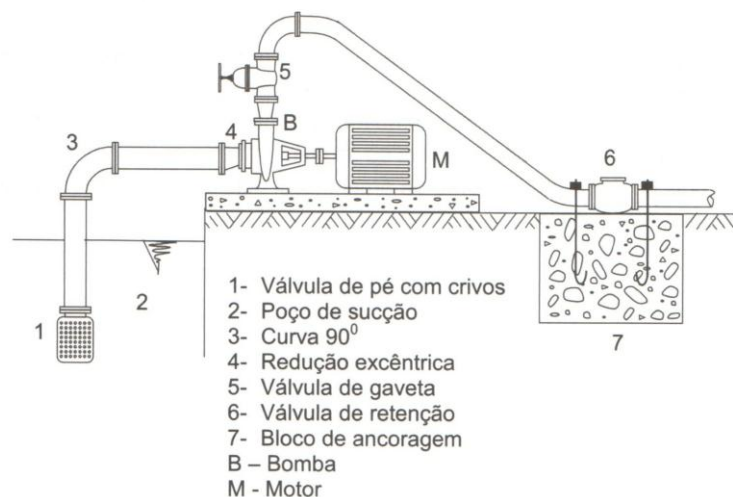


Figura 5. Posicionamento padrão de uma EB.

Fonte: Carvalho e Oliveira (2008).

Nas lavouras de arroz, alterações de posicionamento foram feitas com o objetivo de reduzir perdas de energia e facilitar o funcionamento da sucção com redução das possibilidades de cavitação, mas estas observações não estão publicadas. Um exemplo que pode ser citado é o uso de estruturas flutuantes para que a voluta da bomba fique posicionada no nível da água, de forma que a altura geométrica de sucção se mantém nula durante todo o processo de bombeamento, havendo alteração na altura geométrica de recalque causada pela variação de nível da fonte de água (Figura 6). Ramão (2011) observou em seu estudo que 50% dos conjuntos elevatórios operam em estruturas flutuantes e 85% operam com eixo vertical.



Figura 6. Estruturas flutuantes para sustentação de estações de bombeamento. (a) vista do posicionamento da bomba, (b) vista da junta de dilatação na tubulação de recalque, (c) vista de acoplamento direto entre bomba e motor.

## 2.4 Eficiência no uso da energia

A eficiência do uso da energia em instalações de bombeamento, segundo Loureiro (2009) pode ser obtida de duas formas: pelo uso de instalações adequadas ou pela redução do consumo de água. Monachesi (2005) afirmou que as oportunidades de economia estão, em 70% dos casos, associadas a redução dos volumes de água recalcados, enquanto Gomes e Bezerra (2012) atrelam o alto consumo de energia a baixos rendimentos dos equipamentos (bomba, motor e transmissão mecânica), altura manométrica desnecessária e altos volumes de água bombeados. Correa (2007) concluiu que o parcelamento da área irrigada contribui para redução da água usada e da energia consumida no processo de produção de arroz irrigado.

O desperdício de energia em EB de lavouras de arroz no RS segundo Viana (1997) é de mais de 50% sendo causado por uma combinação de: excessivo consumo de água (em média 20% acima do necessário), altura manométrica muito alta (falhas no dimensionamento), baixo rendimento da transmissão mecânica entre motor e bomba e por rendimento baixo do equipamento (má escolha da bomba e/ou motor). Uma das possíveis causas de alta altura manométrica é o cultivo em áreas cujo desnível geométrico seja elevado,

no entanto este aspecto tem sido pontual pois Arns (1995) encontrou a altura geométrica média de 12,08 m em 642 EB e Ramão (2011) observou que em 66% dos casos a altura geométrica de recalque ficou abaixo de 15m.

A escolha de equipamentos e acessórios que compõem o sistema de irrigação é fundamental para o melhor aproveitamento dos insumos. Estudando EB em lavouras de arroz, Arns (1995) afirmou ser possível reduzir em 24% o consumo de energia, na FO do RS, com redimensionamento da perda de carga, e que a substituição das bombas com no mínimo 80% de rendimento poderia levar a economia de 44% de energia. Juntando-se as duas ações poder-se-ia obter a redução de 56% na energia consumida.

Marcolin e Robaina (2002), estudando 21 EB na região central do RS, concluíram haver um potencial de economia de 41% de energia elétrica através do redimensionamento das perdas de carga e substituição das motobombas utilizadas.

Ocacia et al (2002) analisando 138 EB, em lavouras de arroz, na FO do RS, verificaram 47% de eficiência no uso da energia e atribuíram este baixo índice aos seguintes fatores: tubulações mal dimensionadas, utilização de bombas de baixa eficiência, falta de manutenção, super dimensionamento de bombas, bombas mal instaladas e baixo fator de potência. Os mesmos autores citam que o principal fator do consumo excessivo de energia é o mau dimensionamento das tubulações.

Oliveira Filho et al. (2011) desenvolveram uma metodologia para diagnosticar energeticamente sistemas de captação de água com vistas ao abastecimento da irrigação. Dentre as ações propostas e que mais impactaram a redução de custos energéticos foram: (i) o redimensionamento de bombas e motores e (ii) o enquadramento e a otimização tarifária. Os autores obtiveram um potencial de economia com energia elétrica de 52,25%. Também Rocamora et al. (2008), Moreno et al. (2010) e Vera et al. (2010) conseguiram reduções de 11,4, 10,2 e 21,8%, respectivamente, no custo energético apenas otimizando os contratos de energia junto as concessionárias.

Gaio e Monteiro (2005) indicam medidas que visam a economia de energia como: redução da vazão recalçada, redução da altura manométrica, melhoria no rendimento da bomba e do motor de acionamento, adequação as associações de bombas, eliminação de cavitação, promoção da automação das EB, observação da adequação dos contratos de energia e observação ao acoplamento entre bomba motor. Da mesma forma Kaya et al. (2008) estudando a eficiência energética de um grupo de 11 conjuntos elevatórios verificaram que os fatores que mais contribuíram para aumento da eficiência do uso de energia foram a substituição de bombas existentes (baixa eficiência), a manutenção de bombas (cuja eficiência

já estava menor em determinadas faixas), a substituição de motores elétricos (potência superestimada), o uso de motores elétricos de alta eficiência e a eliminação de problemas de cavitação. Estes autores afirmam que a escolha correta da bomba, buscando trabalhar no ponto de melhor eficiência, é um dos quesitos, mas é necessário que todo sistema de bombeamento esteja projetado adequadamente.

Ritter (2011) estudando cerca de 100 EB que participaram de um programa de efficientização energética (promovido pela AES SUL), na FO do RS, observou que as alterações efetuadas que incluíram substituição de equipamentos, reposicionamento de conjuntos e trocas de tubulações impactaram em redução de 15,1% no consumo de energia e 31,7% na potência instalada.

Atualmente, no contexto global, alguns estudos tem sido feitos em relação a otimização do uso da energia, por unidades de bombeamento de água, recentemente Mahar e Singh (2014) desenvolveram um modelo de otimização para minimizar os custos fixos e operacionais. Eles consideraram o custo como função não linear do diâmetro da tubulação e do rendimento da bomba. Este modelo se mostrou auxiliar na tomada de decisão do processo de substituição de bombas e/ou tubulações visando a minimização dos custos. Já Moreno et al. (2007) desenvolveram um algoritmo para determinar a sequência de ligamento de conjuntos elevatórios de uma rede de EB que atendem a um perímetro irrigado e conseguiram 16% de economia de energia, usando a curva de demanda do sistema e trabalhando com alteração da rotação de funcionamento das bombas pelo uso de inversores de frequência. Da mesma forma Moraes et al. (2011) testaram o uso de inversores de frequência e o gerenciamento do número de horas de funcionamento em EB e concluíram que o uso destas duas técnicas geraram economias de energia que variaram de 7 a 62%, para os casos estudados.

## **2.5 Rendimento global**

O rendimento global é o produto do rendimento da bomba (em seu ponto de operação) pelo rendimento do motor (em função do carregamento) e pelo rendimento da transmissão entre motor e bomba (MACINTYRE, 1987). Este rendimento determina a relação entre a energia consumida e o trabalho realizado na unidade de tempo. O rendimento dos motores elétricos novos, com potência acima de 15kW (20 cv) é sempre superior a 90%, chegando a 96,2% segundo WEG (2014). As bombas centrifugas podem apresentar rendimento em torno de 50% para vazões baixas ( $<17 \text{ L s}^{-1}$ ) e velocidades específicas menores de 20 rpm, sendo

que aquelas usadas em lavouras de arroz atingem rendimentos de cerca de 80% devido as vazões mais altas ( $>85 \text{ L s}^{-1}$ ) e velocidades específicas superiores a 100 rpm. Na transmissão por polia e correia o rendimento fica entre 95% e 99% dependendo da polia usada (plana ou em “V”). Estes valores mostram que o rendimento global é limitado pelo desempenho individual de cada componente que, em função de sua capacidade e características físicas, apresentam um valor máximo possível.

O rendimento global das EB estudadas por Arns (1995) foi de 45%, Ocacia et al. (2002) encontraram 47% e Moises (2009) obteve 50%. Estes dados sugerem a possibilidade de ter ocorrido melhoria das instalações ao longo do tempo.

Abadia et al. (2008) desenvolveram uma classificação que indica que rendimentos globais superiores a 50% são classificados como “excelente”, enquanto de 40-50% são classificados como “bons”, em função do rendimento de motores elétricos e de bombas usadas para acionar sistemas de aspersão e gotejamento (baixas vazões).

## **2.6 Estrutura tarifária de energia**

Segundo ANEEL (2010) o enquadramento tarifário adotado para as EB usadas na irrigação em lavouras de arroz no RS é de usuárias do grupo A, composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou do grupo B com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV. As do grupo A ainda poderão se enquadrar na modalidade tarifária horária verde (horosazonal verde), caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia, assim como de uma única tarifa de demanda de potência. São usuárias do grupo A na modalidade tarifária horária verde, obrigatoriamente aquelas com tensão de fornecimento inferior a 69 kV e demanda contratada igual ou superior a 300 kW ou opcionalmente qualquer faixa de potência instalada. O uso desta modalidade tarifária obriga o usuário a implantar uma estrutura física de medição composta de construção de alvenaria com características definidas pela concessionária, bem como a desligar seus equipamentos durante 3 horas a cada 24 horas.

Na FO do RS às 3 horas de ponta para desligamento das EB são definidas em sistema de rodizio para não sobrecarregar a rede com o re ligamento de todos os motores concomitantemente. A resolução homologatória 1514 da ANEEL de 16 de abril de 2013 estabeleceu em seu Art.14 § 3º que:

A AES SUL poderá estabelecer horários de ponta diferenciados, entre os meses de outubro e abril, de acordo com o previsto no inciso II do § 2º do Art. 59 da

Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010, para unidades consumidoras irrigantes com tarifação horária atendidas pelas subestações: Uruguaiana 1, 2, 3 e 4; Alegrete 3, 4 e 5; São Borja 1, 2 e 3; Harmonia, Itaqui, Manoel Viana, Maçambará, Quaraí e Tuparay; sendo que a adesão do consumidor ao novo horário de ponta será voluntária, formal e específica para cada período pré-determinado (ANEEL, 2013, p. 3).

Para instalações rurais caracterizadas por serviço de bombeamento de água destinada à atividade de irrigação a ANEEL (art.73 na seção XI do capítulo VIII da Resolução 414 de 2010) concede desconto de 70% no valor cobrado em relação a tarifa horosazonal verde. para o consumo de energia entre 21:30h e 6h (horário reservado).

A adequação dos contratos de uso de energia e correção de baixo fator de potência pode gerar economia no valor desembolsado, mas é importante analisar que estes itens são requisitos de boa gestão e não caracterizam aumento de eficiência energética (OTERO et al. 2009).

## **2.7 Índices de desempenho**

Recentemente estão sendo introduzidos conceitos de índices de desempenho na área de irrigação, com vistas a possibilitar a identificação de bons padrões de dimensionamento. Alegre et al. (2004) conceituam indicador de desempenho como “*uma medida quantitativa de um aspecto particular do desempenho da entidade gestora ou do seu nível de serviço*”.

Assim são um instrumento de apoio à monitorização da eficiência (mede até que ponto os recursos são utilizados de forma otimizada para produção do serviço) e da eficácia (mede até que ponto os objetivos de gestão foram cumpridos). Dantas Neto e Farias (2013) qualificam os indicadores de desempenho pela sua relevância, seletividade, simplicidade e baixo custo, cobertura, estabilidade, rastreabilidade e razoabilidade.

A falta de indicadores usados como critério de tomada de decisão, em relação a eficiência energética de uma EB em lavoura de arroz, induz os produtores a temerem o investimento com a troca, substituição ou alteração de itens que compõe o sistema eletromecânico de elevação de água. Poucas publicações se referem a determinação de coeficientes, índices ou parâmetros que permitam classificar as EB e/ou compará-las. Rocamora et al. (2013) apontam os índices de desempenho como uma ferramenta que está sendo utilizada para monitorar a qualidade das EB mas alertam para necessidade de verificação dos mesmo com periodicidade.

Loureiro (2009) cita dois indicadores de eficiência energética em EB: o custo unitário da energia (R\$ kWh<sup>-1</sup>) e consumo específico (kWh m<sup>-3</sup>), mas adverte que ambos não devem ser usados para comparar EB pois não analisam as diferentes características das mesmas. Neste sentido Ocacia et al. (2002) estabeleceram um índice de potência por unidade de área e de altura (W ha<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>), que indica a demanda para a irrigação de um hectare de lavoura, por metro de elevação da água, e afirmam que as EB eficientes devem apresentar valores menores que 30 W ha<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>. Nas EB por eles analisadas, os valores variaram de 25 W ha<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>, até mais de 100 W ha<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>. Córcoles et al. (2010) propõe como indicador a energia ativa consumida por unidade de volume de água bombeado (kW m<sup>-3</sup> e kWh m<sup>-3</sup>). Corroborando Dantas Neto e Farias (2013) sugerem o uso de indicadores que relacionem o consumo de energia e a demanda de energia por unidade de área irrigada e de volume de água bombeado (kWh ha<sup>-1</sup>, kWh m<sup>-3</sup>, kW ha<sup>-1</sup>, kW m<sup>-3</sup>).

O rendimento global das EB pode ser usado como indicador de desempenho pois utiliza todas as grandezas envolvidas (vazão, altura manométrica e potência demandada). Abadia et al. (2008) propuseram um coeficiente global de eficiência energética (GEE) que envolve 2 componentes: A eficiência dos equipamentos que compõe o sistema de bombeamento e a distribuição espacial do mesmo, levando em conta a distância de condução da água, o desnível geométrico e a área a ser irrigada. Com este coeficiente é possível identificar se a causa da baixa eficiência esta relacionada aos equipamentos ou a distribuição espacial do sistema. Este coeficiente classifica as EB em categorias (excelente, bom, normal, aceitável e não aceitável).

A International Water Association (IWA) propôs um índice de desempenho que associa o consumo de energia com a vazão produzida e padroniza esta relação para a altura manométrica de 100 m, que chama de consumo de energia normalizado (kWh m<sup>-3</sup>/100m) permitindo comparar o desempenho de EB com diferentes alturas. Alegre et al. (2004) indicam este índice para avaliação de serviços de abastecimento público e recomendam que o valor esteja em torno de 0,5 kWh m<sup>-3</sup> para cada 100 m de altura manométrica.



### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho foram desenvolvidas as seguintes etapas:

- a) Coleta de dados das EB selecionadas.
- b) Análise dos dados coletados com ênfase na eficiência energética - Identificação de índices de desempenho.
- c) Otimização dos projetos para as EB selecionadas.
- d) Análise comparativa das EB selecionadas e das projetadas.
- e) Definição dos índices de desempenho significativos, proposta de novos índices e categorização dos mesmos.

O fluxograma, apresentado na Figura 7, indica as atividades desenvolvidas desde a concepção até a finalização deste trabalho.

A fase inicial deste trabalho foi desenvolvida na concepção da proposta, identificação do problema de pesquisa e revisão bibliográfica do assunto de forma a descrever o cenário e verificar sua razoabilidade. Verificou-se que o tema escolhido não havia sido objeto de estudo específico em lavouras de arroz e que poucos autores anteriormente haviam tratado deste assunto. Assim a proposta de índices de desempenho para EB em lavouras de arroz passou a ser estudada em relação às possibilidades de obtenção de parâmetros que pudessem compor índices com representatividade e facilidade de obtenção.

Os subitens a seguir refletem a seqüência da estrutura metodológica definida.

#### **3.1 Coleta de dados das estações de bombeamento selecionadas**

A área de estudo abrangeu quatro municípios da FO do estado do RS em uma amostragem de 45 propriedades com 160 EB, sendo 48 em Uruguaiana, 60 em Itaqui, 47 em Alegrete e 5 em São Borja. Os produtores foram indicados pela concessionária de energia elétrica na região, que usou como critério a intenção dos mesmos de participar do Programa de Eficientização Energética desenvolvido pela empresa.

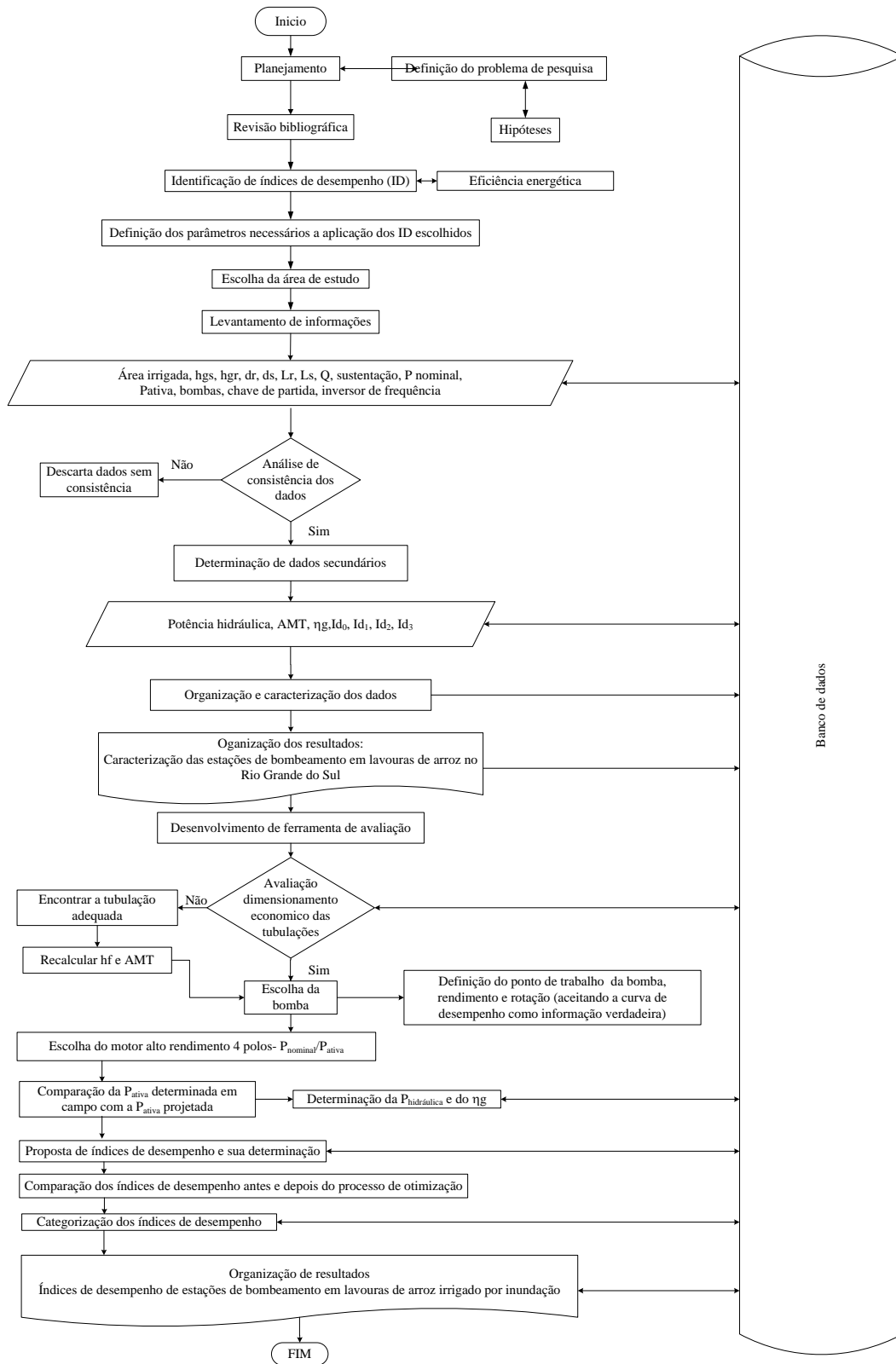


Figura 7. Fluxograma das atividades desenvolvidas para obtenção dos objetivos propostos.

As lavouras selecionadas, em sua totalidade, utilizavam irrigação por inundação com lâmina variável entre 3 e 7 cm, sistema de taipas baixas, e ciclo de irrigação entre 80 e 100 dias. As EB eram acionadas utilizando energia elétrica com estrutura tarifária horosazonal verde, também adotando o horário reservado de portaria.

Os dados coletados caracterizam as EB e incluem: especificação da bomba, potência do motor de acionamento, mecanismo de acoplamento bomba-motor, diâmetro e comprimento das tubulações de recalque e sucção, peças especiais instaladas (quando foi o caso), desnível geométrico entre o ponto de captação e o ponto de despejo, área irrigada e medida de vazão. Também foram realizadas medições de grandezas elétricas: corrente, tensão e potência ativa.

O levantamento de dados a campo constou de: a) medida da altura geométrica de recalque e de sucção da EB e dos respectivos comprimentos das tubulações com uso de estação total topográfica. b) Medida da vazão com uso de medidor de vazão ultrassônico portátil por tempo de trânsito (este instrumento é não invasivo e mede a velocidade, indicando indiretamente a vazão, através da informação do valor do diâmetro da tubulação e da espessura da chapa). c) Grandezas elétricas: potência ativa, tensão e corrente, medidas por medidor universal de grandezas elétricas (MUG) instalado junto ao quadro de comando elétrico permanecendo por período entre 15 e 30 minutos. d) Verificação da marca e modelo da bomba e do motor, posicionamento da bomba e do motor (eixo horizontal ou vertical); uso de estrutura flutuante, tipo de chave de partida elétrica, o material das tubulações e o seu diâmetro.

Os dados coletados a campo foram organizados sistematicamente em uma planilha com uso do software Excel, formando banco de informações, para então serem analisados.

### **3.2 Análise dos dados coletados com ênfase na eficiência energética do sistema**

O conjunto de dados coletados foi sistematizado, procurando estratificar as EB de forma a estabelecer o cenário estudado. Neste contexto foram avaliados os valores médios, os desvios e a distribuição das grandezas nas 160 EB estudadas, elaborando-se tabelas e gráficos que descrevem as mesmas. Os dados foram categorizados buscando-se estabelecer a distribuição dos valores.

As grandezas decorrentes dos dados medidos a campo foram estimadas como descrito a seguir:

### 3.2.1 Altura manométrica

Em função da inexistência de manômetros que permitissem avaliar a altura manométrica de sucção e recalque, optou-se pela estimativa da mesma a partir das informações obtidas em campo.

A altura manométrica total das EB estudadas foi determinada a partir da equação 2, adaptada da equação de Hazzen-Williams, usando os dados coletados descritos no item 3.1 desta metodologia. A equação de Hazzen-Williams foi escolhida em função de que as tubulações estudadas atendem a todos os pressupostos para sua utilização.

$$AMT = h_g + \left\{ \left( \frac{Q}{0.278 \cdot C \cdot D^{2.63}} \right)^{1.85} \cdot (L + L_{virtual}) \right\} \quad (2)$$

$$L_{virtual} = \sum_{i=1}^{i=n} N \times D \quad (3)$$

Onde:

AMT é a altura manométrica total (m);

$h_g$  é a altura geométrica (m);

Q é a vazão medida ( $m^3 s^{-1}$ );

C é o coeficiente de rugosidade de Hazzen-Williams (adotado valor 90 que configura tubulação de aço soldado com 10 anos de uso);

D é o diâmetro da tubulação (m);

L é o comprimento da tubulação (m);

$L_{virtual}$  é o comprimento virtual equivalente às peças especiais presentes na instalação (m);

n é o número de peças especiais presentes na EB;

N é o número de diâmetros equivalente a peça especial- valor tabelado (AZEVEDO NETO et al., 1998).

### 3.2.2 Potência hidráulica

A potência hidráulica necessária para realizar o trabalho de elevar a altura AMT a vazão medida (Q), foi determinada pela equação 4.

$$P_{\text{hid}} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot \text{AMT}}{1000} \quad (4)$$

Onde:

$P_{\text{hid}}$  é a potência hidráulica (kW);

$\gamma$  é o peso específico do líquido ( $\text{N m}^{-3}$ );

$Q$  é a vazão ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );

AMT é a altura manométrica total (m).

### 3.2.3 Potência ativa

A partir das medidas de tensão, corrente e do fator de potência, a potência elétrica ativa foi estimada pela equação 5 para aferição com a potência ativa medida diretamente com o medidor de grandezas elétricas.

$$P_{\text{ativa}} = \frac{(\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi)}{1000} \quad (5)$$

Onde:

$P_{\text{ativa}}$  é a potência elétrica ativa (kW);

$V$  é a Tensão (V);

$I$  é a corrente elétrica (A);

$\cos \varphi$  = fator de potência da instalação elétrica.

### 3.2.4 Rendimento global

Foi estimado o rendimento global da instalação através da relação entre a potência hidráulica e a potência elétrica ativa pela equação 6.

$$\eta_{\text{global}} = \frac{P_{\text{hid}}}{P_{\text{ativa}}} \cdot 100 \quad (6)$$

Onde:

$\eta_{\text{global}}$  é o rendimento do conjunto de equipamentos do sistema de bombeamento

### 3.2.5 Índices de desempenho

Com o objetivo de estabelecer valores que possam indicar a qualidade dos dimensionamentos e /ou avaliar as condições operacionais de EB foram estabelecidos índices de desempenho que foram definidos usando como critério a relação entre energia necessária para realização de um trabalho. Neste sentido usou-se a potência ativa (kW), a potência nominal (kW ou cv) e o consumo de energia (kWh) como indicadores de energia usada, instalada ou consumida, respectivamente. Essas grandezas foram relacionadas com a área irrigada (ha), altura geométrica de recalque ( $h_{gr}$ ), altura manométrica total (AMT), vazão ( $L s^{-1}$ ) ou volume de água recalcado ( $m^3$ ).

Foram determinados nove índices de desempenho os quais se encontram descritos no Quadro 1. Os índices apresentados foram aplicados para as 160 EB estudadas na situação inicial e posteriormente na situação em que os conjuntos haviam sido otimizados através da proposta de substituição de tubulação, bomba e motor ajustados à situação técnica recomendada. O cálculo foi feito a partir de uma planilha onde as grandezas envolvidas em cada índice estavam organizadas para as EB estudadas.

Os índices propostos envolvem todas as grandezas que impactam em potência instalada e/ou consumo energético da estação, de forma a explorar todas as possibilidades de combinação entre elas. Apresentam-se, neste trabalho, todos os índices estudados para que sejam avaliadas as possibilidades e, posteriormente, analisadas as mais convenientes para cada situação.

Índice	Relações e grandezas envolvidas	Unidade	Observação
Id <sub>0</sub>	$\frac{\text{potência.ativa}(W)}{\text{área.irrigada}(ha) \times \text{altura.geométrica}(m)}$	W ha <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	Relaciona potência ativa com área irrigada e altura geométrica
Id <sub>1</sub>	$\frac{\text{potência.ativa}(kW)}{\text{área.irrigada}(ha)}$	kW ha <sup>-1</sup>	Relaciona potência ativa com área irrigada
Id <sub>2</sub>	$\frac{\text{potência.ativa}(kW) \times \text{tempo}(h)}{\text{área.irrigada}(ha)}$	kWh ha <sup>-1</sup>	Relaciona consumo de energia com área irrigada
Id <sub>3</sub>	$\frac{\text{potência.ativa}(kW) \times \text{tempo}(h)}{\text{área.irrigada}(ha) \times \frac{\text{volume}}{\text{área}} (m^3 / ha)}$	kWh m <sup>-3</sup>	Relaciona consumo de energia com volume recalado
Id <sub>4</sub>	$\frac{\text{potência.ativa}(kW)}{\frac{\text{vazão}(L/s)}{1000} \times \text{altura.manométrica}(m)}$	kW (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	Relaciona potência ativa com vazão e altura manométrica
Id <sub>5</sub>	$\frac{\text{potência.motor}(kW)}{\text{vazão}(L/s) \times \text{altura.geométrica}(m)}$	kW (L s <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	Relaciona potência do motor com vazão e altura geométrica
Id <sub>6</sub>	$\frac{\text{potência.motor}(W)}{\text{área.irrigada}(ha) \times \text{altura geométrica}(m)}$	W ha <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	Relaciona potência do motor com área irrigada e altura geométrica
Id <sub>7</sub>	$\frac{\text{potência.ativa}(kW) \times \text{tempo}(h)}{\text{volume}(m^3) \times \text{altura.manométrica}(m)} \times 100m$	kWh m <sup>-3</sup>	Relaciona consumo de energia com volume recalado (para AMT padronizada em 100m)
η <sub>g</sub>	$\frac{\text{vazão}(Ls^{-1}) \times \text{altura.manométrica}(m)}{\text{potência.ativa}(cv) \times 75} \times 100$ ou $\eta_g = \eta_{bomba} \times \eta_{motor} \times \eta_{transmissão}$	%	Relaciona o produto da vazão pela altura manométrica com a potência ativa  É o produto dos rendimentos da bomba do motor e da transmissão

Quadro 1. Índices de desempenho usados para avaliar o funcionamento das 160 EB estudadas.

Os índices de desempenho foram determinados com as equações 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15.

$$Id_0 = \frac{P_{ativa}}{A \times h_{gr}} \quad (7)$$

$$Id_1 = \frac{(P_{ativa} \times 1000)}{A} \quad (8)$$

$$Id_2 = \frac{c}{A} \quad (9)$$

$$Id_3 = \frac{c}{Vol} \quad (10)$$

Onde:

$Id_0$  é o índice de desempenho proposto por Ocácia et al. (2002) ( $W \text{ ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$ );

$P_{ativa}$  é a potência ativa (W);

$A$  é a área cultivada atendida pela EB (ha);

$h_{gr}$  é a altura geométrica de recalque (m);

$Id_1$  é o índice de desempenho ( $kW \text{ ha}^{-1}$ );

$Id_2$  é o índice de desempenho ( $kWh \text{ ha}^{-1}$ );

$Id_3$  é o índice de desempenho ( $kWh \text{ m}^3$ );

$c$  é o consumo de energia durante todo o ciclo de irrigação (kWh);

$Vol$  é o volume de água bombeado durante todo o ciclo de irrigação ( $\text{m}^3$ ).

Os valores de  $c$  e de  $Vol$  foram estimados utilizando o valor médio de 1.800 horas de bombeamento durante o ciclo de irrigação de uma lavoura de arroz, para todas as EB.

$$Id_4 = \frac{P_{ativa}}{Q \times AMT} \quad (11)$$

Onde:

$P_{ativa}$  é a potência ativa (kW);

$Q$  é a vazão ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ );

$AMT$  é a altura manométrica (m);

$Id_4$  é o índice de desempenho ( $kW (\text{m}^3 \text{ s}^{-1})^{-1} \text{ m}^{-1}$ ).

$$Id_5 = \frac{P_{nominal}}{Q \times h_{gr}} \quad (12)$$

$$Id_6 = \frac{P_{nominal}}{A \times h_{gr}} \quad (13)$$



$$Id_7 = \frac{c}{Vol \times AMT} \times 100 \quad (14)$$

$$\eta = \frac{Q \times AMT}{75 \times P_{ativa}} \times 100 \quad (15)$$

Onde:

$P_{nominal}$  é a potência nominal do motor (cv);

$P_{ativa}$  é a potência ativa (cv);

$Q$  é a vazão ( $L s^{-1}$ );

$Id_5$  é o índice de desempenho ( $kW (L s^{-1})^{-1} m^{-1}$ );

$Id_6$  é o índice de desempenho ( $W ha^{-1} m^{-1}$ );

$Id_7$  é o índice de desempenho ( $kWh m^{-3}$ );

$\eta$  é o rendimento global (%).

Os dados medidos e estimados foram tabulados, organizados e analisados de forma a compor resultados diagnósticos para atender o objeto de estudo.

### 3.3 Projeto de adequação para as estações de bombeamento selecionadas

Foram desenvolvidos projetos, com base nos dados reais, visando o uso potencial da energia no sistema de bombeamento de água. Não foram alteradas as condições físicas da estação de bombeamento (EB), mantendo-se a área irrigada, vazão, alturas geométricas e distâncias (comprimento da tubulação).

Para o redimensionamento das tubulações foi desenvolvida uma planilha (Apêndice 1) que associa o diâmetro ao custo total (fixo+ operacional) baseado na vazão de projeto, comprimento da tubulação, custo da tubulação e custo da energia demandada (consumo + demanda). Neste sentido as tubulações foram redimensionadas em relação ao diâmetro, mantendo o material e o comprimento das mesmas. Este processo foi baseado na obtenção do diâmetro que implique em menor custo total ao longo de um período de 10 anos de funcionamento das EB, com base na soma de custo fixo (da tubulação) e custo operacional (energia).

Para seleção do diâmetro econômico foram usados os diâmetros disponíveis na Tabela 2, de acordo com os padrões de chapas de aço usuais para confecção de tubulação para lavoura de arroz na FO. A AMT foi determinada pela equação 2, usando o coeficiente  $C=90$

em função do material (chapa de aço soldada em uso). Para determinação do comprimento virtual (equação 3) padronizou-se para todas as EB o uso das seguintes peças especiais: 01 redução gradual (6), 01 ampliação gradual (12), 01 curva de 90° raio longo (20), 01 válvula de retenção (100), perfazendo N=138.

Tabela 2. Diâmetros, espessura de chapa e massa dos tubos de aço soldado usados na irrigação de lavouras de arroz.

Espessura da chapa (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (kg m <sup>-1</sup> )
2,65	250	16.6
2,65	300	20.0
2,65	320	21.3
2,65	380	25.3
2,65	480	32.0
2,65	540	36.0
2,65	640	42.6
2,65	770	51.3
2,65	800	53.3
2,65	960	63.9
2,65	1120	74.6
2,65	1280	85.2
2,65	1600	106.6
2,65	2000	133.2

O custo fixo gerado pela aquisição da tubulação foi determinado pela equação 16.

$$C_f = (D \times \pi) \times L \times p \times \rho_{chapa} \quad (16)$$

Onde:

Cf é o custo fixo (R\$);

d é o diâmetro da tubulação (m);

L é o comprimento da tubulação (m);

p é o preço do kg da chapa de aço usada para confecção da tubulação (R\$ kg<sup>-1</sup>);

$\rho_{chapa}$  é a massa específica da chapa usada para confecção da tubulação (kg m<sup>-2</sup>).

O custo operacional foi determinado pela equação 17.

$$C_o = C_d + C_{TH} + C_{HP} \quad (17)$$

Onde:

$C_o$  é o custo operacional (R\$);

$C_d$  é o custo relativo à demanda (R\$);

$C_{TH}$  é o custo relativo ao período de funcionamento em tarifa horosazonal verde (R\$);

$C_{HP}$  é o custo relativo ao período de consumo em horário reservado de portaria (R\$).

$$C_d = P \times p_{demanda} \quad (18)$$

$$C_{TH} = P \times N_{horasTH} \times p_{TH} \quad (19)$$

$$C_{HP} = P \times N_{horasHR} \times p_{HR} \quad (20)$$

$$P = \frac{Q \times 1000 \times \left( hg + \left\{ \left( \frac{Q}{0,278 \times C \times D^{2,63}} \right)^{1,85} \times (L + L_{virtual}) \right\} \right)}{75 \times \eta_{global}} \times 0,736 \quad (21)$$

Onde:

$P$  é a potência ativa (kW);

$Q$  é a vazão ( $m^3 s^{-1}$ );

$hg$  é a altura geométrica (m);

$C$  é o coeficiente de rugosidade de Hazzen-Williams (adotado valor 90 que configura tubulação de aço soldado com 10 anos de uso);

$D$  é o diâmetro da tubulação (m);

$L$  é o comprimento da tubulação (m);

$L_{virtual}$  é o comprimento virtual equivalente as peças especiais presentes na instalação (m);

$\eta_{global}$  é o rendimento do conjunto (bomba, motor e transmissão mecânica);

$p_{demanda}$  é o preço cobrado pela demanda (R\$  $kW^{-1}$ );

$N_{horasTH}$  é o numero de horas que a EB opera em tarifa horosazonal verde (neste estudo foram consideradas 1071,42 h);

$p_{TH}$  é o preço do kW no horário de tarifa horozasonal verde (R\$  $kWh^{-1}$ );

$N_{horasHR}$  é o numero de horas que a EB opera em tarifa de horário reservado (neste estudo foram consideradas 728,58 h);

$p_{HR}$  é o preço do kWh em horário reservado de portaria (R\$  $kWh^{-1}$ ).

O tempo de funcionamento das EB foi padronizado para 1800 horas para que os consumos pudessem ser comparados. Em situação real o tempo de bombeamento varia de uma lavoura para outra, mas oscila em torno de 1800 horas.

Na determinação do custo total foi considerado um período de 10 anos para recuperação do capital e juros de 12% ao ano. O período de 10 anos foi escolhido em função do material da tubulação (chapas de aço sem revestimento e com solda exposta) e dos contratos de arrendamento que raramente excedem 10 anos. Lima et al. (2009) e Perroni et al. (2011) usaram período de análise de 15 anos, quando estudaram as tubulações de PVC. Foi considerada a melhor escolha de diâmetro aquela que resultou no menor custo total.

Definido o diâmetro, foi recalculada a velocidade e determinada a altura manométrica total (AMT) com o uso da equação 2. Com a nova AMT e a vazão de projeto foi selecionada a bomba que apresentou a maior eficiência, entre as disponíveis no mercado, para cada uma das 160 situações estudadas. Posteriormente o motor foi selecionado usando como critério a adequação à potência necessária, sendo feita opção pelos motores de 4 polos e de alto rendimento. Assim, obteve-se uma EB otimizada para as condições de necessidade de bombeamento, que apresentará consumo energético minimizado.

### **3.4 Análise comparativa entre as estações de bombeamento selecionadas e as projetadas**

Foram relacionados os dados da situação real (antes) com os dados da situação de projeto (depois) através da comparação das perdas energéticas das duas situações visando obter a economia potencial. A comparação permitiu estabelecer quantitativamente a redução nas diferentes grandezas que indicam o uso da energia. Foram comparadas as potências ativas iniciais com àquelas decorrentes dos projetos e o custo de energia evitado.

Foram refeitos os índices de desempenho (equações 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15) para a nova condição proposta no projeto, e comparados com os obtidos inicialmente.

#### **3.4.1 Classificação dos índices de desempenho**

Os índices determinados, descritos no item 3.2.5 desta metodologia, relacionam grandezas hidráulicas e elétricas de forma a identificar padrões de desempenho operacional das EB. Neste sentido, para cada índice estudado, foram propostas categorias de desempenho, baseadas nos resultados obtidos antes e depois da adequação das EB. As categorias foram

definidas levando em consideração a amplitude de valores encontrados e estabelecendo 5 classes equidistantes “muito ruim”, “ruim”, “bom”, “muito bom” e “excelente”. Para cada índice foram estabelecidos os valores correspondentes aos limites inferior e superior de cada categoria.

Foram identificados índices de desempenho que permitem avaliar uma EB e classificá-la em relação aos aspectos de dimensionamento (escolha do diâmetro da tubulação, escolha da bomba e escolha do motor), no que se refere a potência instalada e ao consumo de energia.

Para cada uma das EB estudadas foi simulando o consumo de energia (kWh) para um total de 1800 horas de bombeamento sendo, diariamente, 12,5 horas como usuários de tarifa horosazonal verde e 8,5 horas como usuários de tarifa em horário reservado de portaria, acrescido a 4 meses de demanda, com o uso das equações 18, 19 e 20.

Buscando estabelecer a relação entre os índices de desempenho estudados foi aplicada a análise de regressão linear, comparando os índices (dois a dois) de forma a confrontar todos os dados. Da mesma forma os 09 índices de desempenho estudados foram associados com as variáveis: vazão unitária ( $q - L s^{-1} ha^{-1}$ ), velocidade de fluxo ( $v - m s^{-1}$ ), percentual de perda de carga ( $hf - \%$ ), altura geométrica ( $hg - m$ ), área irrigada ( $A - ha$ ), e rendimento global ( $\eta_g$  decimal), buscando identificar quais as relações existiam entre os índices e cada um dos fatores testados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização das estações estudadas

A seguir serão apresentados os resultados obtidos através do levantamento de informações bem como aqueles obtidos indiretamente através da metodologia descrita.

#### 4.1.1 Área atendida

A área atendida, por cada EB, variou de 27,9 a 1217 ha, com média de  $293,7 \pm 216,6$  ha, indicando grande variabilidade. A maior ocorrência de áreas foi na faixa de 100 a 400 ha com 71,25% dos casos ficando 8,75% deles com áreas abaixo de 100 ha e 20% acima de 400 ha, conforme visualizado na Figura 8. Estes dados sugerem uma tendência a aumento temporal da área atendida por cada EB, pois Arns (1995) estudando 642 EB na FO do RS, indicou haver 1 para cada 190 ha.

As 160 EB estudadas totalizaram uma área atendida de 46.986 ha, que corresponde a 14,82% da área cultivada nos 4 municípios amostrados.

#### 4.1.2 Vazão

O valor da vazão variou entre 67 e 1890 L s<sup>-1</sup>, com média de  $532,1 \pm 345,3$  L s<sup>-1</sup>. A maior concentração de valores esteve entre 200 e 600 L s<sup>-1</sup> (Figura 9), fato que gera maior demanda por bombas nesta faixa de vazão. A vazão por unidade de área, chamada de vazão unitária, ficou entre 0,9 e 2,7 L s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>, e em 55,6% dos casos esteve entre 1,5 e 2,0 L s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> (Figura 10), sendo a média de  $1,9 \pm 0,3$  L s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>. A variabilidade dos valores encontrados pode ser atribuída: ao imprevisto nas EB, pois os equipamentos são aproveitados quando da mudança dos cortes de lavoura; a falta de controle real sobre as vazões e a variabilidades nas texturas e topografia dos solos cultivados.

Os valores médios encontrados, sob condição de irrigação com lâmina estática, por Corrêa et al. (1997) indicam que o consumo de água variou de 1,15 a 1,76 L s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> enquanto Marcolin et al. (2013) encontraram a vazão unitária entre 1,38 e 1,62 L s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>, em experimentos conduzidos em parcelas. Pode-se observar na Figura 10 que 40% das EB operam com vazão unitária entre 2,0 e 2,5 L s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>, valores acima da faixa entre 1,00 e 1,40

$L s^{-1} ha^{-1}$ , recomendada pela SOSBAI (2012). Urrestarazu e Burt (2012) afirmam que uma das causas do custo elevado com bombeamento de água, em sistemas irrigados, é o excesso de água recalcado.

Assim a vazão unitária é um dos itens que definem o custo de produção e, portanto, merece controle. Também foi possível verificar que 42,8% das EB que operam com vazões unitárias acima de  $2,0 L s^{-1} ha^{-1}$  atendem áreas menores de 250 ha enquanto para áreas maiores este índice cai para 22,3%. Estas observações permitem inferir que os volumes de água usados em lavouras de arroz podem ser reduzidos, mas esse aspecto deveria ser objeto de estudo específico que relacionasse as causas desses elevados valores, o que foge dos objetivos deste trabalho.

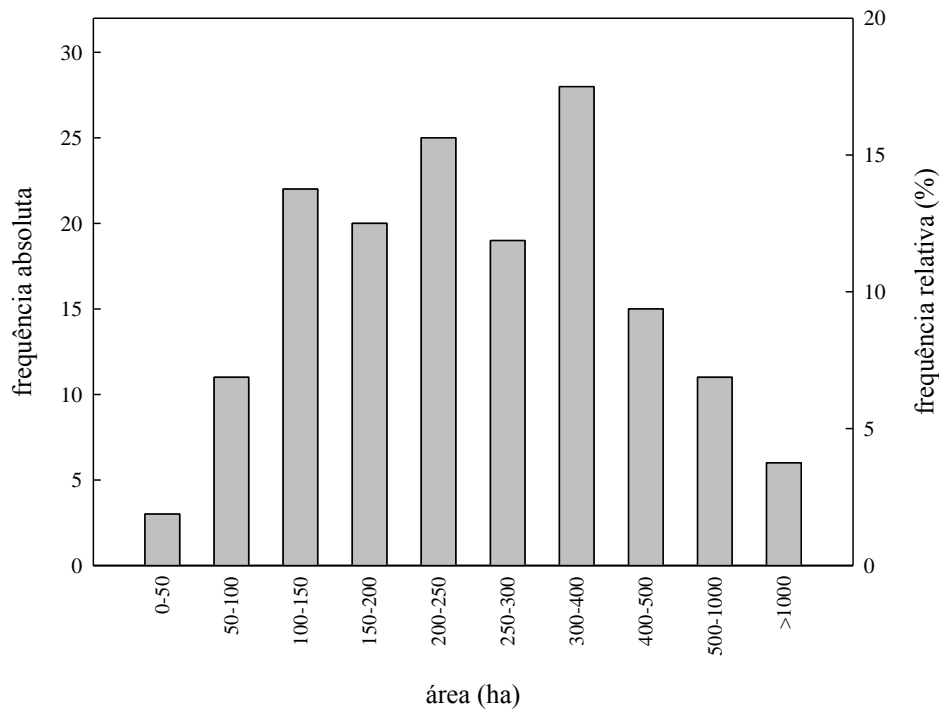


Figura 8. Distribuição das áreas atendidas pelas 160 estações de bombeamento estudadas.

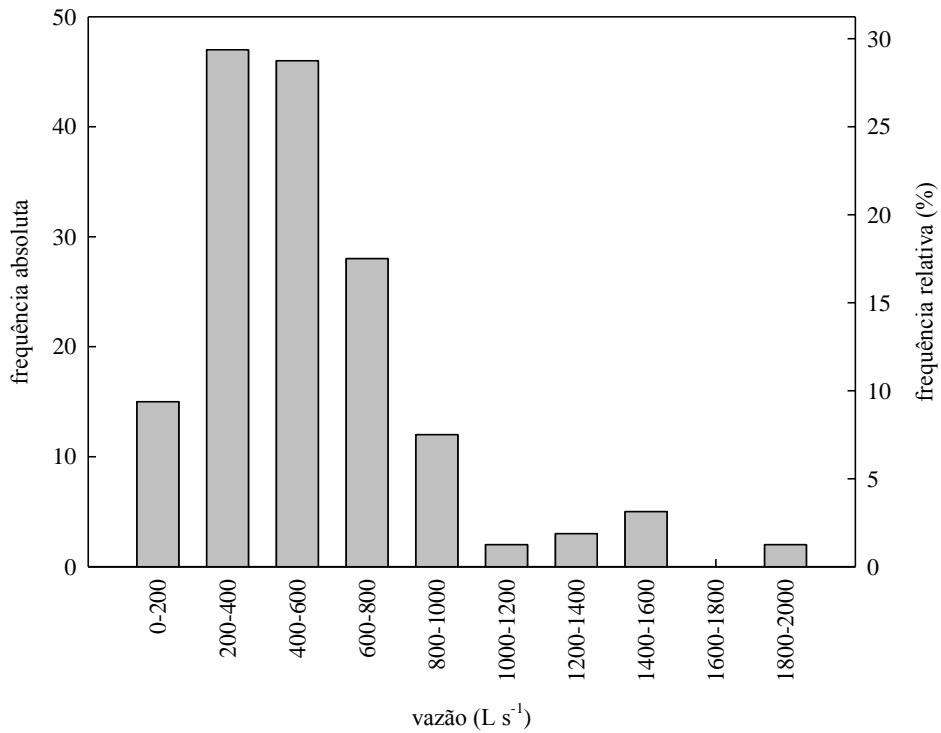


Figura 9. Distribuição da vazão nas 160 estações de bombeamento estudadas.

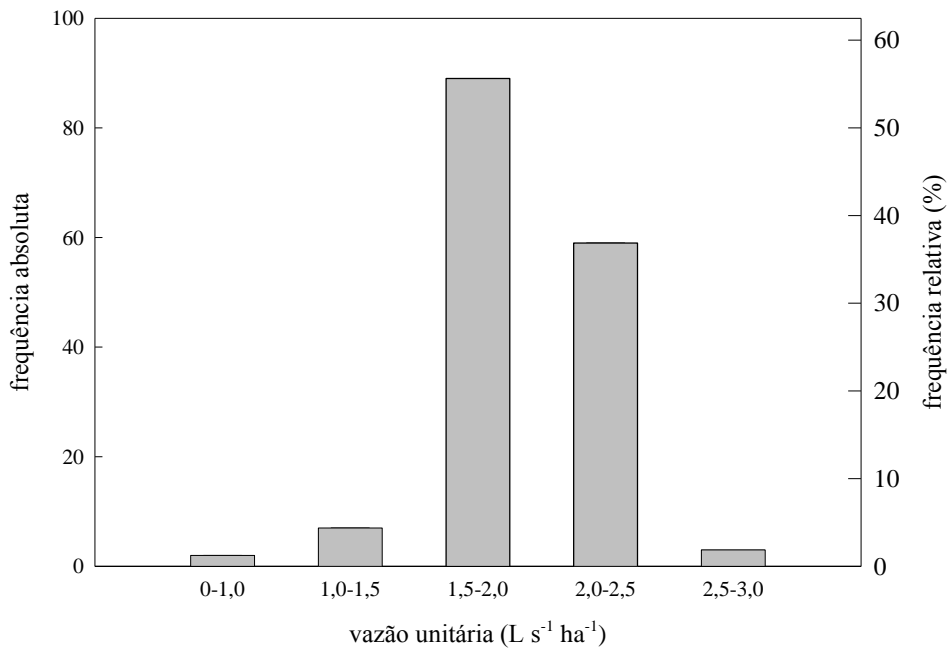


Figura 10. Distribuição da vazão unitária nas 160 estações de bombeamento estudadas.



#### 4.1.3 Tubulações

As tubulações encontradas foram confeccionadas em chapa de aço soldadas, material usado pela facilidade de transporte, na forma de chapas, o que reduz o frete pelo menor volume. Em função da largura das chapas (1,0 m; 1,2 m; 1,5 m; 2,0 m) mais comuns comercialmente, os diâmetros utilizados que foram encontrados, sem execução de cortes, foram os nominais 0,32 m, 0,38 m, 0,48 m e 0,64 m, respectivamente e, através de emendas de 2 chapas observou-se os diâmetros de 0,80 m, 0,95 m, 1,15 m e 1,30 m, menos frequentes. As chapas usadas para confecção de tubulações de recalque apresentaram espessura de 2,65mm (chapa 12), e 3,00 mm (chapa 11) para as tubulações de sucção.

O processo de confecção das tubulações é realizado com dobra de chapa através da calhandra e solda o que confere aspereza e irregularidade. As peças especiais, particularmente as curvas (Figura 11), são confeccionadas de forma artesanal, através de cortes de gomos de chapas posteriormente soldadas, contribuindo para que o raio de curvatura da peça produza a alteração brusca de direcionamento do fluxo e elevando a turbulência da água. O exposto sugere que sejam repensados os valores de coeficientes tabelados usados para determinação da perda de carga, uma vez que não existe um padrão de confecção das tubulações, inclusive havendo alguns produtores que usam revestimento interno, enquanto a maioria não o faz.



Figura 11. Aspecto das curvas utilizadas na saída das bombas instaladas em posição com eixo horizontal.

As tubulações de recalque foram medidas em relação ao seu comprimento e diâmetro, e indiretamente avaliada sua velocidade de fluxo. O diâmetro das tubulações de recalque variou entre 0,28 e 1,25 m, sendo que em 45 EB foi de 0,48 m e em 51 delas 0,64 m, perfazendo 66% dos casos (Figura 12). Em relação a velocidade de fluxo, nas tubulações de recalque, observou-se que em 74,4% das EB a velocidade esteve abaixo de  $2,0 \text{ m s}^{-1}$  (Figura 13), com média das velocidades de  $1,6 \pm 0,6 \text{ m s}^{-1}$  inferior a obtida por Marcolin; Robaina (2002) de  $2,58 \text{ m s}^{-1}$ , que apontam este parâmetro como determinante para elevado consumo energético. O valor médio encontrado neste trabalho atende a recomendação de diversos autores (NEVES, 1982; CARVALHO, 1984; AZEVEDO NETO et al., 1998). Observou-se casos em que a velocidade de fluxo gerava turbulência expressiva na saída da tubulação caracterizando desperdício de energia (Figura 14).

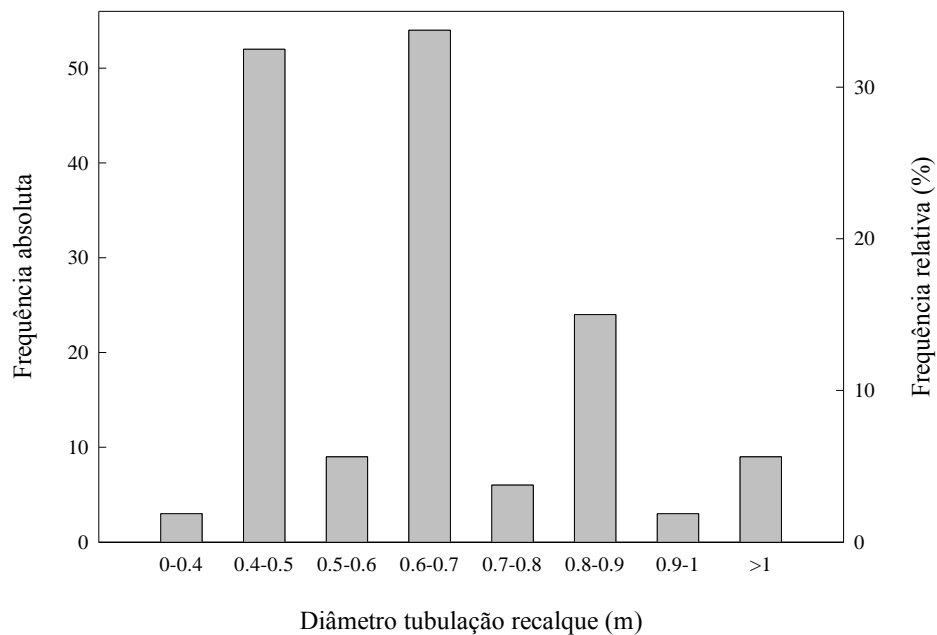


Figura 12. Distribuição dos diâmetros das tubulações de recalque nas 160 estações de bombeamento estudadas.

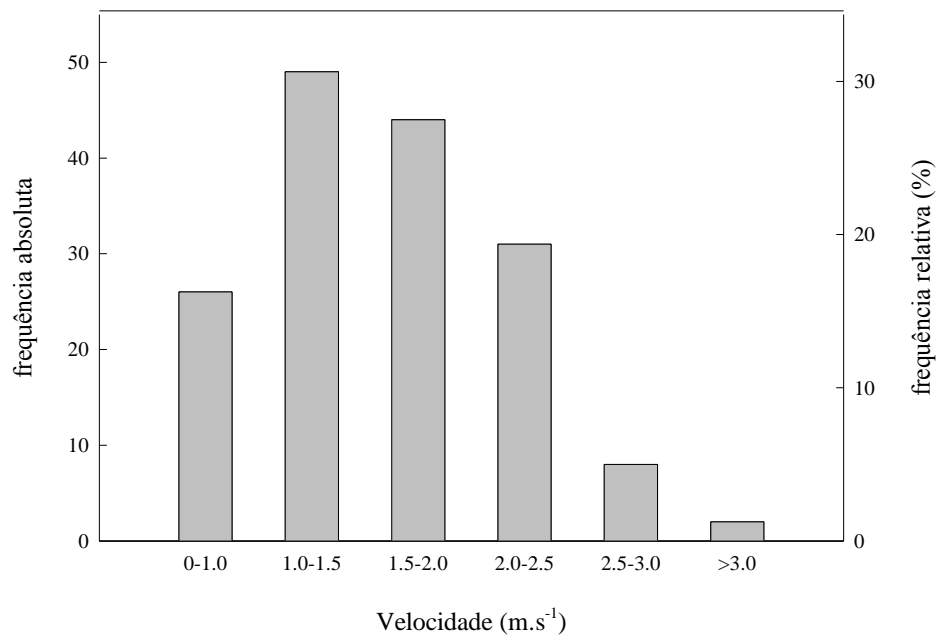


Figura 13. Distribuição da velocidade na tubulação de recalque para as 160 estações de bombeamento estudadas.



Figura 14. Tubulação com elevada turbulência na saída.

A análise do diâmetro e da velocidade não é simplista, e deve buscar o diâmetro econômico através da minimização do custo total devendo levar em conta fatores relativos ao custo fixo e ao custo operacional, dentro de um período de tempo correspondente a vida útil da tubulação. Robaina et al. (2004) e Perroni et al. (2011) propuseram metodologia para determinação do diâmetro ótimo de recalque em EB de água para irrigação, buscando a minimização do custo total. Azevedo Netto et al. (1998) afirmaram que o critério econômico, que busca o diâmetro mais vantajoso, conduz a velocidades na faixa de 0,75 a 1,50 m s<sup>-1</sup>, valor que apresentou frequência de 46,88% neste estudo. Já Monachesi (2005) indica a NBR

12.214 como orientadora para valores de velocidade em tubulações de  $1,5 \text{ m s}^{-1}$  como limitante naquelas de diâmetro igual ou superior a 0,40 m. Assim pode-se inferir a necessidade de definir critérios para determinação dos diâmetros neste estudo onde, segundo informações dos técnicos que atuam na área estudada (informação pessoal), é usado como critério de dimensionamento a velocidade limite de  $1,5 \text{ m s}^{-1}$ .

Ao analisar o comprimento verificou-se a ocorrência de 72,5% dos casos com valores inferiores a 300 m, conforme se pode observar na Figura 15. A média dos comprimentos foi de  $234,3 \pm 205,6 \text{ m}$ , indicando grande variabilidade entre os mesmos, o que mostra não haver um padrão estabelecido. A indica uma tendência ao uso de tubulações mais curtas, com parte da distribuição de água sendo feita por canais em terra o que se deve ao fato de 62,7% das áreas serem arrendadas (IRGA, 2006), não oportunizando investimentos, pelo tempo de contrato estabelecido (normalmente entre 5 e 10 anos).

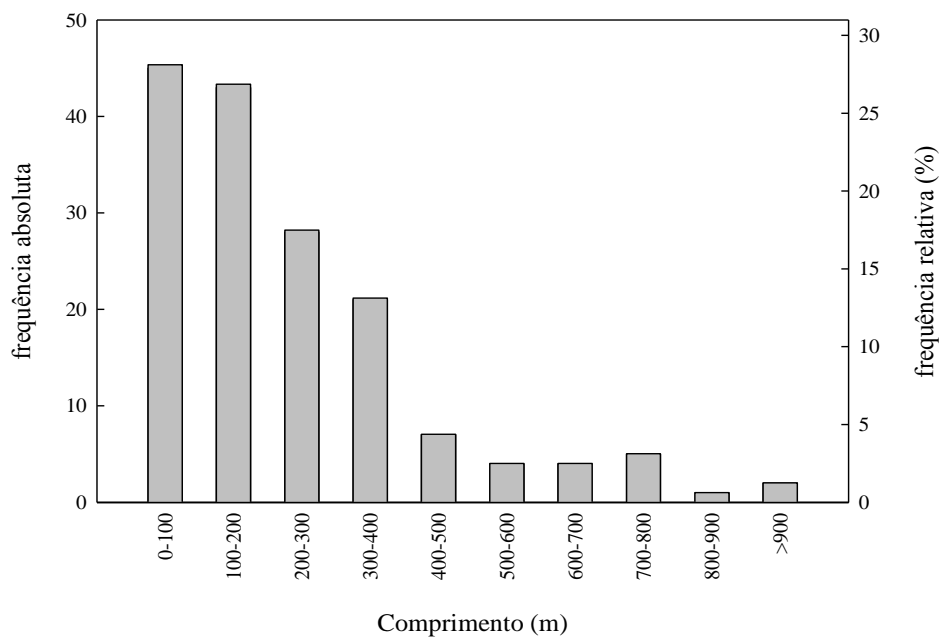


Figura 15. Distribuição dos comprimentos da tubulação de recalque nas 160 estações de bombeamento estudadas.

As EB estudadas estavam distribuídas de acordo com sua posição em relação a captação da água em 1º levante, 2º levante, 3º levante, 4º levante e 5º levante. A Tabela 3 mostra a distribuição das EB em relação a posição na linha de recalque e a presença de juntas de dilatação. As juntas de dilatação encontradas em tubulações, nas lavouras de arroz, eram confeccionadas a partir do uso de pneus usados com flange de aço parafusados em flanges usados na tubulação como apresentado na Figura 4. Normalmente é adotada a distribuição de

1 junta de dilatação para cada 100 m de tubulação, com exceção daquelas dispostas em balsas que devem se adequar ao desnível de terreno, onde existem juntas em distâncias mais curtas.

Tabela 3. Distribuição das 160 estações de bombeamento em relação a posição na linha de recalque e presença de juntas de dilatação.

localização	com juntas	sem juntas
1º levante	86	3
2º levante	31	15
3º levante	14	5
4º levante	2	3
5º levante	0	1
Total	133	27

O elevado número de juntas de dilatação, presentes em EB de 1º levante, se deve a presença de estruturas flutuantes (balsas) como apoio, que utilizam as juntas de pneus como estrutura de articulação da tubulação para adequação ao apoio em barrancos de rios e ou reservatórios.

#### 4.1.4 Estruturas de apoio

As EB encontram-se apoiadas em estruturas flutuantes com eixo vertical ou fixadas em estruturas rígidas compostas de perfis metálicos ou madeira. É comum a observação de condição de improviso na instalação dos conjuntos elevatórios, o que pode gerar vibração e ruído que levam ao desalinhamento das polias e correias, causando redução na eficiência de transmissão mecânica. A Figura 16 mostra uma balsa de confecção caseira, apoiando uma EB. A balsa gera uma situação de conforto operacional no sentido de que acompanha o nível da água na sucção, evita o uso da válvula de pé e posiciona a bomba com eixo vertical, o que elimina a curva na entrada da bomba (sucção) e na saída da mesma (recalque). Esta situação determina o uso de juntas de dilatação que funcionam como elemento de flexibilização da tubulação fazendo com que ocorra o ajuste em relação ao posicionamento do terreno. Neste caso uma observação importante se refere a condição dos pneus usados na confecção das juntas que deve ter resistência suficiente para suportar a pressão de saída da água. Neste estudo foram encontradas 106 EB apoiadas sobre balsa, perfazendo 66,25% dos casos.



Figura 16. Balsa usada para apoiar EB.

#### 4.1.5 Potência ativa e nominal

A Figura 17 mostra a distribuição de classes dos valores de potencia ativa e nominal encontrados. Em 100% das EB estudadas o acionamento era feito com motor elétrico. A potência ativa medida variou de 14,8 a 401,0 kW (20,1 a 544,8 cv), sendo a maior frequência na faixa de 50 a 150 kW (67,9 a 203,8 cv) com 62,5% das ocorrências. A potência ativa média das instalações estudadas foi de  $110,5 \pm 61,7$  kW ( $150,1 \pm 83,8$  cv), valor superior ao encontrado por Arns (1995) de 83,9 kW, o que se justifica pelo aumento da área média irrigada .

Em relação às potencias instaladas (potência nominal do motor) a faixa de valores encontrados foi de 14,7 a 368,0 kW (20 a 500 cv), com média de  $111,7 \pm 58,1$  kW ( $151,8 \pm 78,9$  cv). A faixa de 50 a 150 kW (135 a 200 cv) foi a mais freqüente com 68,12% dos casos.

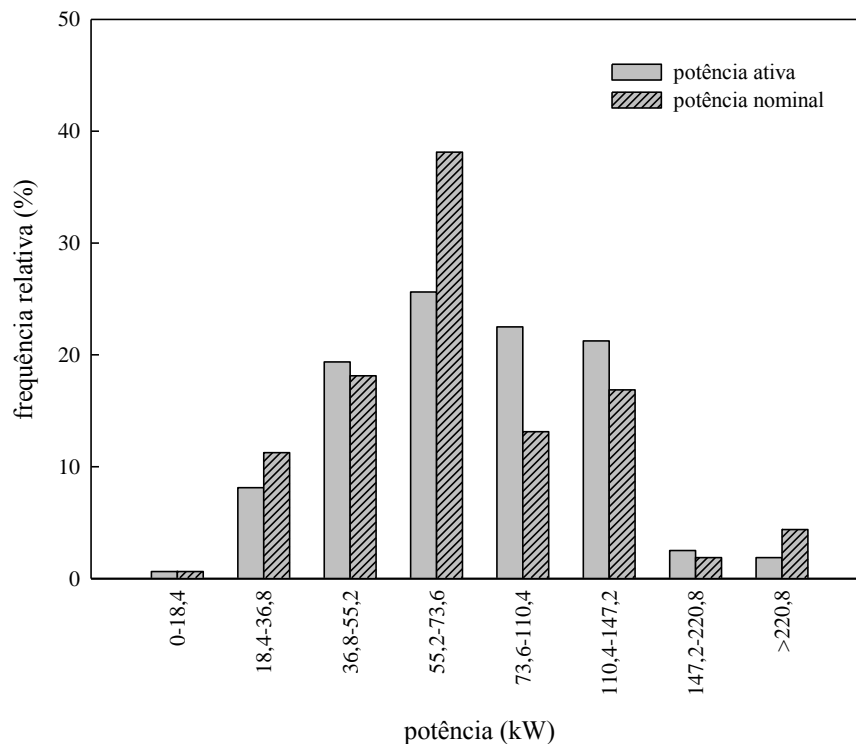


Figura 17. Distribuição da potência ativa e da potência nominal para as 160 estações de bombeamento estudadas.

A diferença entre a potência nominal e a potência ativa é um dos fatores determinantes da eficiência do motor elétrico. Em 38,2% das EB as potências ativas medidas foram menores de que a potência nominal, apresentando um fator de carga (relação entre a potência ativa e a potência nominal do motor) inferior a unidade (Figura 18).

Oliveira Filho et al. (2010) encontraram potências nominais entre 15 e 88% acima da potência ativa, caracterizando folga excessiva. Lima et al. (2009) afirmam que os projetos de EB de bombeamento são desenvolvidos pelos próprios fornecedores que objetivando reduzir custos iniciais aumentam a relação potência instalada por unidade de área.

No caso deste estudo a diferença pode ter sido gerada pelo imprevisto nas instalações, em função da rotação de áreas, normalmente com 2 anos de cultivo e 3 de pousio, e conseqüentemente alteração nas condições de trabalho das EB, gerando como prática usual o aproveitamento de equipamentos em situações diferentes daquelas de projeto. Oliveira Filho et al. (2010) afirmam que a utilização acumulada de fatores de segurança e de acréscimo de potência no dimensionamento de motores, para acionamento de bombas hidráulicas, geram rendimento inferior aos dos mesmos sistemas quando calculados sem esses fatores.

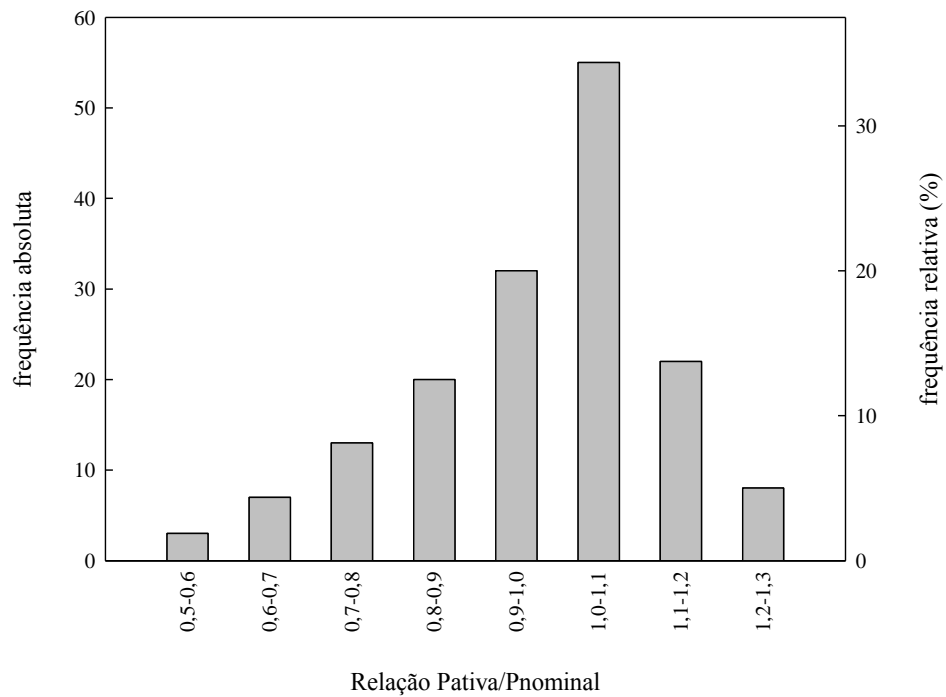


Figura 18. Distribuição da relação entre a potência ativa e a potência nominal para as 160 estações de bombeamento estudadas.

Entre os motores elétricos encontrados em campo pode-se observar a existência de motores com muitos anos de funcionamento (Figura 19). Uma observação complementar foi a de que, entre os 160 motores avaliados, 116 já foram rebobinados pelo menos uma vez, o que pode ser um fator de redução no rendimento global.



Figura 19. Motores elétricos encontrados em campo.



As chaves de partida dos motores, em 100% das EB, eram eletrônicas (“soft starter”), fato esse que justifica a inexistência de registros, na saída das bombas.

#### 4.1.6 Bombas

Observou-se a ocorrência de 5 marcas diferentes de bombas, as quais serão chamadas de A, B, C, D e E, sendo a marca A caracterizada por bombas cujo rotor é produzido artesanalmente a partir de carcaças usadas (sucata). Em 7,5% das instalações se encontrou bombas submersas instaladas. Houve o predomínio da marca D que apareceu em 52,5% dos casos, sendo justificado seu uso expressivo pela faixa de cobertura (vazão e altura manométrica) e preço em comparação as demais marcas (Figura 20).

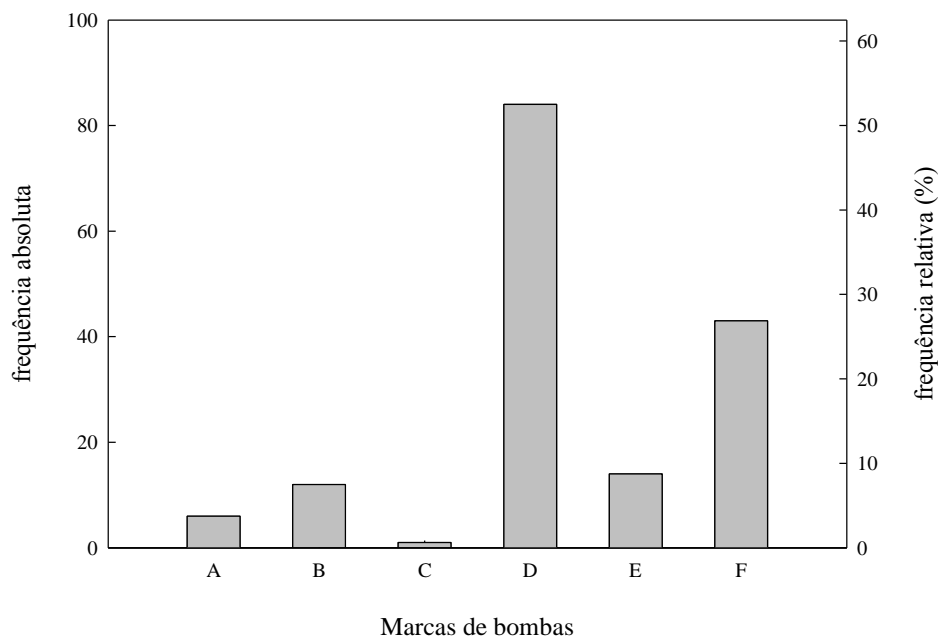


Figura 20. Distribuição das marcas de bombas encontradas entre as 160 estações de bombeamento estudadas.

Em relação ao tamanho, 87,5% das bombas estudadas possuíam diâmetro de flange de entrada entre 250 e 500 mm, dado próximo ao obtido por Ramão (2011) quando avaliou 61 EB no município de Itaqui – RS e observou que em 73% delas a entrada esteve entre 350-600 mm. Observou-se a existência de bombas com mais de 30 anos de operação, porém este dado

não foi quantificado, pois a maioria dos produtores não sabiam informar a idade precisa dos equipamentos.

#### 4.1.7 Rendimento global

O rendimento global esteve abaixo de 60% em 55% das EB, e em 24,4% delas foi superior a 70%. A Figura 21 mostra a distribuição da frequência dos rendimentos globais das 160 EB estudadas. Na média o rendimento foi de  $57 \pm 15\%$ , valor abaixo do proposto por Azevedo Neto et al. (1998) que sugerem valores acima de 67%, mas concordando com Abadia et al. (2008) que indicam que rendimentos globais superiores a 50% são classificados como “excelente”, enquanto de 40-50% são classificados como “bons”. Moises (2009) encontrou o rendimento global de 50% para as EB que analisou na região central do RS, onde as bombas usadas são de menor tamanho e, portanto, fisicamente aptas a menores rendimentos. Na Espanha, Abadia et al. (2008), Vera et al. (2010), Moreno et al. (2010) encontraram 54,8, 50,2 e 47,9%, respectivamente para o rendimento global em EB que atendem a sistemas de irrigação localizada. Macintyre (1987) sugere que a bomba deva ser escolhida de forma que seu rendimento seja superior a 75%, o que combinando com o uso de motor elétrico, trabalhando em plena carga para obtenção do máximo rendimento, que deve ser superior a 90% (OLIVEIRA FILHO et al., 2010) e com sistema de transmissão mecânica ajustado (rendimento de 95%) conduzem a expectativa de rendimento global acima de 65%. Das 160 EB avaliadas, apenas 56 (35%) apresentaram rendimento global acima de 65%, o que indica existir possibilidades de melhorias técnicas (escolha de bombas e motores adequados) a serem estudadas, visando aumentar este índice.

#### 4.1.8 Altura manométrica

A altura manométrica variou de 3,2 a 28,4 m com média de  $13,2 \pm 5,4$ m. Estes valores são inferiores ao publicado por Arns (1995) de 17,74 m como média de 642 EB avaliadas na mesma região. Este fato pode ser atribuído à preferência por áreas com baixas alturas geométricas associadas a medidas de reposicionamento de EB, redução no comprimento das tubulações, adequação dos diâmetros as vazões de projeto e redução de peças especiais.

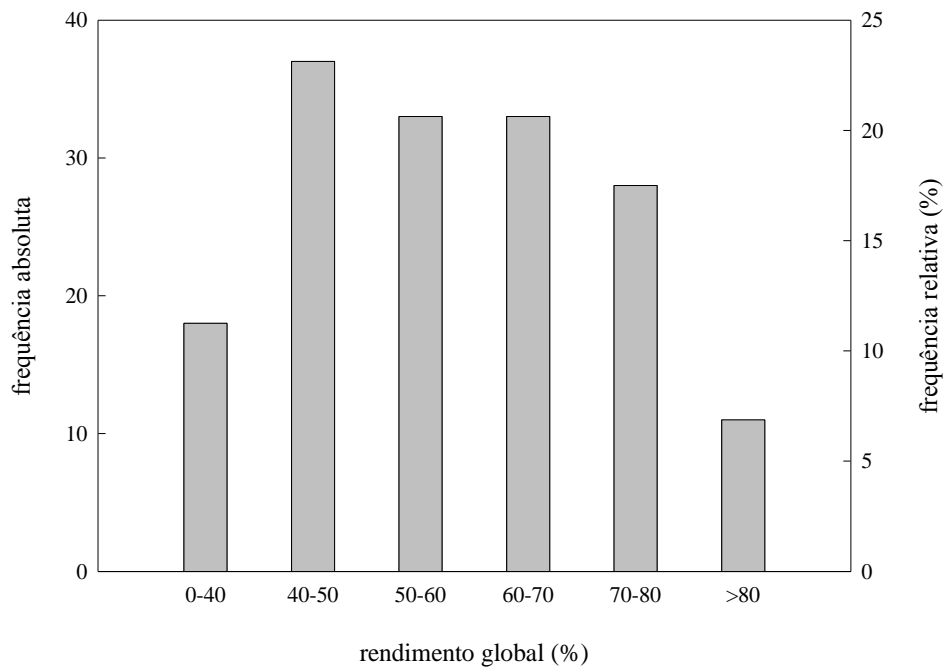


Figura 21. Distribuição do rendimento global das 160 estações de bombeamento estudadas.

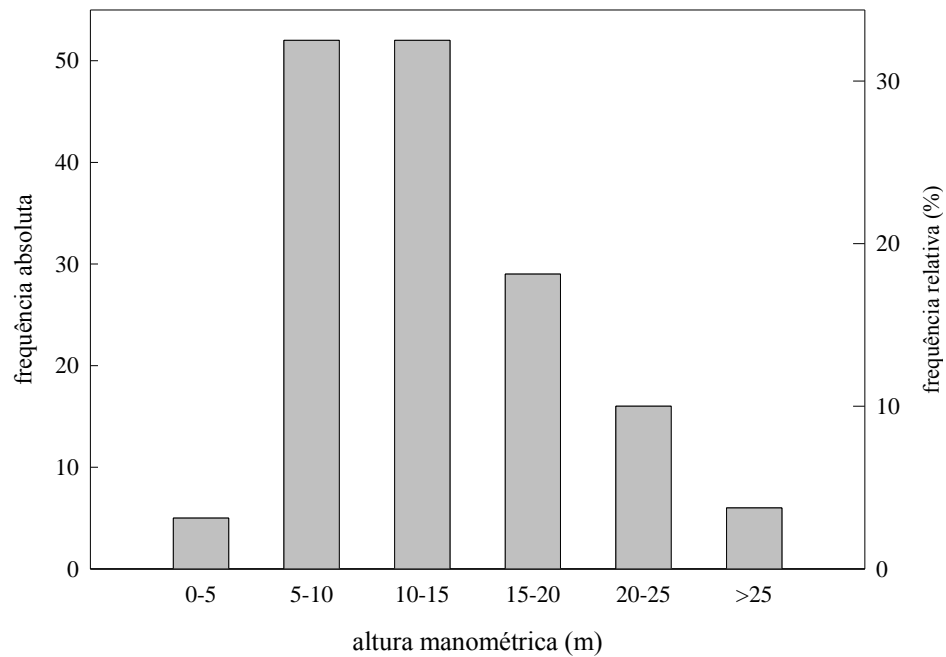


Figura 22. Distribuição das alturas manométricas das 160 estações de bombeamento estudadas.

Apenas 3,1% das EB avaliadas apresentaram alturas manométricas menores de 5,0 m, e em 104 delas (65%) a altura manométrica estava entre 5,0 e 15,0 m (Figura 22). As alturas geométricas variaram entre 2,0 e 25,62 m o que está associado à topografia da região que apresenta relevo suavemente ondulado (4 a 8% de declividade). A perda de energia nas tubulações ficou entre 1,5 e 166,9% em relação à altura geométrica das EB (Figura 23), indicando que existem itens de dimensionamento que devem ser revistos. Apesar de em 56,8% dos casos as perdas de energia representarem menos de 20% da altura geométrica, em 26% das EB as perdas de energia são superiores a 30% da altura geométrica de recalque e em apenas 25% dos casos as perdas estão abaixo de 10%, o que consideramos insatisfatório. Observou-se que as perdas de energia superiores a 60% ocorreram em EB cuja altura geométrica é inferior a 10m.

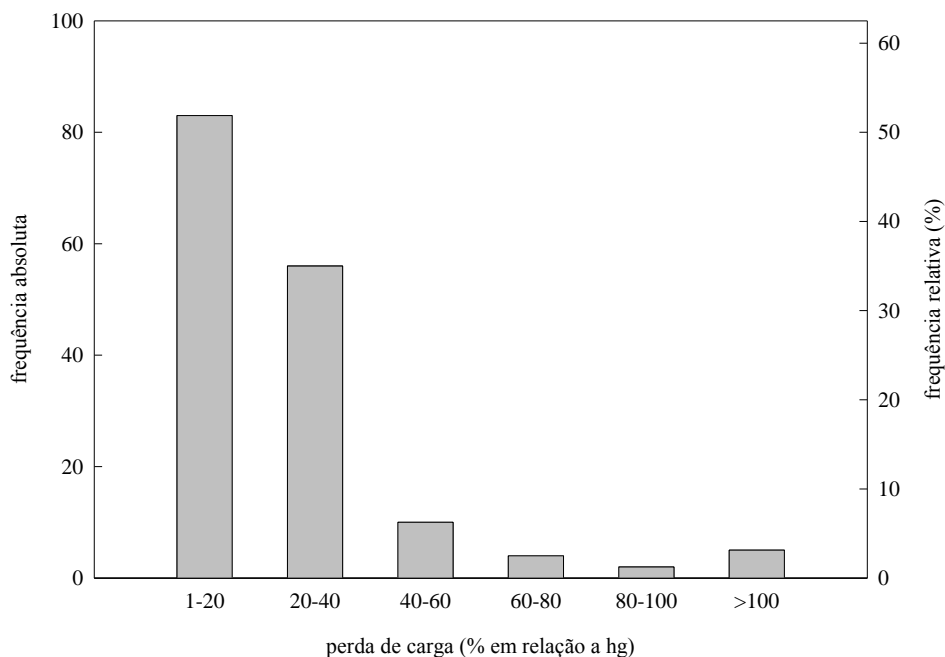


Figura 23. Distribuição da perda de carga percentual em relação à altura geométrica para as 160 estações de bombeamento estudadas.

## 4.2 Adequação das estações de bombeamento

Com o objetivo de otimizar o dimensionamento das EB estudadas foram realizados três procedimentos: adequação das tubulações, escolha das bombas e escolha dos motores. A seguir serão apresentados os resultados obtidos com os ajustes realizados

#### 4.2.1 Tubulações e velocidade

Em 27 EB o diâmetro determinado foi inferior aquele presente no levantamento de campo e em 31 casos os valores foram iguais. Assim as velocidades recalculadas foram superiores ou se igualaram às já existentes em 58 casos (36,25%), onde a tubulação não motivava consumo elevado de energia. Já em 102 EB (63,75%) os diâmetros calculados foram maiores do que os existentes, resultando em velocidade inferior, indicando a possibilidade de economia de energia através da adequação dos mesmos, apesar do maior custo com a tubulação. Segundo Lima et al. (2009) quando o diâmetro da tubulação é inferior ao recomendado ocorre aumento da potência necessária do conjunto motobomba o que propicia maior custo com a EB e maior despesa com energia embora propicie economia na compra da tubulação. A Figura 24 apresenta a distribuição dos diâmetros antes e depois do processo de otimização e nos permite observar que a frequência das tubulações de menores diâmetros diminuiu e as de maior diâmetro aumentou após o processo de otimização, o que indica que o diâmetro das tubulações é uma das causas do elevado uso de energia no processo de irrigação superficial. Desta forma as tubulações mostraram padrão de sub dimensionamento nas condições em que foram encontradas em campo.

A velocidade média inicial foi de  $1,6 \pm 0,6 \text{ m s}^{-1}$  e após o processo de otimização ficou em  $1,1 \pm 0,27 \text{ m s}^{-1}$ . Observa-se que velocidades mais baixas geram menores perdas de energia reduzindo o consumo e consequentemente o custo operacional. Os valores observados inicialmente são inferiores a  $2,58 \text{ m s}^{-1}$ , encontrado por Marcolin e Robaina (2002), justificáveis pelas maiores potências instaladas que viabilizam a aquisição de tubulações de maior diâmetro. Entre as 160 EB as velocidades variaram entre  $0,44$  e  $2,18 \text{ m s}^{-1}$ . Já Perroni et al. (2011) encontraram valores de velocidade econômica entre  $0,67$  e  $1,63 \text{ m s}^{-1}$  para tubos de aço galvanizado e de  $0,62$  a  $1,97 \text{ m s}^{-1}$  para tubos de PVC e indicam que quanto maior o tempo de uso, menores os valores de velocidade considerados econômicos, pois o custo operacional da tubulação aumenta em relação ao custo fixo.

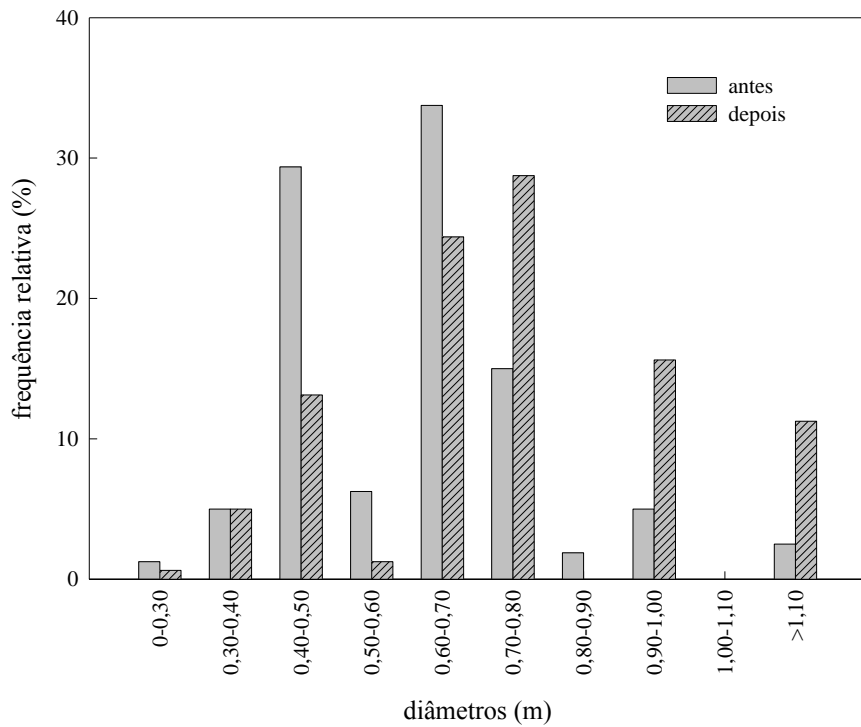


Figura 24. Distribuição dos diâmetros antes e após o processo de otimização das 160 estações de bombeamento estudadas.

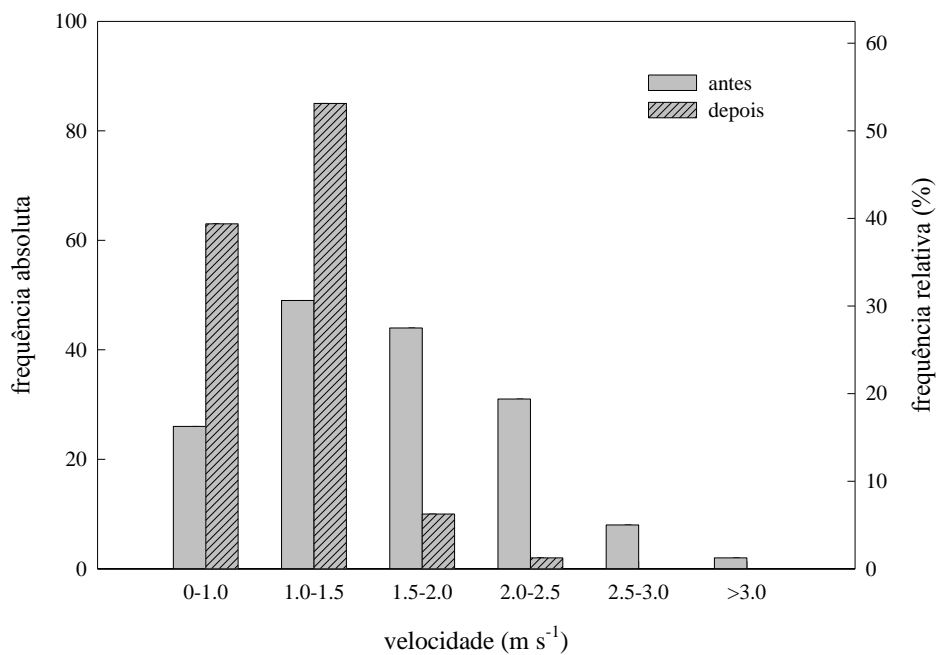


Figura 25. Distribuição das velocidades antes e após o processo de otimização das 160 estações de bombeamento estudadas.

Observando a Figura 25 verifica-se que houve um aumento no número de EB com velocidade entre 1,0 e 1,5 m s<sup>-1</sup> que inicialmente eram 49 (30,6%) e após o processo de otimização passaram a 85 (53,1%). Também houve um incremento de 23,1% no número de EB com velocidades abaixo de 1,0 m s<sup>-1</sup>, e apenas 2 tiveram velocidade recalculada acima de 2,0 m s<sup>-1</sup>. Este fato indica que a adequação econômica das velocidades das tubulações sugere valores mais baixos que os usuais para as mesmas e que este é um dos pontos geradores de consumo de energia acima do necessário. Quando se estudou o efeito da possível substituição das tubulações, em relação à potência ativa (kW), observou-se uma redução de 10,19% ocorrendo, conseqüentemente, a mesma redução no consumo de energia (kWh) e no desembolso (Tabela 4). Considerando a área estudada (46.986,5 ha) como uma amostra representativa da área de 333.695,0 ha cultivada com arroz, na FO na safra de 2013/2014, pode-se estimar que a adequação da tubulação poderia gerar uma economia anual de R\$ 3.610.579,9 no desembolso com energia, ou de 12.799,3 kW instalados e 23.028.021,61 kWh consumidos.

#### 4.2.2 Escolha de bombas e motores

Foram identificadas 68 bombas de quatro diferentes fabricantes: Fabricante A, Fabricante B, Fabricante C e Fabricante D, presentes nas EB de água na FO do RS. Não é interesse desta pesquisa caracterizar a marca da bomba e sim suas características hidráulicas e adequação as necessidades dos produtores. As curvas características das bombas selecionadas foram obtidas, sendo 14 da marca A, 18 da marca B, 18 da marca C e 18 da marca D.

As bombas foram aquelas que apresentavam conjuntos de valores vazão e altura manométrica compatíveis com as necessidades das lavouras de arroz. As

Tabela 5 e 6 apresentam a faixa de operação das bombas selecionadas. A média dos máximos rendimentos das 68 bombas selecionadas foi de  $85,29 \pm 2,46$  %, com máximo e mínimo valor encontrado de 89 e 73%, respectivamente.

Observa-se na Tabela 4, que quando se substituiu apenas a tubulação houve uma redução de 10,19% na energia demandada, porém a adequação de bomba e motor permitiram uma redução de 21% na potência ativa e conseqüentemente na quantidade de kWh consumidos. Assim, as três ações propostas conduzem a economia de 31,20% em relação a condição encontrada em campo.

A Tabela 5 permite observar que 64,7 % das bombas disponíveis operam para atender AMT entre 10 e 30 m, o que corresponde a topografia da região, uma vez que os sistemas de

bombeamento não exigem pressurização. Já a Tabela 6 mostra uma distribuição homogênea das vazões mostrando disponibilidades de bombas para recalcar entre 97 e 2400 L s<sup>-1</sup>, faixa que atende lavouras de diferentes tamanhos.

Para cada EB estudada foi escolhida a bomba que apresentou melhor rendimento para o ponto de trabalho (vazão e altura manométrica de projeto). Na seqüência foram escolhidos os motores adequados às potências demandadas pelas vazões e alturas manométricas definidas com a escolha das tubulações e das bombas mais eficientes. O resultado indica que houve um aumento médio de 18% no rendimento dos conjuntos que passou de 57% para 75%.

Tabela 4. Potência demandada, consumo e desembolso para três situações avaliadas em 160 estações de bombeamento de água em lavouras de arroz na FO do RS.

Situação	kW	kWh	R\$	R\$ ha <sup>-1</sup>
Antes (condição inicial)	17.680	31.823.946	4.988.920,00	106,18
Adequação de tubulação	15.879	28.581.446	4.480.606,20	95,36
Adequação da tubulação + bomba+motor	12.164	21.894.728	3.432.354,50	73,05

Em nove EB estudadas as bombas escolhidas apresentaram rendimento < 80% nos pontos de trabalho selecionados, mas foram as melhores entre as 68 disponíveis e apenas três apresentaram rendimento de 70%.

Tabela 5. Distribuição das 68 bombas comercialmente disponíveis e selecionadas em relação a altura manométrica correspondente ao ponto de trabalho de máximo rendimento e máxima vazão.

Altura manométrica (m)	frequência absoluta	frequência relativa (%)
0-10	6	8,82
10-20	20	29,41
20-30	24	35,29
30-40	10	14,71
40-50	4	5,88
>50	4	5,88



Tabela 6. Distribuição das 68 bombas comercialmente disponíveis e selecionadas em relação à vazão correspondente ao ponto de trabalho de máximo rendimento e máxima altura manométrica

Vazão (L s <sup>-1</sup> )	frequência absoluta	frequência relativa (%)
0-100	2	2,94
100-200	9	13,24
200-300	14	20,59
300-400	7	10,29
400-500	7	10,29
500-1000	13	19,12
1000-1500	7	10,29
1500-2000	7	10,29
>2000	2	2,94

#### 4.2.3 Índices de desempenho calculados a partir dos projetos

Foram determinados nove índices de desempenho que estão apresentados no Quadro

1. O quadro 2 apresenta as grandezas envolvidas em cada um dos índices propostos.

Índice	Potência ativa	Potência nominal	Consumo (P <sub>ativa</sub> *tempo)	Área atendida	Vazão	Volume	Altura geométrica	Perda de carga
Id <sub>0</sub>	X			X			X	
Id <sub>1</sub>	X			X				
Id <sub>2</sub>			X	X				
Id <sub>3</sub>			X			X		
Id <sub>4</sub>	X				X		X	X
Id <sub>5</sub>		X			X		X	
Id <sub>6</sub>		X		X			X	
Id <sub>7</sub>			X			X	X	X
η <sub>global</sub>	X				X		X	X

Quadro 2. Grandezas utilizadas para definir os dez índices de desempenho propostos para uso em estações de bombeamento de água em lavouras de arroz irrigado.

Todos os índices que relacionam potência com área, indiretamente relacionam vazão com área e conseqüentemente com vazão unitária, de forma que os índices Id<sub>0</sub>, Id<sub>1</sub>, Id<sub>2</sub> e Id<sub>6</sub> dependem da quantidade de água utilizada por hectare. Como já afirmado anteriormente este não é objeto deste estudo, mas apresentamos o fato para sugerir que trabalhos futuros possam determinar vazões unitárias adequadas a obtenção de produtividades economicamente viáveis. Por outro lado podemos inferir que os valores dos índices citados podem indicar elevado uso de água por unidade de área, porém esta não é a única causa sendo necessário investigar (para

cada índice) os fatores envolvidos na sua determinação. Já os índices  $Id_2$ ,  $Id_3$  e  $Id_7$  relacionam o consumo de energia e então levam em conta o tempo de bombeamento, demonstrando que estações com potência instalada alta que operarem por menos tempo poderão ter índices mais baixos que outras que operem por tempos maiores. Desta forma índices que relacionem a potência com grandezas de produção (área, vazão ou volume) não poderão ser índices que sozinhos possam ser usado com garantia de determinação de uso eficiente de energia.

A Figura 26 apresenta a distribuição do índice de desempenho  $Id_0$ . Entre as 160 EB estudadas, a média do  $Id_0$  foi de  $43,9 \pm 16,8 \text{ W ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$ , variando entre 14,8 e  $116,6 \text{ W ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$ . Observou-se que 16,87% das EB estudadas apresentaram menos de  $30 \text{ W ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$ , valor este apresentado por Ocacia et al. (2002) como limite para obtenção de um bom desempenho. A variabilidade observada na Figura 26 pode ser atribuída ao fato de lavouras pequenas, com menores potências instaladas, terem reduzido apelo ao processo de uso eficiente de energia, também observado por Ocacia et al. (2002) que encontraram valores entre  $25 \text{ W ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$  e  $104,2 \text{ W ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$ .

Já em relação ao índice  $Id_1$ , caracterizado pela relação entre a potência e a área atendida (Figura 27), 75% das EB apresentaram valor abaixo de  $0,55 \text{ kW ha}^{-1}$ , com média de  $0,443 \pm 0,206 \text{ kW ha}^{-1}$ , valor inferior aos encontrados por Marcolin & Robaina (2002) de  $0,684 \text{ kW ha}^{-1}$  em 31 EB na região central do RS. Monachesi (2005) sugere que este índice seja usado com cautela como indicador de eficiência energética pois não permite a comparação de EB com características físicas diferente. O  $Id_0$  apresentou uma distribuição em torno do valor 30, enquanto o  $Id_1$  apresentou maior variabilidade sem tendência a concentração em torno de um valor, mas com 46 % dos valores abaixo de  $0,390 \text{ kW ha}^{-1}$ . De maneira geral também se pode observar que nas lavouras menores os índices tenderam a apresentar um valor mais alto, o que indica que nas potências mais baixas existe menor preocupação com eficiência no uso da energia devido ao menor consumo.

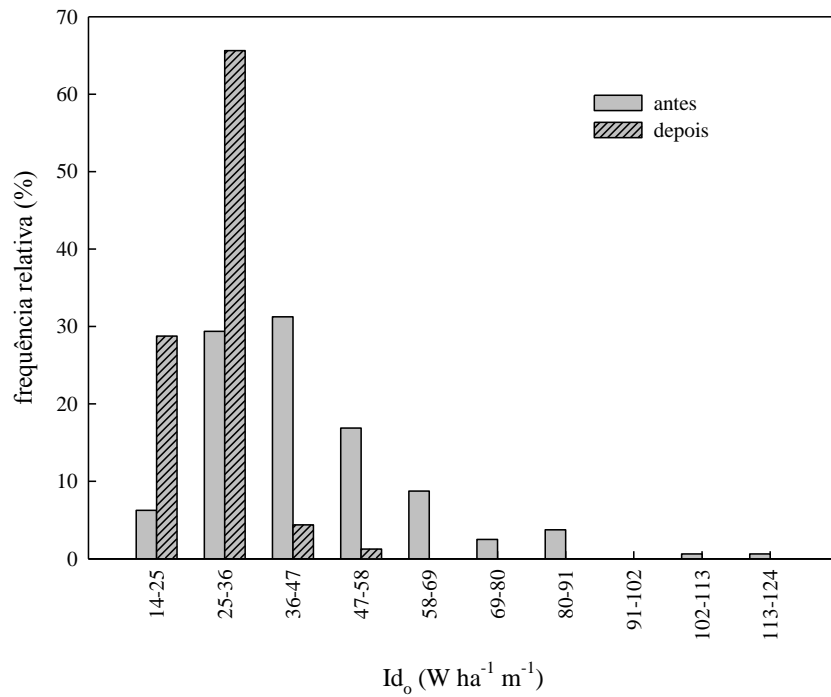


Figura 26. Distribuição do índice de desempenho  $Id_0$ , antes e depois do processo de otimização para as 160 estações de bombeamento estudadas.

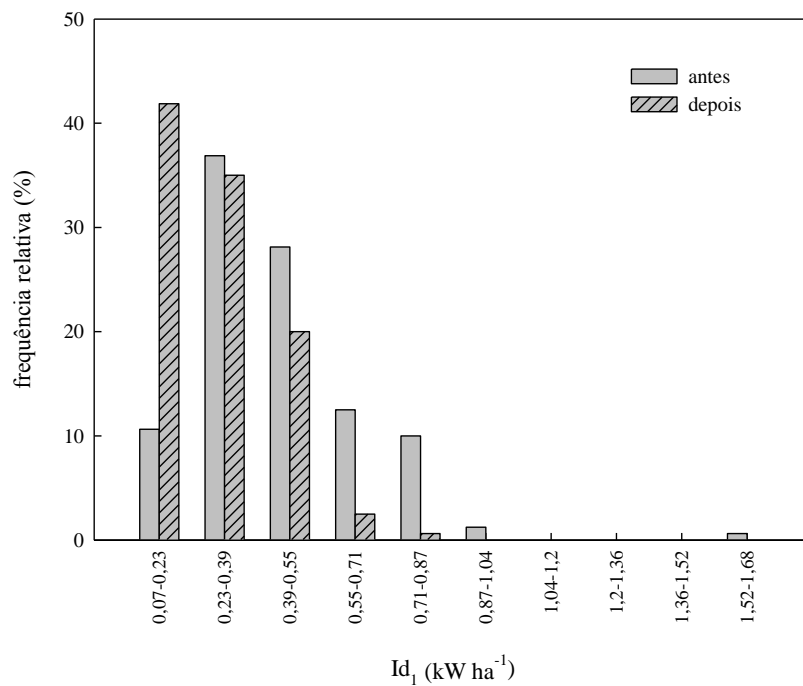


Figura 27. Distribuição do índice de desempenho  $Id_1$ , antes e depois do processo de otimização para as 160 estações de bombeamento estudadas.

Estudando o consumo das EB foram avaliados os índices  $Id_2$  e  $Id_3$  cujas médias foram de  $798,83 \text{ kWh ha}^{-1}$  e  $0,0644 \text{ kWh m}^{-3}$ , respectivamente. A variabilidade destes índices nas EB estudadas pode ser observada na Figura 28 e na Figura 29. Para uso como referência estes índices não demonstram uniformidade. Alguns estudos, em diferentes locais, indicam expressiva variabilidade podendo estar associada às alturas manométricas características do local, ao sistema de irrigação usado, e ao tipo e tamanho das bombas. Neste sentido Moreno et al. (2010) estudaram 15 EB na Espanha, em sistemas de irrigação pressurizado (micro aspersão e gotejamento) encontrando as médias de  $2.792 \text{ kWh ha}^{-1}$  e de  $0,872 \text{ kWh m}^{-3}$ . Urrestarazu & Burt (2012) avaliaram mais de 15.000 EB na Califórnia e obtiveram a média de  $0,16 \text{ kWh m}^{-3}$ . Souza et al. (2001) acompanhando um período de 10 anos no perímetro irrigado Senador Nilo Coelho observaram a redução de 0,5 para  $0,3 \text{ kWh m}^{-3}$  e de  $689,26$  para  $378,33 \text{ kWh ha}^{-1}$ , enquanto Medeiros et al. (2003) no perímetro irrigado Pirapora encontraram  $0,47 \text{ kWh m}^{-3}$  e  $4.401 \text{ kWh ha}^{-1}$ , o que mostra uma grande variabilidade desses indicadores, sendo portanto difícil efetuar comparações sob diferentes condições.

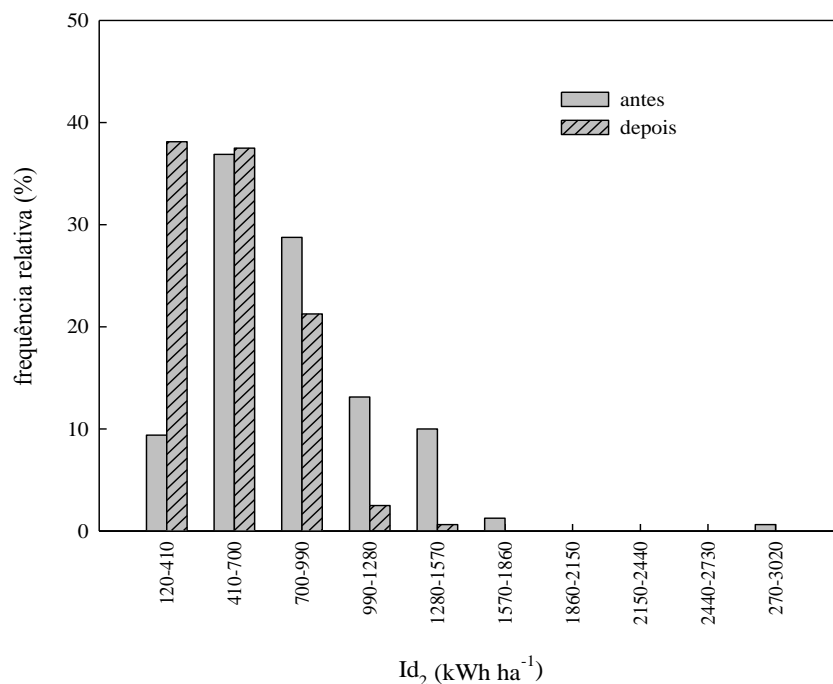


Figura 28. Distribuição do índice de desempenho  $Id_2$ , antes e depois do processo de otimização para as 160 estações de bombeamento estudadas.

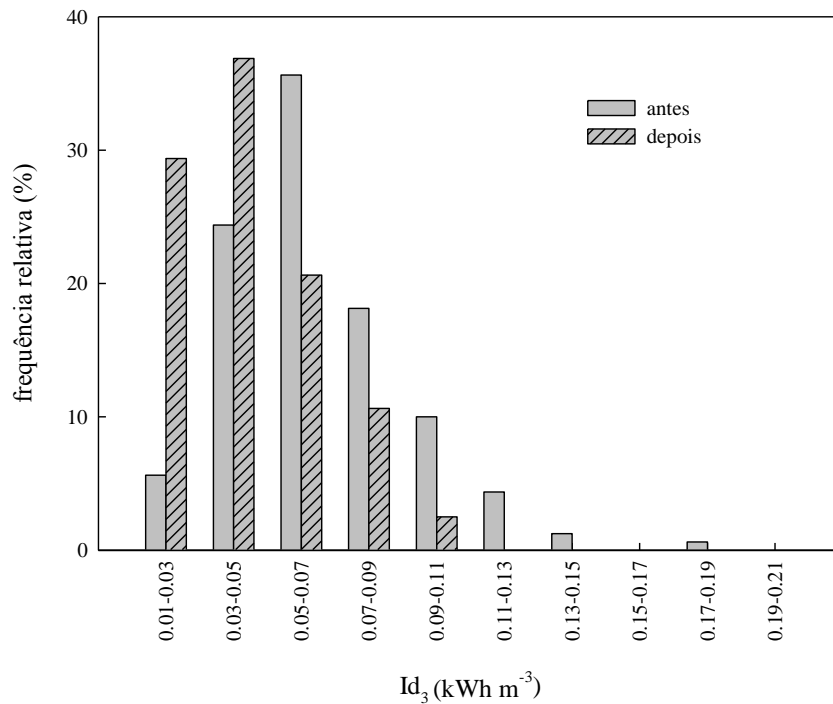


Figura 29. Distribuição do índice de desempenho  $Id_3$ , antes e depois do processo de otimização para as 160 estações de bombeamento estudadas.

O índice  $Id_4$  mostrou uma distribuição regular entre os valores obtidos nas condições encontradas em campo (Figura 30), e mostrou resposta ao processo de otimização de tubulação, bomba e motor, levando 85% das EB a índices menores de  $13,5 \text{ kW (m}^3 \text{ s}^{-1})^{-1} \text{ m}^{-1}$ . Em função de o índice usar como referência a vazão e a altura de recalque, as EB que permaneceram com valores entre  $13,5$  e  $18,3 \text{ kW (m}^3 \text{ s}^{-1})^{-1} \text{ m}^{-1}$  justificam o fato pela inexistência de bombas que atenda a todas as situações encontradas com rendimento superior a 75%.

O índice  $Id_5$  mostrou o mesmo comportamento do que o  $Id_4$ , em função de representar estrutura semelhante, porém usando a potência nominal do motor como referência e não a potência ativa como usa o  $Id_4$ . Observa-se na Figura 31 que as faixas de valores encontradas são mais amplas, oportunizadas pelas maiores potências instaladas em relação às potências ativas, mas a relação entre elas e a vazão e altura de recalque manteve o mesmo comportamento.

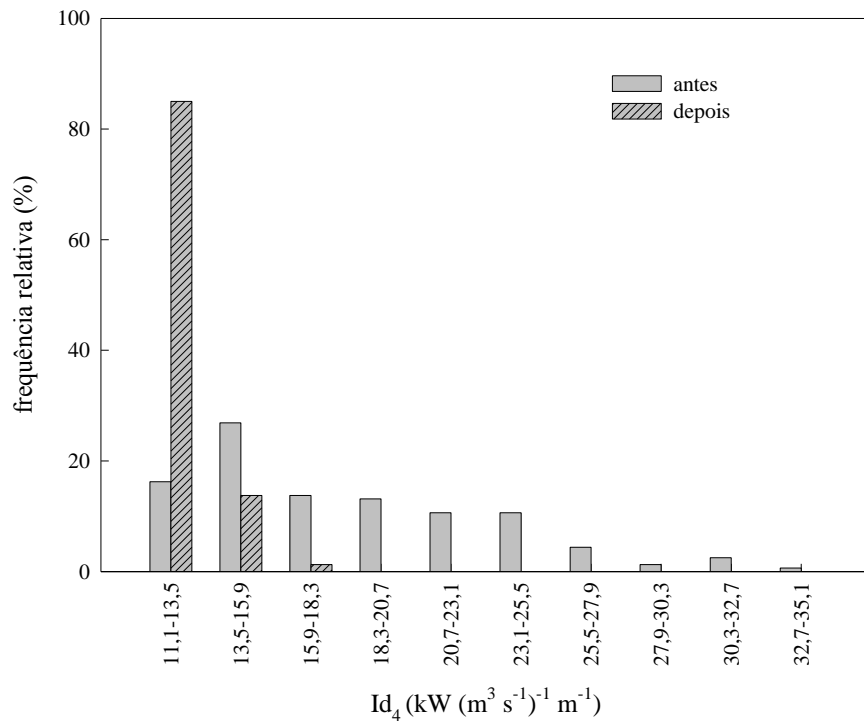


Figura 30. Distribuição do índice de desempenho  $Id_4$ , antes e depois do processo de otimização para as 160 estações de bombeamento estudadas.

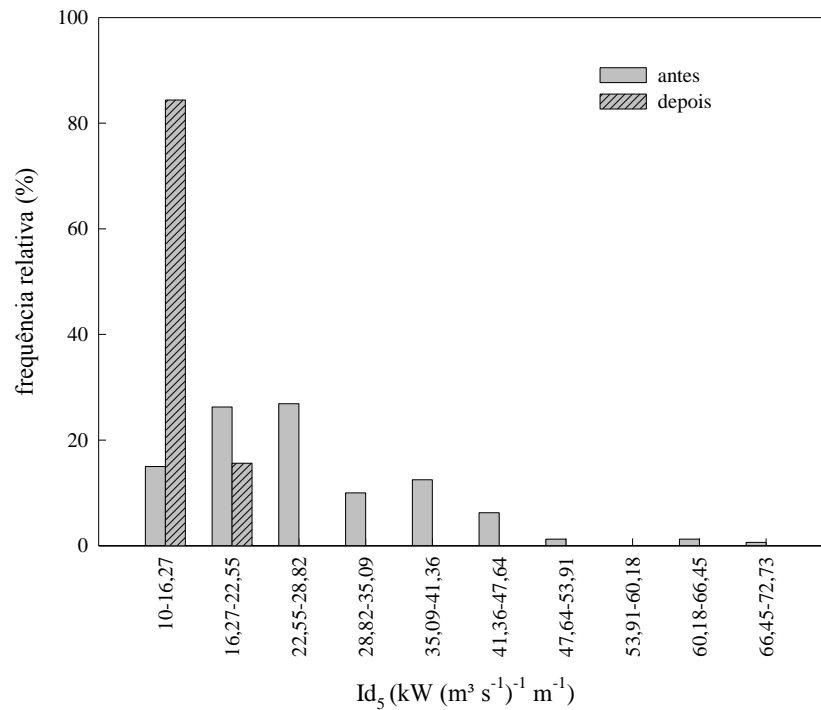


Figura 31. Distribuição do índice de desempenho  $Id_5$ , antes e depois do processo de otimização para as 160 estações de bombeamento estudadas.

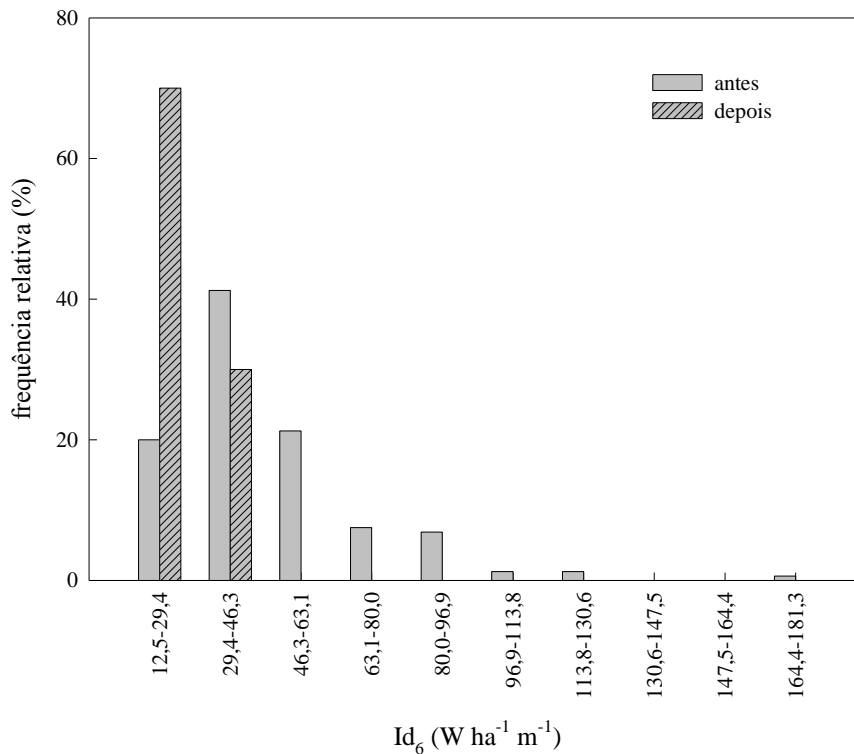


Figura 32. Distribuição do índice de desempenho  $Id_6$ , antes e depois do processo de otimização para as 160 estações de bombeamento estudadas.

Os índices  $Id_6$  e  $Id_7$  se mostraram sensíveis as alterações propostas, porém o  $Id_6$  manteve um maior percentual de estações na segunda categoria de valores (29,4 a 46,3  $W\ ha^{-1}\ m^{-1}$ ) o que ocorreu em função da variação dos valores de vazão unitária encontrados, gerando consumo maior por unidade de área (Figura 32).

Já o índice  $Id_7$ , que inicialmente apresentava melhor distribuição entre as classes, apresentou maior concentração de valores na classe 0,308 a 0,376  $kWh\ m^{-3}\ (100m)^{-1}$  indicando a possibilidade de redução de valores após o processo de otimização das EB (Figura 33).

O rendimento global encontrado em condições operacionais em campo variou de 27 a 93% (Figura 34). A otimização das EB é identificada pelo deslocamento dos rendimentos para a categoria de 75-81% o que demonstra existirem equipamentos capazes de reduzir o consumo de energia pela maior eficiência de seu uso na produção de trabalho.

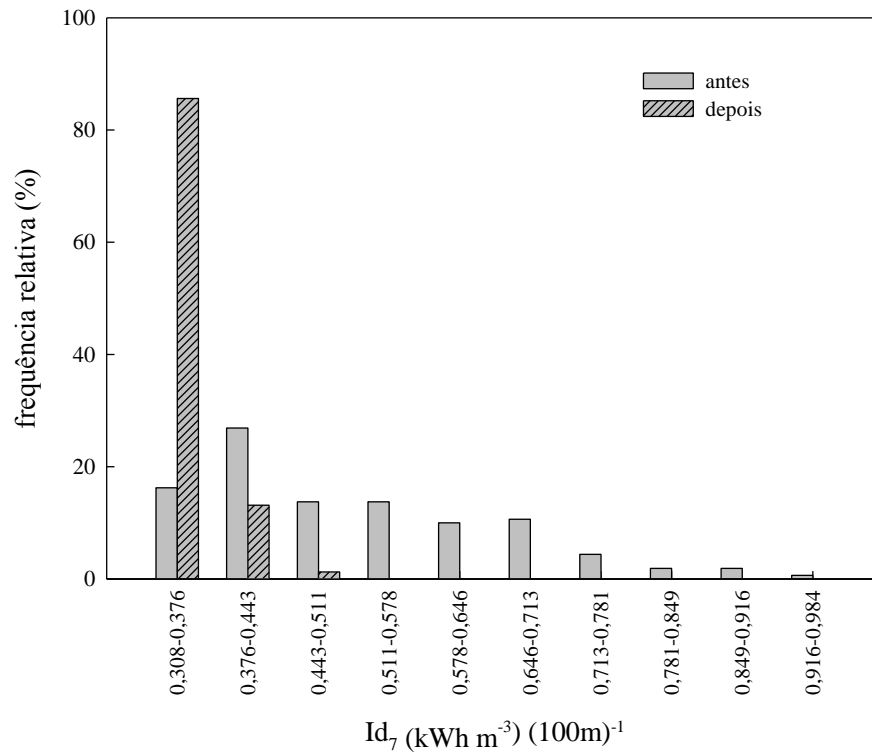


Figura 33. Distribuição do índice de desempenho  $Id_7$ , antes e depois do processo de otimização para as 160 estações de bombeamento estudadas.

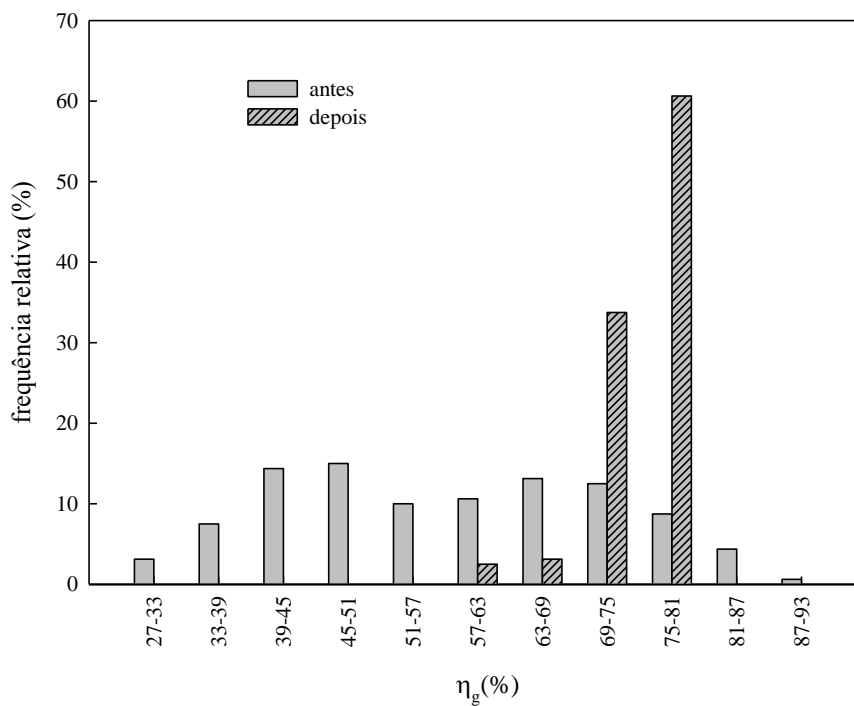


Figura 34. Distribuição do rendimento global ( $\eta_g$ ), antes e depois do processo de otimização, para as 160 estações de bombeamento estudadas.



### 4.3 Análise comparativa dos índices de desempenho

Analisando a potência e o consumo de energia antes e depois do processo de otimização foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Grandezas medidas em situação real de funcionamento (antes) e estimadas para situação otimizada pela adequação da tubulação, bomba e motor (depois) para as 160 estações de bombeamento estudadas.

Grandeza (consumo)	padrão	antes	depois	economia (%)
kW	Total	17.679,9	12.163,7	31,20
kW	Média	110,5	76,0	31,20
kW ha <sup>-1</sup>	Média	0,376	0,243	31,20
cv	Total	24.021,7	16.526,8	31,20
cv ha <sup>-1</sup>	Média	0,511	0,352	31,20
kWh	Total	31.823.946,0	21.894.727,8	31,20
kWh	Média	198.899,6	136.842,0	31,20
R\$	Total	4.988.920,8	3.432.354,4	31,20
R\$ ha <sup>-1</sup>	Média	106,2	73,1	31,20

Tabela 8. Valor médio dos índices de desempenho avaliados em situação real de funcionamento (antes) e estimadas para situação otimizada pela adequação da tubulação, bomba e motor (depois) para as 160 estações de bombeamento estudadas.

Índice	unidade	antes	depois	% de variação
Id <sub>0</sub>	W ha <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	43,87	27,59	37,11↓
Id <sub>1</sub>	kW ha <sup>-1</sup>	0,44	0,29	34,09↓
Id <sub>2</sub>	kWh ha <sup>-1</sup>	798,83	529,74	33,68↓
Id <sub>3</sub>	kWh m <sup>-3</sup>	0,0644	0,0434	32,60↓
Id <sub>4</sub>	kW (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	18,33	13,06	28,75↓
Id <sub>5</sub> *	kW (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	26,48	14,55	45,05↓
Id <sub>6</sub> *	W ha <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	47,01	27,53	41,43↓
Id <sub>7</sub>	kWh m <sup>-3</sup> (100 m) <sup>-1</sup>	0,51	0,36	28,68↓
η <sub>g</sub>	%	57,40	75,30	31,18↑

\* com base em potência nominal

Os índices  $Id_2$ ,  $Id_3$  e  $Id_7$ , que usam o consumo como referência, foram os que apresentaram a menor variação percentual entre o antes e o depois, em função da padronização do mesmo para um tempo de operação de 1800 horas em todas as EB estudadas. Já os índices  $Id_5$  e  $Id_6$  foram os que apresentaram a maior redução percentual (Tabela 8), indicando a possibilidade de redução significativa (41,05 e 41,43%) da potência instalada em relação a área atendida e a altura geométrica de recalque. Isto ocorreu em função destes índices usarem a potência nominal, que segundo levantamento realizado era na maioria dos casos superior a necessária.

#### **4.4 Proposta de índices de desempenho e suas classes, para estações de bombeamento.**

Cada um dos índices estudados foi categorizado de forma a compor classes para permitir a avaliação de projetos e diagnóstico de sistemas em funcionamento. As classes indicam padrões das EB em relação ao consumo de energia de forma que “muito ruim” e “ruim” caracterizam estações que consomem mais energia do que a necessária e que possuem condições de, através da substituição de tubulação e/ou bomba e/ou motor, reduzir seu consumo com a mesma produção. As classes “bom” e “muito bom” indicam que o consumo está dentro de faixas consideradas aceitáveis em função da eficiência dos equipamentos disponíveis, mas que podem ser melhoradas. Já a classe “excelente” indica que a EB está em condições ideais e que muito pouco ou nada existe a ser feito para melhorar sua situação. Existem outros aspectos, não apresentados neste trabalho, que podem contribuir para redução do consumo de energia, como por exemplo a redução na vazão.

Este trabalho se deteve nos aspectos referentes a escolha da bomba, do motor e do diâmetro da tubulação. Não foi considerada a possibilidade de substituição da tubulação por outra de material menos rugoso, nem a redução no comprimento das mesmas, sendo ambos fatores determinantes da perda de energia, conseqüentemente da altura manométrica e da potência demandada pela EB. Outro aspecto que merece atenção é a vazão utilizada nos projetos que apresentou grande variabilidade em função da imprecisão na determinação da necessidade real de água pela lavoura de arroz. A adequação de vazão para cada uma das áreas irrigadas poderia indicar uma redução ainda maior no consumo. Esta alternativa não foi estudada, pois não fez parte dos objetivos deste trabalho, mas entende-se como uma possibilidade de economia no processo.

Observou-se que na diversidade de índices avaliados houve variabilidade de enquadramento. Isso se deveu principalmente as grandezas envolvidas em cada um deles.

Assim aqueles que apenas relacionaram potência instalada com área irrigada não se mostraram interessantes para comparar EB distintas, pois não levam em consideração as diferenças físicas apresentadas pelos terrenos nem os diferentes consumos de água (vazão unitária) entre lavouras. No entanto esses índices que relacionam potência ou consumo com área servem de referência para avaliar a adequação das áreas ao cultivo de arroz, de forma que se podem estabelecer valores que indiquem áreas impróprias ao cultivo, em função do custo operacional a ser gerado com a irrigação.

#### 4.4.1 Índice de desempenho $Id_0$ ( $W ha^{-1} m^{-1}$ )

A Tabela 9 apresenta a classificação proposta para o  $Id_0$ , utilizando como referência a proposta de Ocacia et al. (2002) de que valores acima de  $30 W ha^{-1} m^{-1}$  indicam EB que deveriam ser evitadas pelo alto custo energético. Incluímos neste trabalho as categorias que classificamos como “muito ruim” e “ruim” e também aquelas que classificamos como “muito bom” e “excelente”. Observou-se que, mesmo depois do processo de adequação dos itens tubulação, bomba e motor, ainda se manteve um baixo percentual de EB classificadas como “excelente” o que pode ser atribuído ao uso de vazões acima da necessidade, ao dimensionamento da tubulação com base em aspecto de minimização de custo total (e não no menor consumo energético) e na dificuldade de encontrar bombas que atendam as necessidades com rendimentos acima de 85% o que seria ideal.

Observou-se que em áreas e/ou alturas de recalque pequenas se mantiveram 5 EB com  $Id_0 > 40$ , devido a inexistência de bombas de alto rendimento para operar nestas condições. No entanto, 73,13% das EB foram classificadas como “muito bom” e 4,38% como “excelente” totalizaram 77,51% em condições ótimas de dimensionamento o que consideramos significativo (Tabela 9).

No apêndice 2 são apresentadas as Figura 35 a 43, correspondentes aos índices estudados e sua categorização.

Tabela 9. Proposta de padrões de dimensionamento tendo como critério o índice  $Id_0$  e categorização para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.

$Id_0$ (W ha <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> )	categoria	Frequência absoluta		Frequência relativa (%)	
		Antes	depois	antes	depois
<20	Excelente	6	7	3,75	4,38
20-30	Muito bom	21	117	13,13	73,13
30-40	Bom	49	31	30,63	19,38
40-50	Ruim	42	4	26,25	2,50
>50	Muito Ruim	42	1	26,25	0,63

#### 4.4.2 Índice de desempenho $Id_1$ (kW ha<sup>-1</sup>)

O índice  $Id_1$  é considerado simplista por apenas relaciona a potência ativa com a área irrigada, sem levar em consideração características físicas da mesma. Desta forma não é recomendado para comparação de EB que estejam operando em situações diversas. Por outro lado, valores elevados deste índice podem estar sugerindo que a área irrigada não seja adequada a irrigação de lavouras de arroz, pois a relação de quilowatts instalados por hectare acima de 0,50 é um indicativo de que a potência é elevada, o que segundo esta proposta classificaria a EB como “ruim” ou “muito ruim”. Observa-se na Tabela 10 que mesmo após o processo de otimização 16,88% das EB ainda permaneceram classificadas como “ruim”, com  $Id_1 > 0,5$  kW ha<sup>-1</sup>, o que coincide com alturas geométricas superiores a 17,5 m e /ou comprimentos acima de 400 m e vazão unitária acima de 2,0 L s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>, fato que colaborou para elevação deste índice. Também se observou que valores de  $Id_1 < 0,30$  kW ha<sup>-1</sup>, que classifica como “muito bom” e “excelente” foram obtidos quando a altura geométrica esteve abaixo de 12,5 m, havendo comprimentos de até 800m, o que mostrou que o comprimento da tubulação não é um fator que afete significativamente este índice.

Tabela 10. Proposta de padrões de dimensionamento tendo como critério o índice  $Id_1$  e categorização para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.

$Id_1$ (kW ha <sup>-1</sup> )	categoria	Frequência absoluta		Frequência relativa (%)	
		antes	depois	antes	depois
<0,10	Excelente	8	43	5,00	26,88
0,10-0,30	Muito bom	29	46	18,13	28,75
0,30-0,50	Bom	39	34	24,38	21,25
0,50-0,70	Ruim	33	27	20,63	16,88
>0,70	Muito Ruim	51	10	31,88	6,25

#### 4.4.3 Índice de desempenho $Id_2$ (kWh ha<sup>-1</sup>)

O índice  $Id_2$  relaciona o consumo de energia com a área irrigada sendo portanto dependente do tempo de operação da EB. Neste trabalho usou-se o tempo total de operação de 1800 h para permitir comparar as 160 estações. O comportamento da distribuição deste índice-  $Id_2$  (Tabela 11) foi muito semelhante ao  $Id_1$  (Tabela 10), uma vez que ambos possuem a mesma base. No entanto apresentou-se este índice, pois em situações reais, com tempos e operação variáveis poderá ser útil seu uso. As razões para permanência de EB classificadas como “ruim” ou “muito ruim” são as mesmas que geraram  $Id_1$  “ruim” e “muito ruim”, já descritas.

Tabela 11. Proposta de padrões de dimensionamento tendo como critério o índice  $Id_2$  e categorização para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.

$Id_2$ (kWh ha <sup>-1</sup> )	categoria	Frequência absoluta		Frequência relativa (%)	
		antes	depois	antes	depois
<250	Excelente	1	15	5,00	26,88
250-550	Muito bom	40	76	20,63	30,00
550-750	Bom	64	54	27,50	23,75
750-950	Ruim	21	10	18,13	14,38
>950	Muito Ruim	34	5	28,75	5,00

O consumo de energia por unidade de área atendida mostrou potencial para identificação da aptidão física da área ao cultivo de arroz, no entanto é importante observar os fatores envolvidos em sua concepção para possível identificação da fonte causadora do elevado consumo que só poderá ser atribuído a altura geométrica se todos os demais fatores estiverem ajustados a necessidade de irrigação.

#### 4.4.4 Índice de desempenho $Id_3$ ( $kWh\ m^{-3}$ )

A adequação dos equipamentos, gerando perda de energia aceitável, e escolha de bomba e motor compatíveis com as necessidades e com o melhor rendimento entre os disponíveis comercialmente, faz com que a potência ativa passe a ser dependente da altura geométrica de recalque que por sua vez é uma variável física dependente da área de cultivo, e da vazão recalçada. A quantidade de energia necessária para elevar  $1\ m^3$  de água ao ponto de distribuição dentro da lavoura passa então a ser dependente da altura geométrica de recalque. Assim áreas cujas alturas de recalque estiveram abaixo de 13 m foram classificadas como “muito bom” ou “excelente”, perfazendo cerca de 60 % das instalações estudadas. Por outro lado as 27 EB (Tabela 12) que permaneceram classificadas como “ruim” e “muito ruim” foram aquelas em que a altura geométrica de recalque esteve acima de 15 m ou o  $\eta_{global}$  esteve abaixo de 75%. Atribui-se a variabilidade do índice a altura manométrica e ao rendimento global do conjunto motor x bomba x transmissão.

Tabela 12. Proposta de padrões de dimensionamento tendo como critério o índice  $Id_3$  e categorização para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.

$Id_3$ ( $kWh\ m^{-3}$ )	categoria	Frequência absoluta		Frequência relativa (%)	
		antes	depois	antes	depois
<0,030	Excelente	9	65	5,63	40,63
0,030-0,045	Muito bom	29	31	18,13	19,38
0,045-0,060	Bom	42	37	26,25	23,13
0,060-0,075	Ruim	35	15	21,88	9,38
>0,075	Muito Ruim	45	12	28,13	7,50

#### 4.4.5 Índice de desempenho $Id_4$ ( $\text{kW (m}^3 \text{ s}^{-1})^{-1} \text{ m}^{-1}$ )

O índice  $Id_4$  informa a potência ativa necessária para elevar 1000 L de água em 1 s a uma altura de 1m. Desta forma a altura geométrica da área de cultivo é reduzida a unidade e, portanto o índice pode ser usado para comparar áreas com diferentes alturas. Este índice está relacionado ao rendimento dos equipamentos de forma que quanto menos eficientes os equipamentos maiores os valores encontrados. Inicialmente encontrou-se 25 EB que foram classificadas como excelentes sendo que seus rendimentos globais foram estimados acima de 73%. A Tabela 13 mostra que inicialmente as EB estavam distribuídas entre as 5 categorias e que após a otimização 85% foram classificadas como “excelente” e 10,6% como “muito bom” ficando apenas 4,4% somando as categorias “bom”, “ruim” e “muito ruim”.

O índice  $Id_4$  é bastante semelhante ao rendimento global, sendo necessária a determinação da altura manométrica para sua aplicação, o que determina a necessidade de instalação de espera na tubulação de recalque para inserção de manômetro, o que não é comum entre as instalações estudadas.

Tabela 13. Proposta de padrões de dimensionamento tendo como critério o índice  $Id_4$  e categorização para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor

$Id_4$ ( $\text{kW (m}^3 \text{ s}^{-1})^{-1} \text{ m}^{-1}$ )	categoria	Frequência absoluta		Frequência relativa (%)	
		antes	depois	antes	depois
<13,5	Excelente	25	136	15,6	85,0
13,5-14,4	Muito bom	20	17	12,5	10,6
14,4-15,3	Bom	12	3	7,5	1,9
15,3-16,3	Ruim	14	3	8,8	1,9
>16,3	Muito Ruim	89	1	55,6	0,6

#### 4.4.6 Índice de desempenho $Id_5$ ( $\text{kW (m}^3 \text{ s}^{-1})^{-1} \text{ m}^{-1}$ )

O índice  $Id_5$  mostrou resposta ao processo de otimização realizado em função do alto índice de EB classificadas como “muito bom” ou “excelente” após os ajustes efetuados Tabela 14. Não foi encontrado um fator predominante que elevasse o índice. No caso de seu uso devem ser avaliados os fatores geradores do índice.

Tabela 14. Proposta de padrões de dimensionamento tendo como critério o índice  $Id_5$  e categorização para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.

$Id_5$ (kW (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> )	categoria	Frequência absoluta		Frequência relativa (%)	
		antes	depois	antes	depois
<14,5	Excelente	11	87	6,88	54,38
14,5-19,5	Muito bom	35	69	21,88	43,13
19,5-24,5	Bom	38	4	23,75	2,50
24,5-29,5	Ruim	27	0	16,88	0,00
>29,5	Muito Ruim	49	0	30,63	0,00

#### 4.4.7 Índice de desempenho $Id_6$ (W ha<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>)

O índice  $Id_6$  mostrou possibilidade de uso pela facilidade de obtenção dos fatores que o compõe, com simples observação da potência nominal do motor junto a sua placa de identificação. No entanto sugere-se que este índice não seja usado sozinho para realização de diagnóstico de EB, pois em algumas situações específicas encontramos a potência nominal muito superior a potência ativa e isto pode levar a uma interpretação errada do padrão de dimensionamento da EB. A Tabela 15 mostra uma grande migração de EB que antes estavam classificadas como “ruim” e “muito ruim” para as classes “bom” e “muito bom”.

Tabela 15. Proposta de padrões de dimensionamento tendo como critério o índice  $Id_6$  e categorização para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.

$Id_6$ (W ha <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> )	categoria	Frequência absoluta		Frequência relativa (%)	
		antes	depois	antes	depois
<22,1	Excelente	8	12	5,00	7,50
22,1-33,1	Muito bom	36	131	22,50	81,88
33,1-44,2	Bom	43	17	26,88	10,63
44,2-55,2	Ruim	35	0	21,88	0,00
>55,2	Muito Ruim	38	0	23,75	0,00



#### 4.4.8 Índice de desempenho $Id_7$ ( $\text{kWh m}^{-3}(100\text{m})^{-1}$ )

O índice  $Id_7$  foi categorizado em faixas que variaram de menos de 0,375 a mais de 0,450  $\text{kWh m}^{-3}(100\text{m})^{-1}$ , e expressa o consumo de energia (kWh) necessário para elevar 1  $\text{m}^3$  de água a uma altura manométrica de 100 m. A altura de 100 m é usada para padronizar o índice e desta forma poder comparar os resultados de estações com diferentes alturas de recalque. Observou-se (Tabela 16) que antes a maioria de 55,63% das EB estava classificada como “muito ruim”, enquanto apenas 15,63% delas eram “excelente”. O processo de adequação de tubulação, bomba e motor permitiu que 85% das EB fossem classificadas como “excelente” e apenas 2,51% (4 EB) permanecessem como “ruim” e “muito ruim”.

Em 9 EB (5,63%), das 160 estudadas, os rendimentos das bombas ficaram entre 70 e 79,9%, sendo que apenas 4 tiveram rendimentos inferiores a 75%, em função de valores vazão e/ou altura manométrica de projeto muito baixa. Cruzando informações relativas ao rendimento das bombas com o índice  $Id_7$  (calculado) concluímos que o rendimento mínimo de 75% para bomba é um indicativo para classificação das EB como “bom”, enquanto que entre 75 e 82% leva a classificação entre “bom” e “muito bom” e que rendimentos acima de 82% classificam as EB como “excelentes”, para a condição de uso de motor elétrico de alto rendimento em condição de potência ajustada a demanda e de acoplamento com polias e correias com rendimento mínimo de 95% na transmissão mecânica. Assim indica-se evitar bombas cujo rendimento esteja abaixo de 75%, o que levaria a um consumo superior a 0,425  $\text{kWh m}^{-3}(100\text{m})^{-1}$ .

Tabela 16. Proposta de padrões de dimensionamento tendo como critério o índice  $Id_7$  e categorização para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.

$Id_7$ ( $\text{kWh m}^{-3}(100\text{m})^{-1}$ )	categoria	Frequência absoluta		Frequência relativa (%)	
		antes	depois	antes	depois
<0,375	Excelente	25	136	15,63	85,00
0,375-0,400	Muito bom	20	17	12,50	10,63
0,400-0,425	Bom	12	3	7,50	1,88
0,425-0,450	Ruim	14	3	8,75	1,88
>0,450	Muito Ruim	89	1	55,63	0,63

#### 4.4.9 Índice de desempenho- rendimento global ( $\eta_g$ (%))

Considerando que o rendimento global expressa a composição entre o rendimento da bomba, motor e transmissão mecânica e que entre as 68 bombas selecionadas, a média dos máximos rendimentos foi de  $85,29 \pm 2,46\%$  enquanto os motores elétricos de 4 polos e alto rendimento apresentam rendimento médio de 94,4% e admitindo o rendimento de 95% para a transmissão mecânica, teríamos os melhores valores possíveis para o conjunto oscilando entre 74 e 78%, em situação de acoplamento por polia e correia e de 78 a 82% em situação de acoplamento direto, o que será considerado excelente. No entanto, em função de que nem sempre encontramos bombas que possam operar em seu ponto de máximo rendimento, em função da inexistência de equipamentos para atender a ampla faixa de necessidades (vazão x altura manométrica) propomos considerar rendimento global acima de 70% como excelente (rendimento da bomba de 78%, do motor de 94,4% e da transmissão 95%). Por outro lado, consideramos que rendimento global inferior a 40% seja muito ruim para os conjuntos avaliados, em função de que tanto as bombas quanto os motores de maior porte apresentam potencialmente rendimentos maiores. A classificação proposta não concorda com Abadia et al. (2008) que classificaram rendimento global de 40% como “normal”, em uma escala que vai de excelente – bom – normal - aceitável e não aceitável, quando avaliaram bombas usadas em sistemas pressurizados na Espanha, com características de baixas vazões e elevadas pressões, potencialmente aptas a menores rendimentos.

O rendimento global é um indicador que pode ser usado como critério de classificação das EB, porém exige a medição de vazão, pressão (AMT) e potência ativa. Nas EB avaliadas não foi verificado, em nenhum caso, a existência de espera para medição de pressão, o que dificulta a sua aplicação. Já os itens vazão e potência ativa podem ser medidos por instrumentos não invasivos o que, apesar do custo dos instrumentos, não inviabiliza sua medição.

Os resultados da proposta de classificação das faixas de rendimento global apresentadas na Tabela 17, indicam que a situação encontrada em campo foi de distribuição uniforme entre estações “excelente” a “muito ruim”, o que mostrou um potencial de melhora a partir da adequação de tubulações, bombas e motores. Após as adequações a distribuição das EB classificou 94,38% como “excelentes” em relação ao rendimento global e 5,63% como “muito bom”. A comparação entre antes e depois do processo de melhorias permite concluir que as alterações feitas foram eficientes em relação ao aspecto rendimento global.

Tabela 17. Proposta de padrões de dimensionamento tendo como critério o rendimento global ( $\eta_g$ ) e categorização para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.

$\eta_g$ (%)	categoria	Frequência absoluta		Frequência relativa (%)	
		antes	depois	antes	depois
> 70	Excelente	36	151	22,50	94,38
65-70	Muito bom	35	9	21,87	5,63
50-60	Bom	33	0	20,63	0,00
40-50	Ruim	37	0	23,13	0,00
<40	Muito Ruim	19	0	11,88	0,00

#### 4.5 Análise conjunta dos índices de desempenho

Os índices estudados relacionam-se com as grandezas conforme descrito no Quadro 3. A interpretação deste quadro permite afirmar que:

- Os índices  $Id_0$  e  $Id_6$  devem ser usados quando o objetivo for realizar diagnóstico de EB em relação ao dimensionamento de tubulação, bomba e motor.
- Os índices  $Id_1$ ,  $Id_2$  e  $Id_3$  devem ser usados quando além do dimensionamento de tubulação, bomba e motor também interessar a inclusão da altura geométrica de elevação de água (topografia do terreno).
- Quando os índices  $Id_0$  e  $Id_6$  indicarem bom dimensionamento e os índices  $Id_1$ ,  $Id_2$  e  $Id_3$  indicarem mal dimensionamento uma avaliação em relação a altura geométrica deve ser realizada.
- Os índices  $Id_4$ ,  $Id_7$  e  $\eta_{global}$  são bons indicadores do padrão dos equipamentos usados e de sua influência no desempenho da EB.
- O índice  $Id_5$  não possui relação com a vazão unitária usada, enquanto os índices  $Id_0$ ,  $Id_1$ ,  $Id_2$ ,  $Id_3$  e  $Id_6$  possuem influência direta de mesma.
- Todos os índices possuem relação com o rendimento global do conjunto bomba, motor e transmissão mecânica, sendo afetados pelo mesmo.

O uso dos índices  $Id_0$  e  $Id_4$  requer equipamentos para realização da medição da potência ativa da EB. Para uso dos índices  $Id_4$  e  $Id_5$  se faz necessário equipamento de medida de vazão.

índice	grandezas						
	q (L s <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup> )	hf (m)	hg <sub>r</sub> (m)	t (h)	V (m <sup>3</sup> )	A (ha)	η <sub>global</sub> (%)
Id <sub>0</sub>	direta	direta	x	x	x	x	inversa
Id <sub>1</sub>	direta	direta	direta	x	x	x	inversa
Id <sub>2</sub>	direta	direta	direta	direta	x	x	inversa
Id <sub>3</sub>	direta	direta	direta	direta	inversa	direta	inversa
Id <sub>4</sub>	x	x	x	x	x	x	inversa
Id <sub>5</sub>	x	direta	x	x	x	x	inversa
Id <sub>6</sub>	direta	direta	x	x	x	x	inversa
Id <sub>7</sub>	x	x	x	x	x	x	inversa
η <sub>global</sub>	x	x	x	x	x	x	direta

Quadro 3. Relação dos índices de desempenho estudados e as grandezas envolvidas em sua determinação.

Sintetizando as classes para os diferentes índices de desempenho a Tabela 18 apresenta os valores propostos a serem usados como referência para projetos e diagnóstico de bombeamento de água em irrigação de lavouras de arroz.

Tabela 18. Classificação dos índices propostos para projetos e diagnósticos de estações de bombeamento para lavouras de arroz irrigado.

Índice	Categorias				
	Excelente	Muito bom	Bom	Ruim	Muito Ruim
Id <sub>0</sub> (W ha <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> )	<20	20-30	30-40	40-50	>50
Id <sub>1</sub> (kW ha <sup>-1</sup> )	<0,10	0,10-0,30	0,30-0,50	0,50-0,70	>0,70
Id <sub>2</sub> (kWh ha <sup>-1</sup> )	<250	250-550	550-750	750-950	>950
Id <sub>3</sub> (kWh m <sup>-3</sup> )	<0,030	0,030-0,045	0,045-0,060	0,060-0,075	>0,075
Id <sub>4</sub> (kW (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> )	<13,5	13,5-14,4	14,4-15,3	15,3-16,3	>16,3
Id <sub>5</sub> * (kW (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> )	<14,5	14,5-19,5	19,5-24,5	24,5-29,5	<29,5
Id <sub>6</sub> * (W ha <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> )	<22,1	22,1-33,1	33,1-44,2	44,2-55,2	>55,2
Id <sub>7</sub> (kWh m <sup>-3</sup> (100m) <sup>-1</sup> )	<0,375	0,375-0,4	0,4-0,425	0,425-0,45	>0,45
η <sub>g</sub> (%)	>70	60-70	50-60	40-50	<40

\*com base na potência nominal do motor

Para uso do índice  $Id_4$ ,  $Id_7$  ou  $\eta_{\text{global}}$  é preciso a medida da pressão sendo necessária a instalação de manômetro na saída da bomba.

Através da análise de regressão linear foram encontradas relações entre os índices estudados, as quais estão apresentadas na Tabela 19. Através das relações encontradas pode-se observar que os parâmetros usados para determinar os índices relacionados apresentaram padrão de variação semelhante oportunizando sua determinação através da obtenção do índice semelhante. Assim  $Id_4$  e  $Id_7$ , bem como  $Id_1$  e  $Id_2$  encontram-se totalmente correlacionados, em função da natureza dos dados usados para sua obtenção. No entanto  $Id_1$  e  $Id_2$  são índices com finalidades diferentes já que um relaciona a potência e o outro relaciona o consumo sendo que estão relacionados pelo tempo de trabalho adotado para as EB estudadas, neste trabalho adotado em 1800 horas.

O índice  $Id_5$  utiliza a potência nominal (dado de placa do motor elétrico) grandeza de fácil obtenção. Foi encontrada relação entre este índice e o  $Id_0$ , mas deve-se ter atenção para seu uso, pois a potência nominal em algumas situações difere significativamente da potência necessária, podendo induzir a índice elevado.

Os índices  $Id_2$  e  $Id_3$  expressam o consumo de energia por hectare e por metro cúbico de água e a função obtida (Tabela 19) indica haver relação entre área irrigada e volume de água usado. Considera-se aceitável a estimativa do índice  $Id_3$  em função do  $Id_2$ , bem como de  $Id_3$  em função de  $Id_1$ , pois o  $R^2 = 0,8346$  indica uma boa aderência dos dados à função obtida. Essas relações podem ser usadas como facilitadoras da obtenção de índices, quando da impossibilidade de medida de vazão.

Tabela 19. Relação entre índices estudados

Índices relacionados	Função	$R^2$
$Id_4$ f $Id_7$	$Id_4 = 36.Id_7$	1,0000
$Id_2$ f $Id_1$	$Id_2 = 1800.Id_1$	1,0000
$Id_3$ f $Id_2$	$Id_3 = 0,00007.Id_2 + 0,0038$	0,8346
$Id_0$ f $Id_6$	$Id_0 = 0,8185.Id_6 + 5,0534$	0,4592
$Id_3$ f $Id_1$	$Id_3 = 0,1346.Id_1 + 0,0038$	0,8346

A Tabela 20 apresenta as relações encontradas entre os índices e as grandezas estudadas e mostra que o índice  $Id_0$  apresenta relação com a vazão unitária sendo diretamente afetados pela mesma. Assim pode-se afirmar que EB que apresentem classificação “ruim” ou

“muito ruim” devem ter sua vazão unitária avaliada, pois poderão estar operando com volumes de água muito altos e por isso ter sua eficiência comprometida.

Tabela 20. Relação entre índices de desempenho e grandezas avaliadas.

Relação	Função	R <sup>2</sup>
Id <sub>o</sub> f q	$Id_o = 16,1 \cdot q - 3,0746$	0,6875
Id <sub>1</sub> f h <sub>g</sub>	$Id_1 = 0,0246 \cdot h_g + 0,0271$	0,7805
Id <sub>2</sub> f h <sub>g</sub>	$Id_2 = 44,363 \cdot h_g + 48,711$	0,7805
Id <sub>3</sub> f h <sub>g</sub>	$Id_3 = 0,004 \cdot h_g - 0,00003$	0,9512
Id <sub>4</sub> f η <sub>global</sub>	$Id_4 = -19,147 \cdot \eta_{global} + 27,482$	0,9916
Id <sub>7</sub> f η <sub>global</sub>	$Id_7 = -0,5319 \cdot \eta_{global} + 0,7634$	0,9916

Os índices Id<sub>1</sub>, Id<sub>2</sub> e Id<sub>3</sub> mostram estar relacionados diretamente com a altura geométrica, de forma que aquelas EB que apresentam classificação entre “ruim” e “muito ruim” devem ter suas alturas geométricas de recalque avaliadas pois poderão estar operando em áreas cujos desníveis topográficos gerem perdas que as tornem inaptas ao cultivo economicamente viável, devido aos altos custos gerados com energia e potência instalada.

Os índices Id<sub>4</sub>, Id<sub>7</sub> e η<sub>g</sub> mostram relação direta com o rendimento dos equipamentos usados nas EB (bomba, motor e transmissão mecânica), de forma que aquelas que apresentam classificação “ruim” ou “muito ruim” deverão ter seus equipamentos avaliados para verificação do ponto de trabalho, visando aferir seus rendimentos, como forma de evitar desperdício de energia.

## 5 CONCLUSÕES

A associação de grandezas físicas, hidráulicas e elétricas das EB estudadas permitiu estabelecer índices que caracterizam o desempenho das mesmas em relação ao uso de energia no processo de bombeamento de água em lavouras de arroz irrigado no RS.

O dimensionamento da tubulação pelo critério de minimização do custo total (fixo mais operacional) em um período de 10 anos, a escolha da bomba mais eficiente (comercialmente disponível) e do motor de alto rendimento com potência ajustada a necessidade, reduziram o consumo de energia no processo de bombeamento em 31,20%, em relação a situação encontrada em campo para as 160 EB estudadas.

Os índices de desempenho estudados apresentaram variabilidade entre a situação encontrada em campo e aquela obtida após a otimização de tubulação, bomba e motor. Para cada índice é proposta uma classificação em cinco categorias (“excelente”, “muito bom”, “bom”, “ruim” e “muito ruim”) que permite a identificação do padrão de dimensionamento de estações de bombeamento.

Indica-se como referência para dimensionamento ou diagnóstico de operação de estações de bombeamento, em condição aceitável de “bom” dimensionamento, os seguintes índices:

$$Id_0 < 40 \text{ W ha}^{-1} \text{ m}^{-1};$$

$$Id_1 < 0,50 \text{ kW ha}^{-1};$$

$$Id_2 < 750 \text{ kWh ha}^{-1};$$

$$Id_3 < 0,060 \text{ kWh m}^{-3};$$

$$Id_4 < 15,3 \text{ kW (m}^3 \text{ s}^{-1})^{-1} \text{ m}^{-1};$$

$$Id_5 < 24,5 \text{ kW (m}^3 \text{ s}^{-1})^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ (com base na potência nominal do motor);}$$

$$Id_6 < 44,2 \text{ W ha}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ (com base na potência nominal do motor);}$$

$$Id_7 < 0,425 \text{ kWh m}^{-3} (100\text{m})^{-1};$$

$$\eta_g \text{ (rendimento global)} > 50\%.$$

Os índices  $Id_1$ ,  $Id_2$  e  $Id_3$  mostram aptidão ao diagnóstico relativo a altura geométrica enquanto  $Id_0$  apresentou relação direta com a vazão unitária e  $Id_4$ ,  $Id_7$  e  $\eta_g$  ao rendimento dos equipamentos.

O índice  $Id_6$  é o de mais fácil utilização em função da obtenção dos parâmetros necessários a sua aplicação, seguido do  $Id_5$ .

## 6 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se usar, como critério de avaliação de uso eficiente de energia, em estações de bombeamento de água para irrigação em lavouras de arroz irrigado:

- a) Os índices rendimento global ( $\eta_{\text{global}}$ ),  $Id_4$  e  $Id_7$ , nesta ordem, para verificar o desempenho de projetos.
- b) Os índices  $Id_1$ ,  $Id_2$  e  $Id_3$ , nesta ordem, para verificar se a topografia do terreno é favorável ao cultivo de arroz, sendo que quanto menores os valores encontrados menor a relação de energia usada por área atendida.
- c) O índice  $Id_0$ , quando se desejar comparar estações e identificar consumo energético relacionado ao excessivo uso de água no processo de irrigação.
- d) Os índices  $Id_5$  e  $Id_6$ , quando houver dificuldades de medição da potência ativa, ou para realizar diagnóstico expedito.
- e) Usar mais de um índice para avaliar projeto e/ou realizar diagnóstico de operação.

Recomenda-se que o responsável técnico, em projetos novos e em avaliações daqueles já existentes, determine a instalação de, no mínimo, um manômetro junto a saída da bomba, para que se tenha informação relativa a pressão de saída (altura manométrica de recalque).

Sugerem-se, para trabalhos futuros, estudos que relacionem quantidade de água utilizada e consumo de energia visando identificar vazões unitárias que contribuam para um bom desenvolvimento do arroz e que sejam economicamente viáveis.



## REFERENCIAS

ABADIA, R.; ROCAMORA, A.; RUIZ, H. Energy efficiency in irrigation distribution networks I: Theory. **Biosystems Engineering** [S.l.], v. 101, n. 1, p. 21-27, sep. 2008.

ALEGRE, H.; HIRNER, W.; BAPTISTA, J. M.; PARENA, R. **Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água**. Tradução e adaptação de Patricia Duarte, Helena Alegre e Jaime Melo Baptista. Lisboa: IWA/ Lab. Nacional de Engenharia Civil/ Inst. Regulador de águas e resíduos, 2004.

ANDRADE FILHO, L. S. Bombas e instalações elevatórias. In: GOMES, H. P.; CARVALHO, P. S. O. (Org.). **Manual de Sistemas de Bombeamento- eficiência energética**. João Pessoa: Editora Universitária- UFPB, 2012, p. 11-52.

ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa nº414**, de 9 de setembro de 2010. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/REN\\_414\\_2010\\_atual\\_REN\\_499\\_2012.pdf](http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/REN_414_2010_atual_REN_499_2012.pdf)> Acesso em 13 dez de 2014.

ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução homologatória nº 1514** de 16 de abril de 2013. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/reh20131514.pdf>>. Acesso em 13 dez. 2014.

ARNS, R. Racionalização do uso de energia elétrica em bombeamentos de arrozais na Fronteira-Oeste do Rio Grande do Sul. **Lavoura Arrozeira**. Porto Alegre, v. 48, n. 418, p. 14-17, jan./fev. 1995.

AZEVEDO NETTO, J. M. et al. **Manual de Hidráulica**, Ed. Edgard Blucher Ltda., 8. Ed., São Paulo, 1998.

CARVALHO, J. A.; OLIVEIRA, L. F. C. **Instalações de bombeamento para irrigação- Hidráulica e consumo de energia**. Lavras, Editora UFLA, 2008.

CONAB- Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, v. 1 - Safra 2013/14, n. 6 - Sexto Levantamento, Brasília, p. 1-83, mar. 2014.

CÓRCOLES, J. I. et al. Management evaluation of Water Uses Associations using benchmarking techniques. **Agriculture Water Management** [S.l.], 98 (1), p. 1-11, 2010.

CORRÊA, H. C. **Adequação da demanda hídrica e da potência instalada em sistemas de recalque para o arroz na depressão central do Rio Grande do Sul**. 2007, 67p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria –RS, 2007.

CORRÊA, N. I. et al. Consumo de água na irrigação do arroz por inundação. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 50, n. 432, p. 3-8, jul./ago. 1997.

DANTAS NETO, J.; FARIAS, M. S. S. Indicadores de desempenho como instrumento de gestão em projetos de irrigação. In: AGUIAR NETO, A. O.; BASTOS, E. A. (Org.). **Princípios Agronômicos da irrigação**. Brasília: EMBRAPA, 2013.

EBERHARDT, D. S. Consumo de água em lavoura de arroz irrigado sob diversos métodos de preparo do solo. *Agropecuária Catarinense*. Florianópolis. v. 7, n. 1, p. 51-53, mar. 1994.

ELETROBRÁS. Dicas para ações de eficiência energética em sistemas motrizes industriais e elaboração de diagnósticos energéticos. **Procel**. Disponível em: <http://www.eletronbras.com/ELB/main.asp?TeamID=%7BB937C998-DA6B-4132-9E4D-966E4D780A5E%7D>. Acesso em: 03/03/2014.

GOMES, A. S.; PAULETTO, E. A.; FRANZ, A. F. H. Uso e manejo da água em arroz irrigado. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES JUNIOR, A.M. (Org.) **Arroz Irrigado no Sul do Brasil**. Brasília, Embrapa, 2004, p. 417-455.

GOMES, H. P.; BEZERRA, S. T. M. Ações de eficiência energética. In: GOMES, H.P.; CARVALHO, P. S. O. (Org.). **Manual de Sistemas de Bombeamento - eficiência energética**. João Pessoa: Editora Universitária- UFPB, 2012, p 129-140.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2006**: Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação. Brasil, 2006.

IRGA - Instituto Rio Grandense do Arroz. **Censo da Lavoura de arroz irrigado do Rio Grande do Sul - Safra 2004/05**. IRGA, 2006. Disponível em: <<http://www.irga.rs.gov.br/index.php?principal=1&secao=999&id=124&menu=-124&key=3>>. Acesso em: 10/03/2014.

IRGA - Instituto Rio Grandense do Arroz. **Dados de Safra**. Disponível em [http://www.irga.rs.gov.br/upload/20140903105722produtividade\\_municipios\\_safra\\_13\\_14\\_versao\\_final.pdf](http://www.irga.rs.gov.br/upload/20140903105722produtividade_municipios_safra_13_14_versao_final.pdf). Acesso em: 10/10/2014.

IRGA- Instituto Rio Grandense do Arroz. **Custo de produção do arroz irrigado médio ponderado no rio grande do sul sistema de cultivo mínimo (semi-direto) Estimativa da safra 2013/14**. Seção de Política Setorial Departamento Comercial e Industrial. Disponível em:[http://www.irga.rs.gov.br/upload/20140318133121custo\\_de\\_producao\\_medio\\_ponderado\\_arroz\\_irrigado\\_2013\\_14.pdf](http://www.irga.rs.gov.br/upload/20140318133121custo_de_producao_medio_ponderado_arroz_irrigado_2013_14.pdf). Acesso em 11/11/2014.

KAYA, D. et al. Energy efficiency in pumps. **Energy Conversion & Management**. [S.l.] n.49 p.1662-1673, 2008. Disponível em: [http://akademikpersonel.kocaeli.edu.tr/kyigit/bsci/kyigit14.05.2013\\_23.29.09sci.pdf](http://akademikpersonel.kocaeli.edu.tr/kyigit/bsci/kyigit14.05.2013_23.29.09sci.pdf). doi:10.1016/j.enconman.2007.11.010 Acesso em: 10/03/2014.

LIMA, A. C. de; GUIMARAES JR., S. C.; FIETZ, C. R.; CAMACHO, J. R. Avaliação e análise da eficiência energética na irrigação em sistemas pivô central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 499-505, 2009.

LOUREIRO, I. B. **Laboratório Remoto para ensino de eficiência energética em um sistema de bombeamento de água**. 2009. 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). UFPA/ITEC/PPGEE. Campus Universitário do Guamá. Belém, 2009.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. Rio de Janeiro, Ed. Guanabara, 1987.

MAHAR, P. S.; SINGH, R. P. Optimal design of pumping mains considering pump characteristics. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**. [S.l.], v. 5, n. 1. fev. 2014. doi: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000157.

MAPA- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Arroz. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/arroz/saiba-mais>. Acessado em: 13/02/2014.

MARCOLIN, E.; ROBAINA, A. D. Consumo de energia e eficiência das estações de bombeamento de lavouras de arroz irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 2, p. 229-235, abr. 2002.

MARCOLIN, E.; MACEDO, V. R. M. Consumo de água em três sistemas de cultivo de arroz irrigado. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 11, 2001, Fortaleza, CE. **Anais...** Fortaleza: CONIRD, p. 59-63, 2001.

MEDEIROS, S. de S.; SOARES, A. A.; RAMOS, M. M.; MANTOVANI, E. C.; SOUZA, J. A. A. Avaliação da eficiência do uso da energia elétrica no Perímetro Irrigado de Pirapora, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 7, n. 2, p. 394-398, 2003.

MIN- Ministério da Integração Nacional. **Retrato da irrigação no Brasil**. Disponível em: [http://www.integracao.gov.br/noticias/-/asset\\_publisher/xW1t/content/retrato-da-irrigacao-no-brasil?redirect=http%3A%2F%2Fwww.integracao.gov.br%2Fnoticias%3Fp\\_p\\_id%3D101\\_INSTANCE\\_xW1t%26p\\_p\\_lifecycle%3D0%26p\\_p\\_state%3Dnormal%26p\\_p\\_mode%3Dview%26p\\_p\\_col\\_id%3Dcolumn-3%26p\\_p\\_col\\_pos%3D3%26p\\_p\\_col\\_count%3D4](http://www.integracao.gov.br/noticias/-/asset_publisher/xW1t/content/retrato-da-irrigacao-no-brasil?redirect=http%3A%2F%2Fwww.integracao.gov.br%2Fnoticias%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_xW1t%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-3%26p_p_col_pos%3D3%26p_p_col_count%3D4). Acessado em: 19/04/2014.

MOISES, N. D. **Energia elétrica para a irrigação do arroz na área da CELETRO**. 2009. 92 f. Dissertação (Mestrado em Energia, Ambiente e Materiais) - Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2009.

MONACHESI, M. G. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

MORAES, M. J. et al. Gerenciamento do lado da demanda no bombeamento de água para perímetro irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 15, n. 9, p. 875-882, 2011.

MOREIRA, S. G. **Estratégias de simulação para análise da eficiência energética em sistema de bombeamento monitorado via supervisorio**. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2008.

MORENO, M. A. et al. Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations. **Biosystems Engineering**, Volume 98, Issue 4, December 2007, Pages 479-486, ISSN 1537-5110, Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.09.005>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511007002310>) Acessado em: 15/03/2014.

MORENO, M. A. et al. Energy analysis of pressurised irrigation delivery systems: monitoring and evaluation of proposed measures for improving energy efficiency., **Irrigation Science** [S.l.]28(5). p. 445-460, 2010.

OCACIA, G. C.; DUARTE, H. A.; MARTINS, F. M. Uso racional de energia em estações de bombeamento de água para irrigação de arroz. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIORURAL, 4., **Anais...** 2002, Campinas. Documento disponível em: [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022002000200063&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000200063&lng=en&nrm=abn). Acesso em: 23 Fev. 2014.

OLIVEIRA FILHO, D. et al. Dimensionamento de Motores para o bombeamento de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 6, p. 1012-1022, nov./dez. 2010.

OLIVEIRA FILHO, D. et al. Metodologia de diagnóstico energético em estação de captação de água. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 10, out. 2011.

OTERO, O. L. C. de; GOMES, A. S.; COURA, S. P. Diagnóstico de Sistemas. In: GOMES, H. P.(Org.). **Sistemas de Bombeamento- Eficiência Energética**. 1. ed. João Pessoa: Editora Universitária- UFPB, 2009. p. 251-296.

PERRONI, B. L. T.; CARVALHO, J. de A.; FARIA, L. C. Velocidade econômica de escoamento e custos de energia de bombeamento. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 3, p. 487-496, mai./jun., 2011.

RAMÃO, C. J. **Caracterização das Estações de Bombeamento em Lavouras de Arroz no Município de Itaqui – RS**. Trabalho de conclusão de Curso. Curso de Agronomia, Campus Itaqui, Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), 2011.

RITTER, J. **Eficientização de estações de bombeamento em lavouras de arroz na fronteira oeste do Rio Grande do Sul**. Trabalho de conclusão de Curso. Curso de Agronomia, Campus Itaqui, Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), 2011.

ROBAINA, A. D.; CALGARO, M.; PEITER, M. X. Tubulações em sistemas de recalque. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 4, p. 1065-1068, jul./ago., 2004.

ROCAMORA, C. et al. Energy efficiency in irrigation: energy audits and qualification of water users' associations. In:... Interanational conference on agricultural engineering agricultural and biosystems engineering for a sustainable world. **Anais...** Hersonisos, Greece, 2008.

ROCAMORA, C.; VERA, J.; ABADÍA, R. Strategy for efficient energy management to solve energy problems in modernized irrigation: analysis of the Spanish case. **Irrigation Science**. v. 31: 1139-1158, 2013. DOI 10.1007/s00271-012-0394-5.

SARTORI, G. M. S. et al. Rendimento de grãos e eficiência no uso de água de arroz irrigado em função da época de semeadura. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 3, p. 397-403, mar. 2013.

SOSBAI- SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: Recomendações Técnicas para o Sul do Brasil**. Itajai, 2012.

SOUZA, G. H. F. de; BRITO, R. A. L.; DANTAS NETO, J.; SOARES, J. M.; NASCIMENTO, T. Desempenho do Distrito de Irrigação Senador Nilo Coelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 204-209, 2001.

STONE, L. F. **Eficiência do Uso da Água na Cultura do Arroz Irrigado**. Santo Antônio de Goiás : Embrapa Arroz e Feijão (Documentos / Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1678-9644; 176), 48 p., 2005.

URRESTARAZU, L. P.; BURT, C. M. Characterization of pums for irrigation in Central Califórnia: Potential energy savings. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE**, 138(9), 815-822. September 2012.

VERA, J. et al. Eficiencia energética de instalaciones de bombeo em pozos para extracción de águas de tiego sunterrâneas. In: **Anais...** XXVIII Congreso Nacional de Riegos. AERYD, León, p. 15-16. jun. 2010.

VIANNA, M. L. de S. O desperdício da energia na irrigação do arroz. **Revista Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 50, n. 432, p. 9-16, jul./ago. 1997.

WEG. **Motor elétrico trifásico**. Catálogo Técnico. Itajaí- SC. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-w22-motor-trifasico-tecnico-mercado-brasil-50023622-catalogo-portugues-br.pdf>. Acesso em: 19/03/2014.

ZOCOLER, J. L.; HERNANDEZ, F. B. T.; SAAD, J. C. C.; CRUZ, R. L. Período de recuperação do investimento em bomba hidráulica de melhor rendimento em sistema de bombeamento na tarifa horosazonal verde. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**. Jaboticabal. v. 31, n. 2, p. 290-302, mar./abr. 2011.

Apêndice 1. Planilha utilizada para determinação do diâmetro adequado a condição técnica e econômica, para as EB estudadas.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	vazão=	412,0	p1=	0,18	R\$/kWh	n=	10	anos	FRC =	0,18				
2	C=	90,0	p4=	5,40	R\$/kg	taxa =	12	%						
3	L=	765,0	rend=	0,60		p3=	0,059736	R\$/kW						
4	N=	120,0	NºH=	1800,00	h									
5	Hg=	17,3	p2=	11,45	R\$/kW									
6														
15														
18	diâmetro (mm)	peso (kg m <sup>-1</sup> )	velocidade (m s <sup>-1</sup> )	custo fixo (R\$)	custo fixo (R\$ ano <sup>-1</sup> )	potência (CV)	potência (kW)	kWh- horosazonal	kwh- horario reservado	Consumo R\$	demanda R\$	custo energia (R\$)	custo total anual (R\$)	custo em "n" anos (R\$)
19	200	13,3	13,1	55024,75	9738,51	9285,40	6834,06	7322203,18	4979098,161	1609628,79	312945,11	1922573,90	1932312,41	19323124,11
20	250	16,6	8,4	68780,94	12173,14	3263,69	2402,07	2573650,69	1750082,467	565761,72	109995,77	675757,49	687930,63	6879306,28
21	300	20,0	5,8	82537,13	14607,77	1446,97	1064,97	1141041,72	775908,3685	250833,47	48767,21	299600,68	314208,44	3142084,42
22	320	21,3	5,1	88039,61	15581,62	1102,53	811,46	869426,672	591210,1367	191124,74	37158,60	228283,34	243864,96	2438649,60
23	380	25,3	3,6	104547,03	18503,17	571,23	420,43	450457,116	306310,8391	99023,30	19252,18	118275,48	136778,65	1367786,49
24	480	32,0	2,3	132059,41	23372,42	292,83	215,52	230916,782	157023,4121	50762,09	9869,20	60631,28	84003,71	840037,08
25	540	36,0	1,8	148566,84	26293,98	234,85	172,85	185195,534	125932,9634	40711,25	7915,11	48626,36	74920,34	749203,39
26	640	42,6	1,3	176079,22	31163,23	192,33	141,55	151663,211	103130,9838	33339,89	6481,96	39821,86	70985,09	709850,90
27	770	51,3	0,9	211845,31	37493,26	172,45	126,92	135987,226	92471,31352	29893,87	5811,99	35705,85	73199,11	731991,15
28	800	53,3	0,8	220099,02	38954,04	170,11	125,20	134144,852	91218,49953	29488,86	5733,24	35222,10	74176,14	741761,44
29	960	63,9	0,6	264118,82	46744,85	163,33	120,21	128794,005	87579,92349	28312,59	5504,55	33817,14	80561,99	805619,92
30	1120	74,6	0,4	308138,63	54535,66	160,77	118,33	126780,882	86211,00004	27870,05	5418,51	33288,56	87824,22	878242,19
31	1280	85,2	0,3	352158,43	62326,47	159,66	117,51	125904,434	85615,01521	27677,38	5381,05	33058,44	95384,90	953849,01
32	1600	106,6	0,2	440198,04	77908,08	158,84	116,90	125255,092	85173,4626	27534,64	5353,30	32887,94	110796,02	1107960,21
33	2000	133,2	0,1	550247,55	97385,10	158,55	116,69	125027,661	85018,80963	27484,64	5343,58	32828,22	130213,33	1302133,25
	C= coeficiente de rugosidade de Hazen-Willians													
	N= número de diâmetros equivalente as perdas de carga localizadas													
	p1= preço do quilo Watt hora em tarifa horosazonal verde em nov/2014													
	p2= preço de demanda por quilo Watt em tarifa horosazonal verde em nov/2014													
	p3= preço do quilo Watt hora em horario reservado de portaria em nov/2014													
	p4= preço do quilo de chapa de aço de 2,65 mm de espessura em nov/2014													
	FRC= fator de recuperação de capital													
	n= numero de anos considerado para amortização do capital													

Apêndice 2. Figuras que caracterizam a distribuição das categorias dos índices estudados.

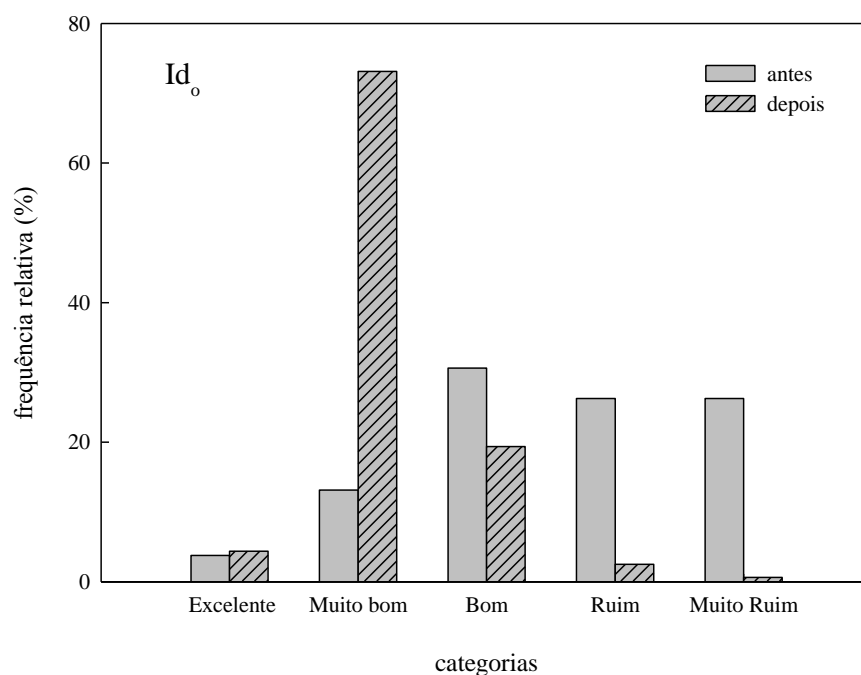


Figura 35. Distribuição das frequências relativas aos padrões de dimensionamento tendo como critério o índice  $Id_0$  para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.

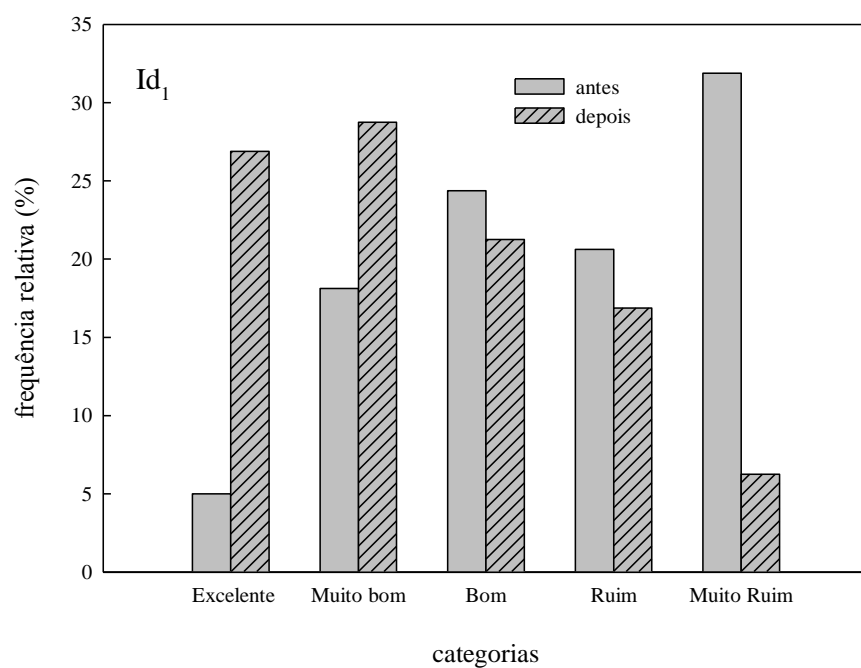


Figura 36. Distribuição das frequências relativas aos padrões de dimensionamento tendo como critério o índice  $Id_1$  para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.

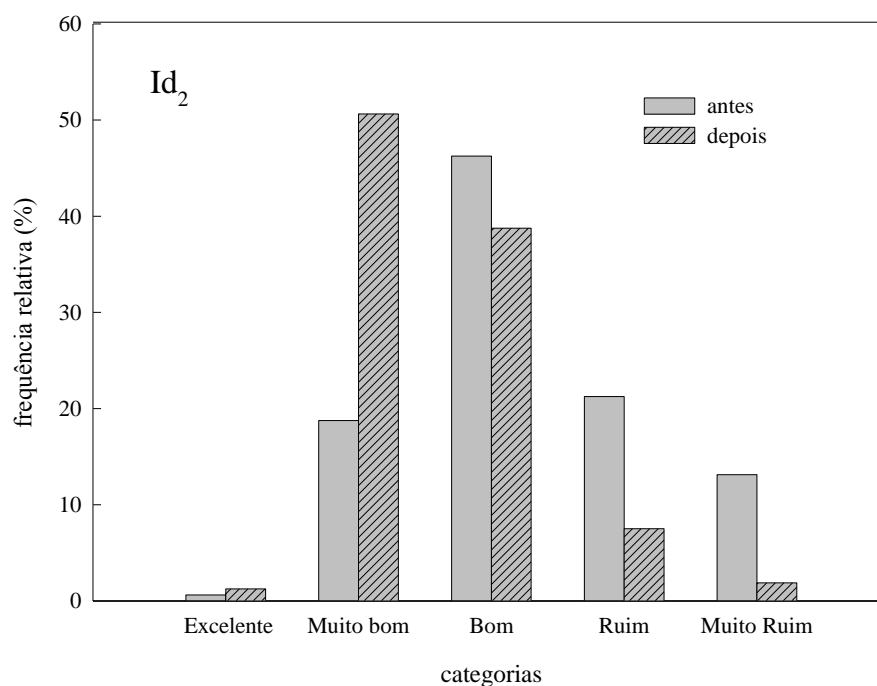


Figura 37. Distribuição das frequências relativas aos padrões de dimensionamento tendo como critério o índice  $Id_2$  para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.

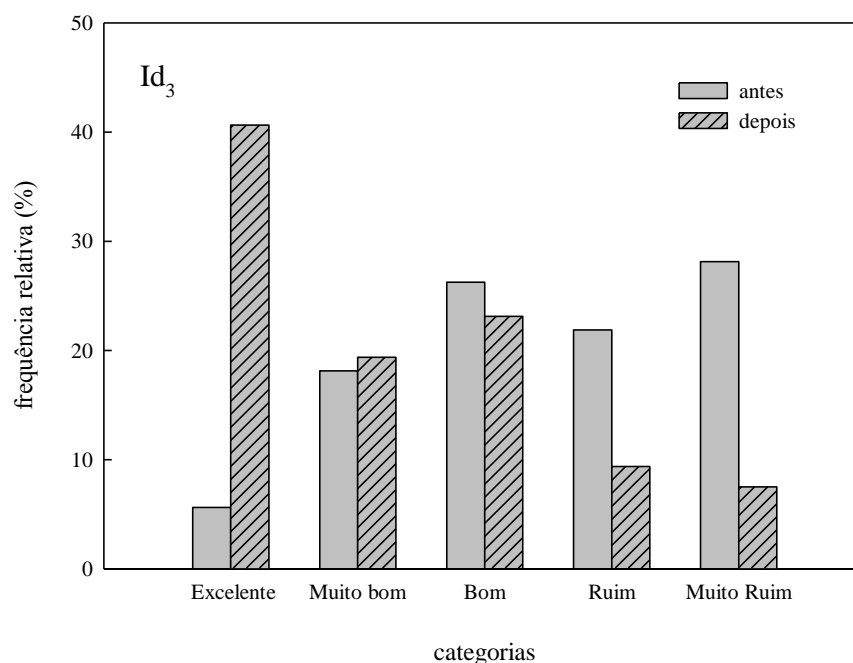


Figura 38. Distribuição das frequências relativas aos padrões de dimensionamento tendo como critério o índice  $Id_3$  para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor



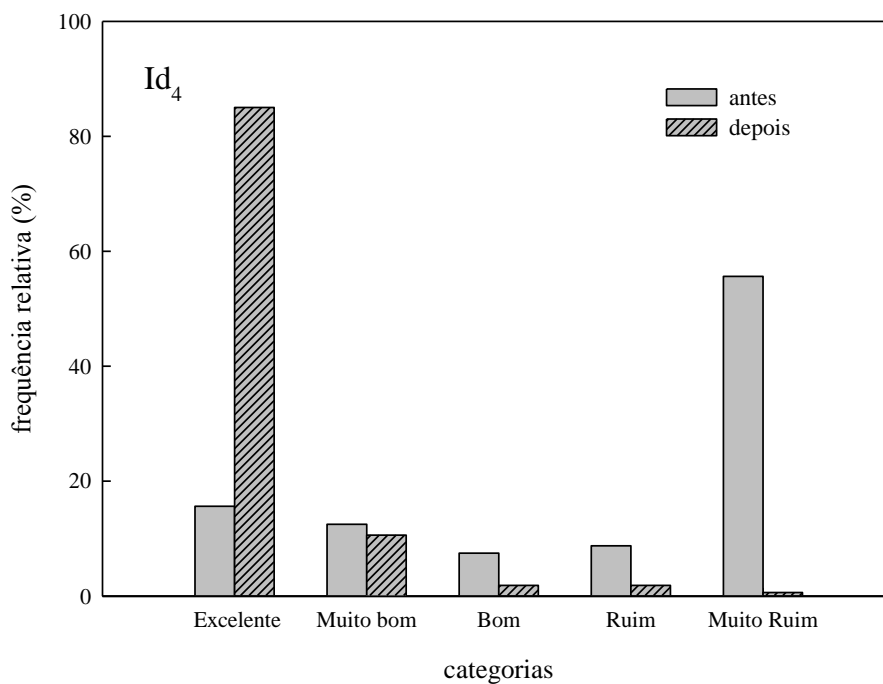


Figura 39. Distribuição das freqüências relativas aos padrões de dimensionamento tendo como critério o índice  $Id_4$  para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.

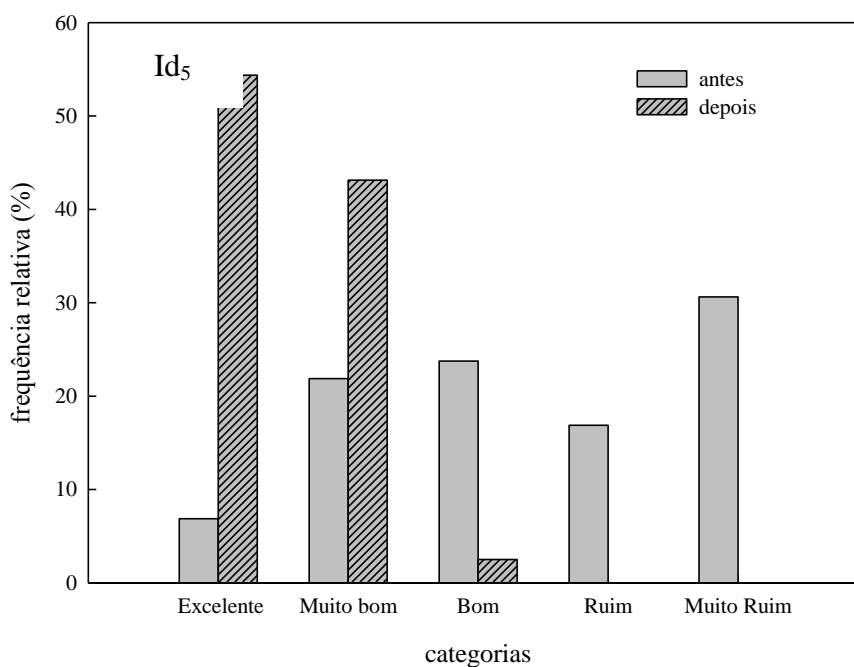


Figura 40. Distribuição das freqüências relativas aos padrões de dimensionamento tendo como critério o índice  $Id_5$  para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.

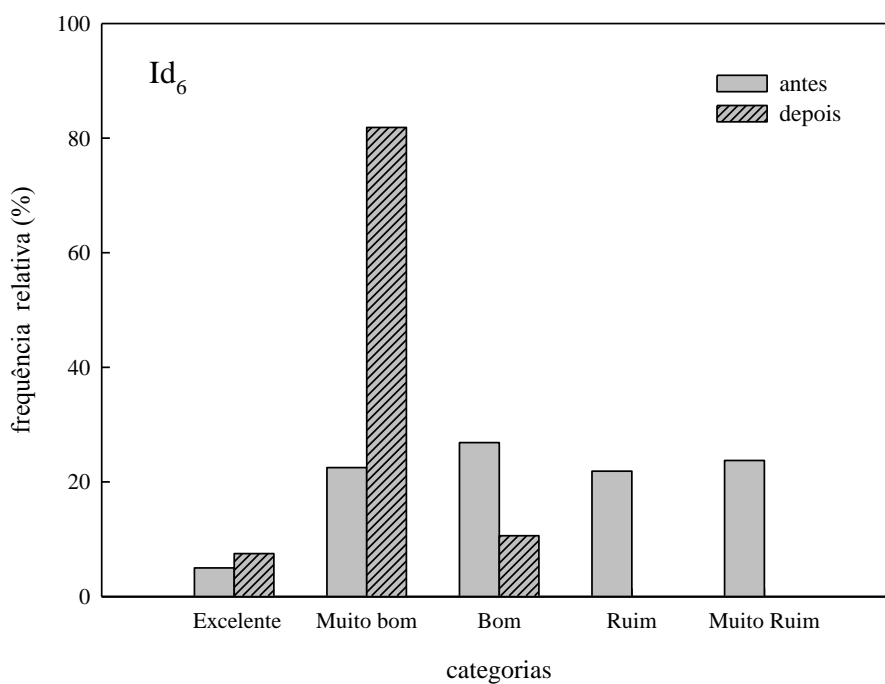


Figura 41. Distribuição das frequências relativas aos padrões de dimensionamento tendo como critério o índice  $Id_6$  para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.

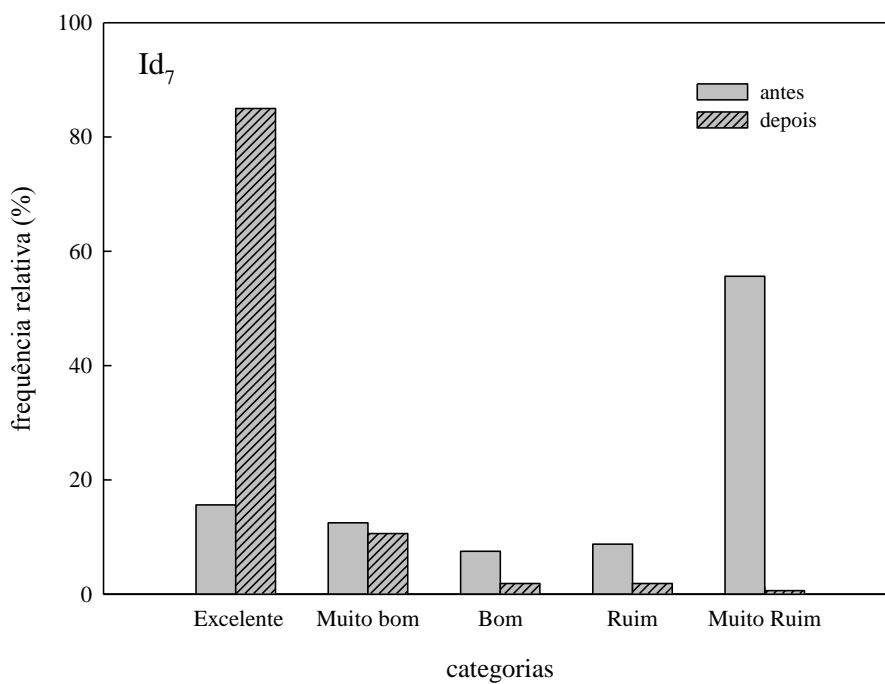


Figura 42. Distribuição das frequências relativas aos padrões de dimensionamento tendo como critério o índice  $Id_7$  para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de ajuste de tubulação, bomba e motor.

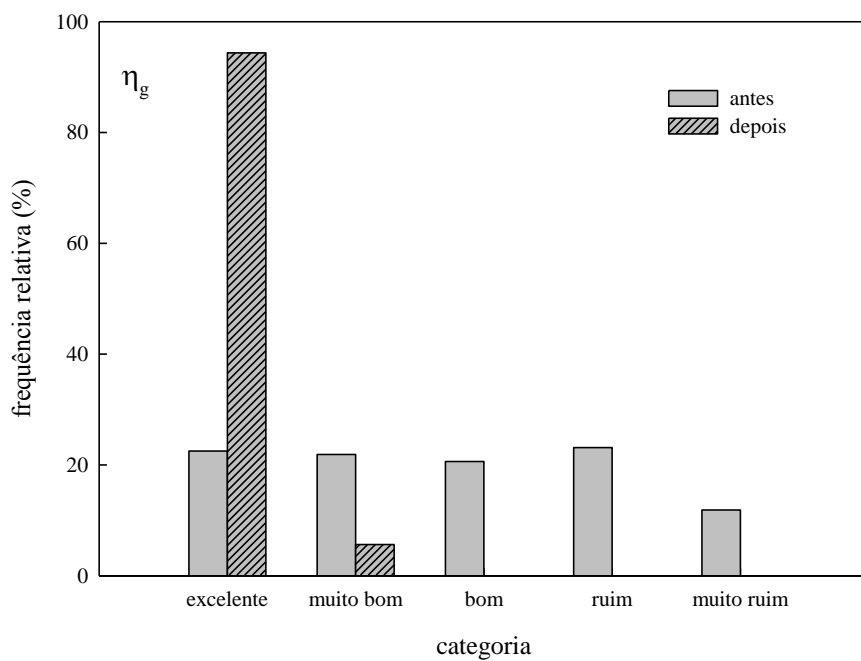


Figura 43. Distribuição das freqüências relativas aos padrões de dimensionamento tendo como critério o rendimento global ( $\eta_g$ ) para as 160 estações de bombeamento na situação inicial e após a proposta de tubulação, bomba e motor.