



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CAMPUS II**  
**PPGEM - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. MECÂNICA**



# **PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO DE UMA  
BOMBA DE DIAFRAGMA ACIONADA À BAIXA ROTAÇÃO**

**PEDRO RONALDO HERCULANO DE HOLANDA**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**NOVEMBRO/2001**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Projeto, Construção e Experimentação de  
uma Bomba de Diafragma Acionada à  
Baixa Rotação**

**Autor: Pedro Ronaldo Herculano de Holanda  
Orientadores: Natanael Victor de Oliveira  
Antonio Gilson Barbosa de Lima**

---

Campina Grande, novembro de 2001

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Projeto, Construção e Experimentação de  
uma Bomba de Diafragma Acionada à  
Baixa Rotação**

---

**Autor: Pedro Ronaldo Herculano de Holanda  
Orientadores: Natanael Victor de Oliveira  
Antonio Gilson Barbosa de Lima**

**Curso: Engenharia Mecânica  
Área de Concentração: Projetos Mecânicos**

**Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.**

**Campina Grande, novembro de 2001.  
PB - Brasil**



H722p

Holanda, Pedro Ronaldo Herculano de.

Projeto, construção e experimentação de uma bomba de diafragma acionada à baixa rotação / Pedro Ronaldo Herculano de Holanda. - Campina Grande, 2001.

95 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2001.

"Orientação : Prof. Dr. Natanael Victor de Oliveira, Prof. Dr. Antônio Gilson Barbosa de Lima".

Referências.

1. Bomba de Diafragma - Engenharia Mecânica. 2. Bomba de Diafragma - Projeto e Construção. 3. Baixa Rotação. 4. Dissertação - Engenharia Mecânica. I. Oliveira, Natanael Victor de. II. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 621.658(043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Projeto, Construção e Experimentação de  
uma Bomba de Diafragma Acionada à  
Baixa rotação**

Dissertação aprovada em 21 de novembro de 2001.

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Natanael Victor de Oliveira, Presidente  
UFPB**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima  
UFPB**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. José Antonio Riul  
UFPB**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Carlos José de Araujo  
UFPB**

Campina Grande, novembro de 2001.  
PB - Brasil

## **DEDICATÓRIA**

À minha esposa Cléa Brasileiro de Holanda e às minhas filhas, Luciana Brasileiro de Holanda, Fernanda Brasileiro de Holanda e Viviane Brasileiro de Holanda.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Natanael Victor de Oliveira, pelo empenho, orientação e incentivo para chegar ao término deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pela orientação parcial, sem as quais não teria sido possível a conclusão deste trabalho.

Ao Coordenador do Curso de Mestrado e Prof. Dr. Antonio Almeida Silva, por sua atenção e incentivo.

À Secretária do Curso de Mestrado, Lúcia Márcia Donato Quirino, pela eficiência e atendimento ao longo deste trabalho.

*“A energia expressa de maneira passiva está perdida para sempre. A energia utilizada no trabalho ativo rapidamente se transforma em novo estoque.”*

*Gurdjieff*

## SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	4
2.1	Máquinas usadas na elevação d'água	4
2.1.1	Máquinas elevadoras por transporte	6
2.1.2	Estado da arte mais recente sobre bombas	27
3	Metodologia Experimental	33
3.1	Aspectos construtivos e de funcionamento da bomba de diafragma	33
3.1.1	Projeto e Construção	33
3.1.1.1	Mecanismo conversor	34
3.1.1.2	A bomba	38
3.1.2	Princípio de Funcionamento	39
3.2	Metodologia Experimental	42
4	Resultados e Discussões	52
5	Conclusões e Sugestões	66



Referências Bibliográficas

68

Anexos

72

## RESUMO

HOLANDA, Pedro Ronaldo Herculano de, *Projeto, Construção e Experimentação de uma Bomba de Diafragma Acionada à Baixa Rotação*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, 2001. 95 p. Dissertação (Mestrado).

Nos tempos atuais é importante pensar em economia de energia, seja elétrica ou proveniente da queima de combustíveis. Usar energia alternativa de maneira racional é uma forma de economizar a energia convencional produzida. Outra vantagem do uso da energia não convencional é a produção em pequena escala disseminada nas regiões de uso. Este trabalho tem como objetivo apresentar a construção e teste de uma bomba de diafragma acionada à baixa rotação. O desempenho da bomba de diafragma é avaliado por comparação com o desempenho de uma bomba de pistão, operando nas mesmas condições. Para acionamento das bombas foi utilizada uma roda d'água submetida à vários níveis de rotação. Resultados da potência nos eixos da roda d'água e das bombas, bem como da vazão volumétrica e rendimento total das bombas são apresentados e analisados.

### *Palavras Chave:*

Bomba, Difragma, Pistão, Baixa rotação, Experimental.

## ABSTRACT

HOLANDA, Pedro Ronaldo Herculano de, *Project, Construction and Experimentation of a diaphragm pump to the low rotation*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, 2001. 93 p. Dissertação (Mestrado).

In the current times it is important to think in save energy, be electric or originating from it burns of fuels. To use alternative energy in a rational way is a manner of saving the conventional energy produced. Another advantage in to use non conventional energy is the production in low scale disseminated in any areas. The objective of this work is to present the construction and test of a diaphragm pump. The efficiency of the diaphragm pump is evaluated by comparison with a piston pump, operating in the same conditions. For maintain the pumps in movement a paddle-wheel at several rotation levels was used. Results of the power in the shaft of the paddle-wheel and the pumps, as well as volumetric flow and total efficiency of the pumps are presented and analyzed.

### *Key Words:*

Pump, Diaphragm, Piston, Low rotation, Experimental

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Corte de um poço equipado com corrente elevadora de água.	07
Figura 2.2	Corte de um poço equipado com nora de baldes.	08
Figura 2.3	Corte esquemático de um poço equipado com nora de rosário.	09
Figura 2.4	Vista esquemática de uma roda de baldes.	10
Figura 2.5	Vista esquemática de uma roda de pás.	11
Figura 2.6	Vistas lateral e frontal de uma roda mista.	12
Figura 2.7	Corte longitudinal da máquina parafuso de Arquimedes.	13
Figura 2.8	Corte de uma bomba de diafragma rígido.	14
Figura 2.9	Bomba de diafragma para automóvel com acionamento mecânico.	15
Figura 2.10	Corte de uma bomba de diafragma elétrica para automóvel.	15
Figura 2.11	Corte de uma bomba de diafragma tipo sapo.	16
Figura 2.12	Corte de uma bomba de pulsação.	17
Figura 2.13	Cortes de bombas rotativas.	18
Figura 2.14	Planta de instalação de um carneiro hidráulico.	19
Figura 2.15	Corte de uma elevadora tipo carneiro hidráulico.	19
Figura 2.16	Corte de uma bomba de ar comprimido (air lift) em um poço profundo.	20
Figura 2.17	Tipos de bombas de pistão.	21
Figura 2.18	Bomba de êmbolo.	24
Figura 2.19	Bomba de pistão.	24
Figura 2.20	Corte de uma bomba centrífuga.	25
Figura 2.21	Corte de uma bomba peristáltica (ou tubo flexível) para uso doméstico.	26
Figura 2.22	Vista do conjunto de bombas peristálticas na Sanepar.	26
Figura 3.1	Bomba de diafragma. a) Vista em perspectiva. b) Acoplada ao conversor.	34
Figura 3.2	Conversor com corte mostrando o interior.	34
Figura 3.3	Vista do Acoplador auto-separável.	35
Figura 3.4	Mecanismo de uma furadeira elétrica portátil.	36
Figura 3.5	Catraca.	36
Figura 3.6	Vista explodida do conjunto conversor.	37

Figura 3.7	Came na caixa, fabricada em aço.	37
Figura 3.8	Conjunto came e seguidor com os seus acopladores.	37
Figura 3.9	Detalhes de uma bomba de diafragma.	38
Figura 3.10	A bomba de diafragma no sistema de bombeamento. a) Acoplada ao eixo da roda d'água. b) Vista frontal com tubulação e válvulas.	38
Figura 3.11	Bomba de diafragma. Vista em corte.	39
Figura 3.12	Detalhe da amplitude de uma came. a) Vista frontal; b) Vista em 45°.	40
Figura 3.13	Vista de uma zona esférica.	41
Figura 3.14	Aspecto do medidor de vazão construído pelo autor para o projeto.	43
Figura 3.15	Vista do vertedor triangular.	43
Figura 3.16	Canal com vertedor triangular em funcionamento.	44
Figura 3.17	Tacômetro construído pelo autor. a) Calculadora com imã e sensor; b) Disco com imãs; c) Relé de lâminas; d) Relé de lâminas encapsulado.	45
Figura 3.18	Vista esquemática de uma roda d'água de cima.	46
Figura 3.19	Esquema representativo do sistema de bombeamento.	48
Figura 3.20	Roda d'água em funcionamento.	49
Figura 3.21	Vista lateral do vertedor.	49
Figura 3.22	Sistema de controle da vazão. a) Vista geral b) Visor de controle.	49
Figura 3.23	Medidores de pressão a) Vacuômetro na admissão. b) Manômetro no recalque.	50
Figura 3.24	Medidor de temperatura. a) Temperatura ambiente. b) Temperatura da água.	50
Figura 3.25	Sistema de medição da água bombeada. a) Vista geral. b) Detalhe do sensor da vazão.	51
Figura 3.26	Bomba de diafragma em funcionamento. a) Vista geral da roda d'água e os principais componentes. b) Detalhe do sensor de rotações.	51
Figura 4.1	Forma assumida pelo diafragma quando submetido à pressão. a) Vista inferior. b) Vista superior.	58
Figura 4.2	Rendimento total e vazão de água bombeada em função da potência no eixo da bomba de pistão. Altura de recalque = 10m.	62
Figura 4.3	Rendimento total e vazão de água bombeada em função da potência no eixo da bomba de diafragma. Altura de recalque = 10m.	63
Figura 4.4	Rendimento total e vazão de água bombeada em função da potência no eixo da bomba de diafragma. Altura de recalque = 5m.	63
Figura 4.5	Cames a) Dentes aproximadamente parabólicos. b) Dentes aproximadamente senoidais.	65



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Fontes de energia que acionam máquinas elevadoras d'água.	6
Tabela 2.2	Rendimento de uma bomba elevadora por coluna.	19
Tabela 4.1	Valores médios obtidos durante o funcionamento da roda d'água com a bomba de pistão.	53
Tabela 4.2	Propriedades termodinâmicas da água para cada experimento.	53
Tabela 4.3	Dados de desempenho da bomba de pistão.	54
Tabela 4.4	Valores médios obtidos durante o funcionamento da roda d'água com a bomba de diafragma.	56
Tabela 4.5	Propriedades termodinâmicas da água para cada experimento da bomba de diafragma.	56
Tabela 4.6	Dados de desempenho da bomba de diafragma.	57
Tabela 4.7	Valores médios obtidos durante o funcionamento da roda d'água com a bomba de diafragma.	59
Tabela 4.8	Propriedades termodinâmicas da água para cada experimento.	60
Tabela 4.9	Dados de desempenho da bomba de diafragma.	61

# NOMENCLATURA

## *Letras Latinas*

$C_d$	Amplitude	[m]
$d$	Distancia entre baldes	[m]
$D_1$	Diâmetro externo da roda	[m]
$D_2$	Diâmetro do tambor	[m]
$D$	Diâmetro do pistão	[m]
$Q$	Vazão	[m <sup>3</sup> /s]
$R$	Raio da manivela	[m]
$L$	Largura das pás	[m]
$n$	Número de baldes por segundo	[-]
$N$	Número de rotações por minuto	[-]
$S$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$V$	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$v$	Velocidade da cadeia	[m/s]
$\dot{W}$	Potência	[W]
$W$	Trabalho por unidade de massa	[J/kg]
$u$	Energia interna especifica	[kJ/kg]
$h$	Entalpia especifica	[kJ/kg]
$v$	Volume específico	[m <sup>3</sup> /kg]
$s$	Entropia especifica	[kJ/kg K]
$q$	Vazão na bomba	[m <sup>3</sup> /s]
$P$	Pressão	[kPa]
$g$	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$H$	Altura	[m]
$\hat{h}$	Nível do manacial	[m]
$\bar{h}$	Altura da água no poço	[m]

## *Letras Gregas*

$\alpha$	Rendimento volumétrico	[-]
$\gamma$	Peso específico	[N/m <sup>3</sup> ]
$\eta$	Rendimento	[%]
$\rho$	Densidade do fluido	[kg/m <sup>3</sup> ]

### ***Subscritos***

r Roda  
b Bomba  
s Saída  
m Motriz

### ***Abreviações***

a. C. Antes de Cristo  
AC Corrente alternada  
d c Corrente contínua  
Abs Absoluta  
Man Manométrica  
Ent Entrada  
Amb Ambiente  
Ipm Impulso por minuto

### ***Siglas***

DEM Departamento de Engenharia Mecânica

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Desde a década de 1970, os pesquisadores têm voltado a atenção ao estudo das fontes naturais de energia, especialmente a eólica, a solar e a de biomassa, aplicada na geração de energia elétrica, força motriz para acionamento de máquinas agrícolas e bombeamento d'água.

Os diversos centros de pesquisas em energia não-convencional dedicam-se sempre ao desenvolvimento da performance de áreas de captação, sejam elas eólica ou hidráulica, não dando ênfase à parte compreendida entre a área de captação e o uso da energia transformada. Exemplo disso é o caso da baixa rotação das máquinas não-convencionais que, não sendo levada em conta, usam geradores e outros dispositivos projetados para uso em energia convencional. Isto faz com que as máquinas transformadoras sejam grandes devido ao uso de relações de transmissão mecânica elevada, que aumenta a velocidade de saída e reduz o torque.

As máquinas acionadas por energia alternativa giram com baixa rotação. Como exemplos citam-se àquelas impulsionadas por força humana, que podem atingir 3,4 rad/s quando

aplicado um esforço de 98,06 N em um braço de manivela de raio igual a 0,20 m; os cata-ventos que atingem 9 rad/s quando impelidos por ventos de 9 m/s, e por último as rodas-d'água que trabalham apenas com 0,8 rad/s (Macintyre et al.,1982). Operar com baixas rotações impostas por sistemas de energia natural exige escolha de bombas eficientes e que trabalhem em baixa frequência. Alguns tipos de bombas são imediatamente descartadas devido à exigência de se operar em alta rotação, como são os casos das bombas centrífugas e as rotativas. As bombas que apresentam características compatíveis em baixa frequência são as de pistão, apesar de apresentarem algumas desvantagens tais como: atrito, vazamento nas gaxetas e serem de constituição volumosa. Outra alternativa é a bomba de diafragma. O seu maior uso é para trabalhos em alta frequência, impelida mecânica ou eletricamente, sendo usadas pela indústria automobilística em 100% dos veículos até meados da década de 1990.

Atualmente, os veículos com injeção eletrônica de combustível não usam somente bombas de diafragma, usam também as bombas rotativas de palhetas. Trabalhar com frequências muito baixas, requer um conversor de frequência permitindo que a bomba de diafragma seja acoplada em máquinas manuais, máquinas acionadas por pedal, ou ainda máquinas impulsionadas pelo vento, por água e outras. A finalidade principal neste caso é a aplicação em pequenas propriedades na zona rural, no abastecimento de residências, nas irrigações de pequeno porte ou em qualquer situação que exija uso d'água em quantidades moderadas.

A implantação de um sistema de bombeamento d'água usando fontes alternativas não está restrito ao meio rural onde não exista eletrificação. Nas propriedades eletrificadas, o investimento ainda é justificável, por dois motivos: para economia de energia elétrica e uso como sistema de emergência, na falta de energia elétrica, uma vez que tal situação é rotina no meio rural.

Em alguns pontos as bombas de diafragma já superam as bombas de pistão à saber: não apresentam vazamentos interno e o fluido bombeado não entra em contato com o meio exterior, nem com o mecanismo de acionamento, evitando portanto a contaminação do fluido bombeado por lubrificantes e por outros agentes nocivos externo.



Apesar das bombas de diafragma serem bastante conhecidas e estudadas, necessita-se ainda de esforços no sentido de se elaborar projetos e construir novas versões de bombas de diafragma, visando sua utilização em determinados processos. Neste sentido, os objetivos deste trabalho são:

- Projetar e construir uma bomba de diafragma para uso em baixa rotação.
- Comparar o desempenho da bomba de diafragma com relação a uma bomba de pistão comercial.

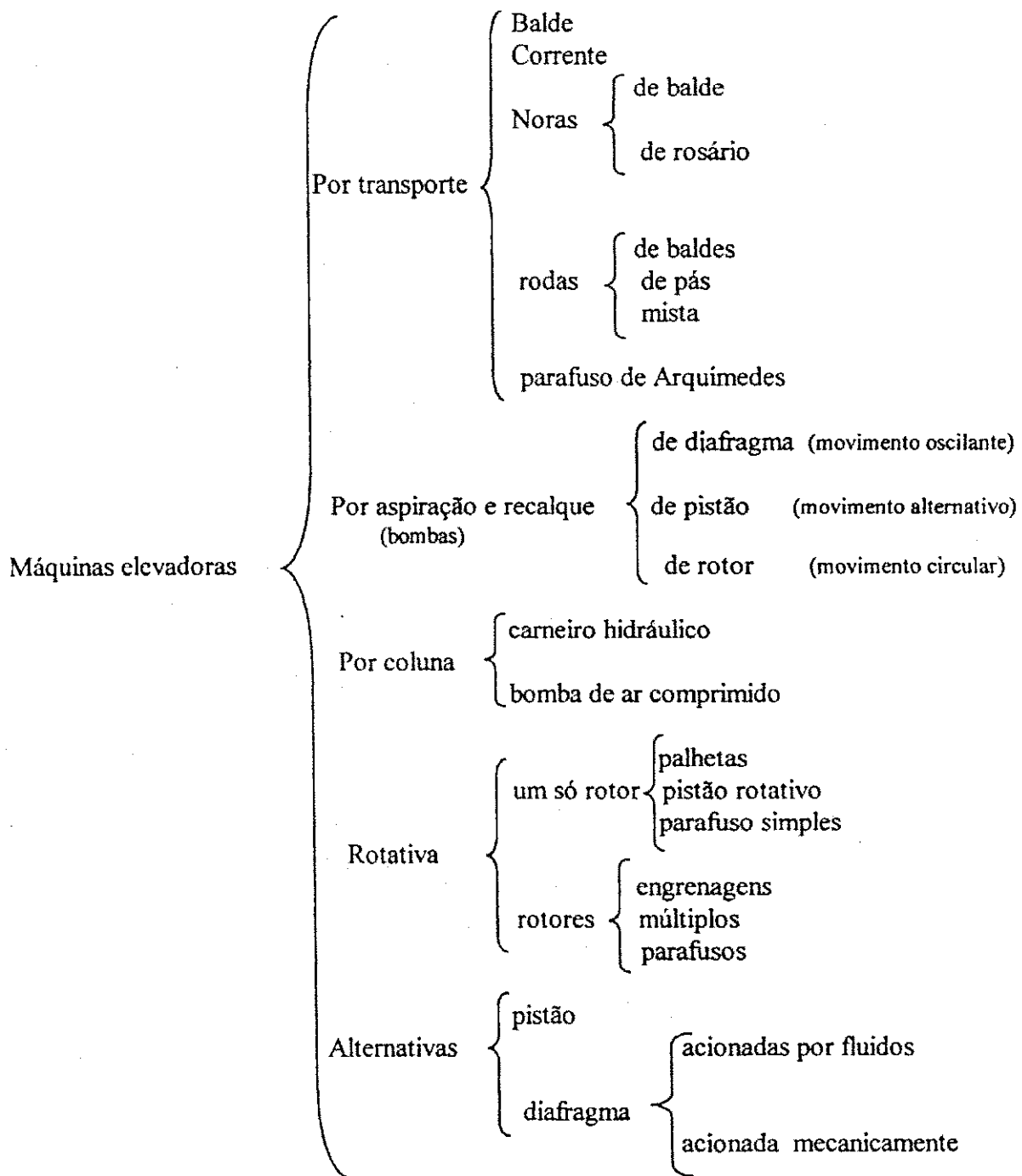
## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1 Máquinas usadas na elevação d'água**

Sempre que se necessita água num local cujo nível seja superior ao da fonte, recorre-se ao uso das máquinas elevadoras. O número de máquinas destinadas a elevação d'água é muito grande e os tipos são os mais variados. Alguns tipos conhecidos datam dos primórdios da humanidade, tendo-se notícia que os egípcios, antes da Era Cristã, já usavam bombas volumétricas. Também se tem notícia que as bombas de pistão já eram usadas no reinado de César Augusto (século I a.C.). Em Alexandria (séculos V a VI a.C.) existia bomba de pistão (fundida em bronze) para combater incêndio. Com o passar dos tempos outras foram inventadas, algumas aperfeiçoadas, porém as antigas bombas de êmbolo ou pistão ainda são bastante usadas, tanto no bombeamento de água como de outros líquidos.

As bombas podem ser classificadas como a seguir:



A Tabela 2.1 ilustra as fontes de energia que acionam as máquinas elevadoras de água.

Tabela 2.1 – Fontes de energia que acionam máquinas elevadoras d'água

Energia	Máquinas que utilizam energia	Máquinas elevadoras
Humana e animal		Máquinas elevadoras por transporte
		Bomba de pistão
		Bomba de diafragma
Eólica	Moinho de vento	Bomba de pistão e de diafragma
		Rodas de pás
		Hélice de Arquimedes
Da queda d'água		Carneiro hidráulico
Da água em movimento	Roda d'água	Bomba de pistão e roda mista
		Bomba centrífuga
De combustíveis	Motores a explosão	Bomba rotativa
Lenha	Máquina a vapor	Bomba de pistão
Elétrica	Motores elétricos	Bomba de ar comprimido
		Bomba de pulsação

Fonte: Daker(1983)

### 2.1.1 Máquinas elevadoras por transporte

São as máquinas mais antigas e simples. Contudo hoje são pouco usadas porque se tornaram bastante obsoletas. A seguir apresenta-se um detalhamento de algumas delas.

#### a) Balde

Consiste simplesmente em um balde preso a uma corda e que é puxado manualmente, a mão livre, através de sarilho ou ainda movido por força animal.

#### b) Corrente

Consiste de uma corrente metálica de material leve montada em roldanas, elevando a água pela simples aderência do líquido à corrente conforme mostra a Figura 2.1. A corrente deve ter uma velocidade superior a velocidade de descida do líquido. Com isso forma-se uma corrente líquida que sobe acompanhando a corrente metálica. No topo da corrente há uma escova ou anel de borracha que serve para retirar a água. Vale salientar que a corrente deve ter os elos curtos e achatados. A velocidade da corrente tem um valor médio abaixo do qual não

há elevação, e acima deste valor a água retorna pelo lado oposto da corrente. É possível com o uso dessa corrente elevar água de poços com profundidade de 10 a 30 m.

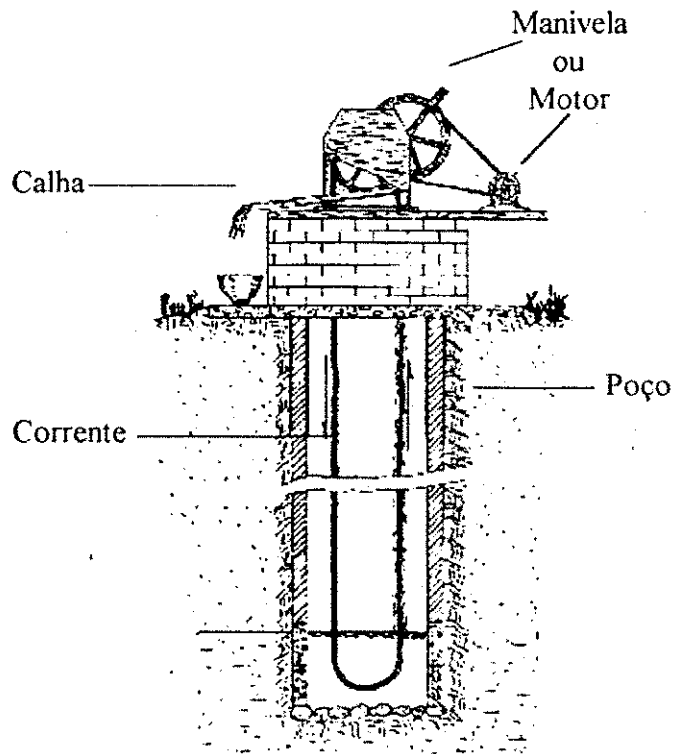


Figura 2.1 – Corte de um poço equipado com corrente elevadora de água. Fonte:Daker (1983)

### c) Noras

São máquinas usadas para retirar água de poços ou cisternas. Divide-se em dois tipos: de balde e de rosário

#### \* Nora de balde

Essa máquina é formada por um certo número de baldes montados em uma cadeia sem fim e atrelada a uma roldana na parte superior, na qual é aplicada a força motriz para retirada do fluido. A força motriz pode ser proveniente de motor, manual ou tração animal. Com o girar da roldana, os baldes deslocam-se no sentido das setas, passando por dentro da água do



poço, subindo cheios e despejando em um coletor apropriado. A vazão desse tipo de máquina depende da capacidade dos baldes, da velocidade periférica da cadeia e do número de baldes que passa por segundo. A Figura 2.2, mostra a configuração geométrica dessa máquina.

A vazão volumétrica é então dada por:

$$q = \alpha V n \quad (2.1)$$

onde  $\alpha = 0,7$  à  $0,8$ .

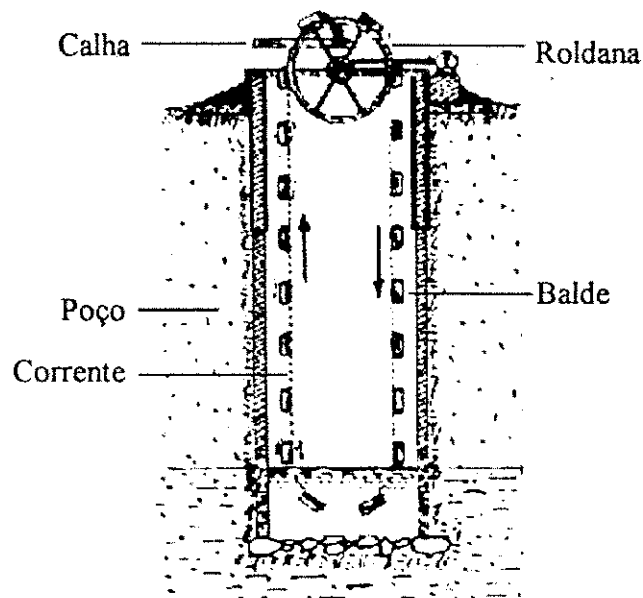


Figura 2.2 - Corte de um poço equipado com nora de baldes.

Fonte: Daker (1983)

#### □ Nora de rosário

Semelhante à nora de balde, a nora de rosário tem como diferença principal a ausência de baldes. Estes são substituídos por discos de borracha ou couro que passam por dentro de um tubo elevando a água no interior deste conforme ilustra a Figura 2.3. Existem ainda noras de

nós, de células entre outras. A vazão volumétrica desse tipo de nora é calculada pela seguinte equação: (Daker, 1983)

$$q = \alpha S v \quad (2.2)$$

onde  $\alpha = 0,8$  à  $0,9$  e  $S$  é a área da seção do tubo de elevação.

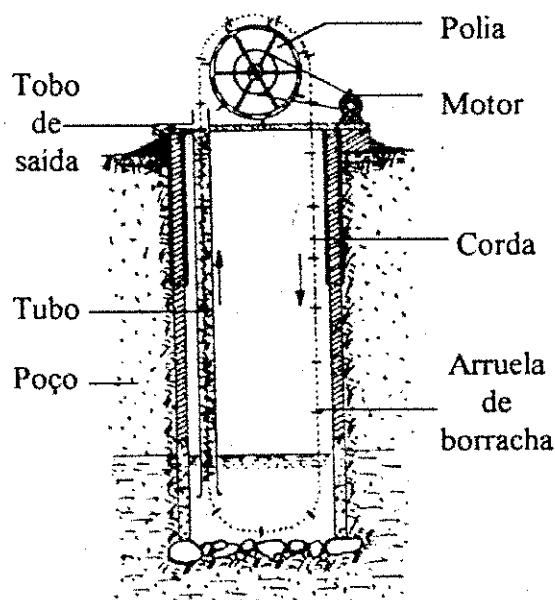


Figura 2.3 - Corte esquemático de um poço equipado com nora de rosário. Fonte: Daker (1983)

#### d) Rodas

As rodas elevam água a pequenas alturas e são acionadas por motor. Os diâmetros variam, chegando a 6 m. A maior altura de elevação é equivalente a  $2/3$  do seu diâmetro. Podem ser:

##### □ Roda de baldes

Essa roda eleva água a uma altura maior do que a roda de pás, conforme ilustra a (Figura 2.4).

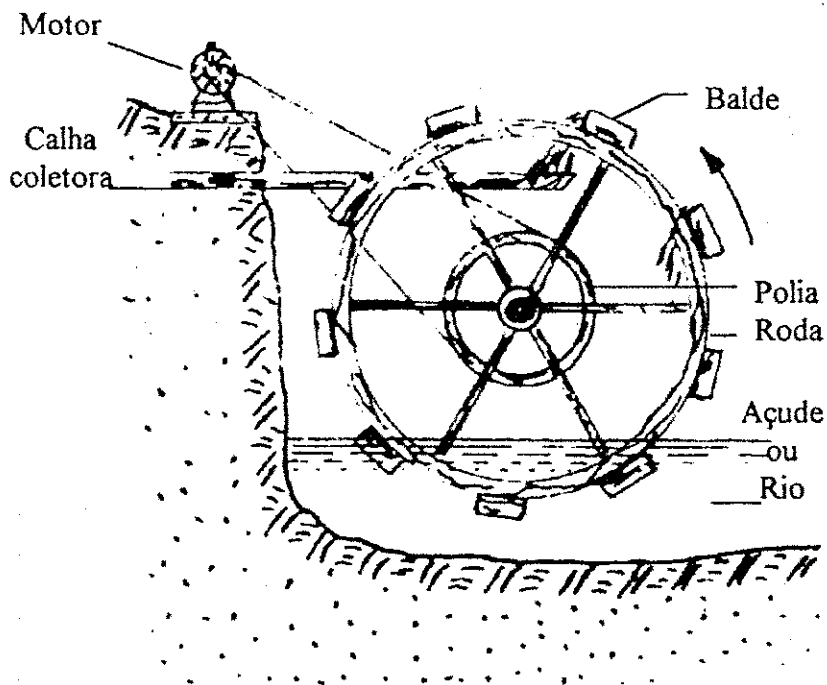


Figura 2.4 - Vista esquemática de uma roda de baldes. Fonte: Daker (1983)

A vazão volumétrica neste caso é dada por:

$$q = \alpha \frac{nN}{60} V \quad (2.3)$$

onde  $\alpha = 0,7$  à  $0,8$

#### □ Rodas de pás

As rodas de pás, ilustradas na (Figura 2.5), são construídas em aço ou madeira e conseguem elevar água apenas até a metade do seu diâmetro. Podem atingir rendimento entre 70 e 90%. A velocidade tangencial não deve ultrapassar 1,0 m/s. As rodas de pás são usadas, ainda hoje na Holanda, drenando campos baixos.

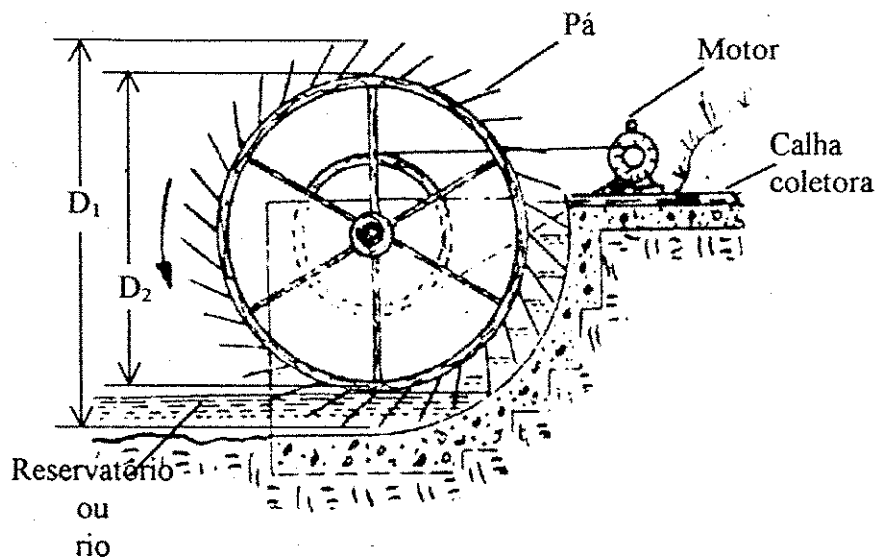


Figura 2.5 – Vista esquemática de uma roda de pás. Fonte: Daker (1983)

A expressão seguinte permite calcular a vazão volumétrica:

$$q = \alpha \frac{\pi (D_1^2 - D_2^2)}{4} L \frac{N}{60} \quad (2.4)$$

onde  $\alpha = 0,7$  à  $0,9$

#### □ Roda mista

Esta roda é empregada em rios, aproveitando a velocidade da água para seu funcionamento. A roda tem em sua periferia grandes pás e um número determinado de baldes ( Figura 2.6). À medida que a água do rio se desloca, movimenta e impulsiona as pás, dando movimento de rotação. Entre as pás, os baldes são adaptados de modo a encherem-se com o movimento da roda, elevando e despejando em coletor próprio a água captada. Nos rios em que o regime de cheias fornece pequena variação do nível da água, essa roda é instalada nas margens. Quando a variação do nível é mais acentuada, elas são instaladas em flutuadores que

acompanham o movimento de sobe e desce do rio. O rendimento volumétrico está entre 70 e 90 %.

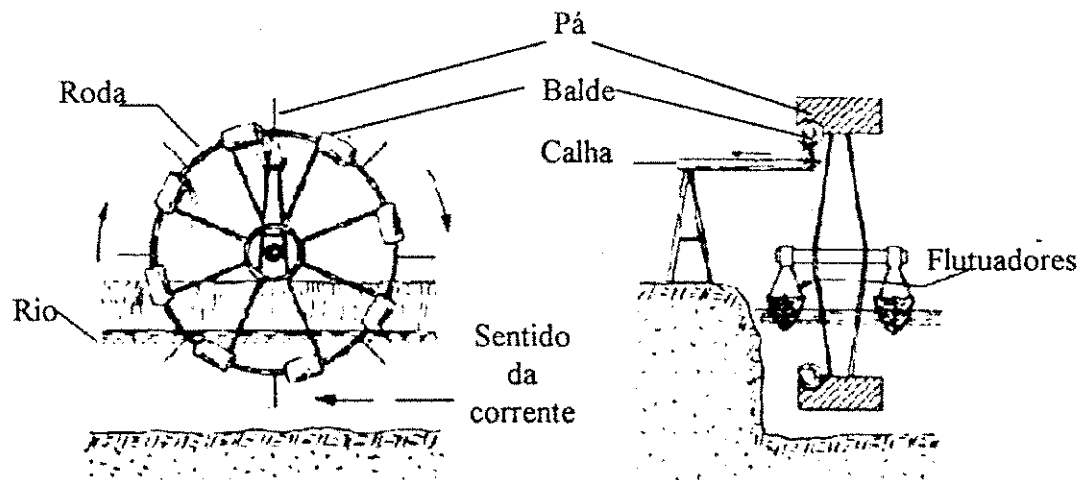


Figura 2.6 – Vistas lateral e frontal de uma roda mista. Fonte: Daker (1983)

A vazão volumétrica é calculada de acordo com a equação (2.1), sendo que neste caso  $\alpha = 0,7$  à  $0,9$ .

### c) Parafuso de Arquimedes

São usados para elevações pequenas, geralmente no máximo de 3,50 m. Seu rendimento varia de 40 a 60 %. O parafuso de Arquimedes (Figura 2.7) pode ser acionado manual ou mecanicamente. É formado por um cilindro metálico, dentro do qual gira uma hélice responsável pelo deslocamento do líquido. O parafuso pode fornecer vazões, de  $0,004 \text{ m}^3/\text{s}$  a 1 m de altura, quando acionado manualmente, por um homem em boas condições, trabalhando durante 6 horas seguidas, até  $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$  a uma altura de 4,50 m quando acionado por moinhos de vento.

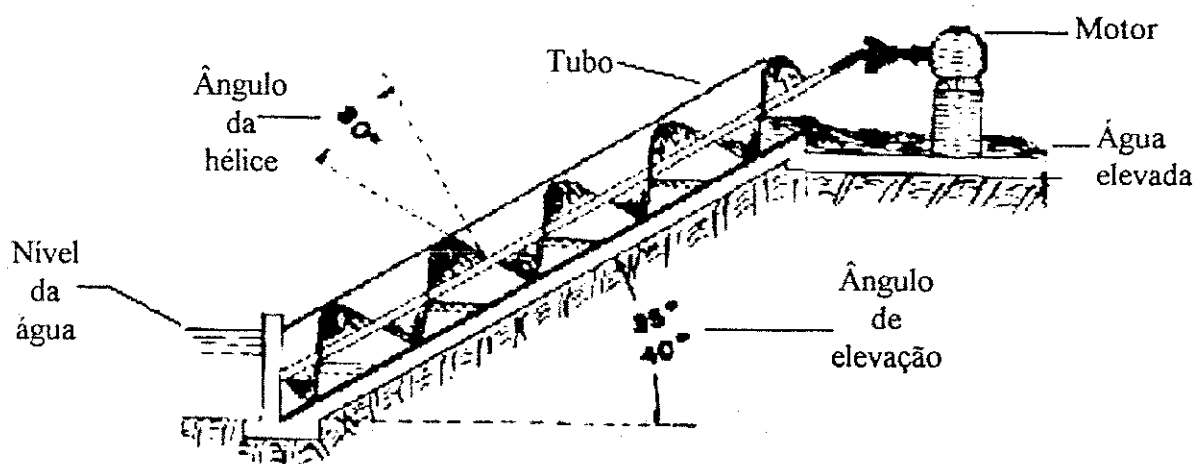


Figura 2.7 - Corte longitudinal da máquina parafuso de Arquimedes. Fonte: Daker (1983)

### 2.1.2 Bombas

São as máquinas destinadas a movimentar qualquer material em estado líquido ou gasoso. São máquinas que elevam água por aspiração e recalque, usando a formação do vácuo parcial para sucção, e pressão para o recalque. As bombas, juntamente com os motores, são as máquinas mais usadas no mundo. As bombas mais usadas são as de pistão, de diafragma e centrífuga. Na aspiração e recalque são usados movimentos oscilante, alternativo e rotativo.

#### a) Bomba de diafragma

As bombas de diafragma dividem-se em duas categorias: as de diafragma rígido e as de diafragma flexível. As bombas de diafragmas rígidos são usadas no meio rural e conhecidas como "bomba relógio" ou "bomba japi". A Figura 2.8 mostra um corte na bomba de diafragma rígido. O diafragma, feito em bronze, contendo duas válvulas, oscila em um corpo de ferro fundido que também contém uma válvula. Neste movimento de vaivém, proporcionado por uma alavanca externa, o fluido é bombeado. Nota-se que, quando a alavanca é puxada no sentido anti horário, a válvula esquerda do corpo fecha e a do diafragma do mesmo lado abre. A água passa do compartimento inferior do corpo para o superior. Acionando-se a alavanca em sentido horário o processo se repete, porém agora, pelas válvulas da direita. Esta bomba é

bastante usada na retirada de óleo em tambores. É uma bomba usada para pequenas vazões e pouca altura.

As bombas de diafragma flexível têm grande aplicação no meio industrial, na elevação de óleos e combustíveis. Em particular, o maior uso está nos automóveis, bombeando combustíveis. Pode ser de acionamento mecânico (Figura 2.9) ou elétrico (Figura 2.10). Existe um tipo de bomba de diafragma flexível ou elástico (Figura 2.11) denominada popularmente “bomba sapo”, bastante usada no esgotamento de valas, por ser uma bomba que pode fornecer grandes vazões à pequenas alturas e se presta ao bombeamento de águas sujas ou mesmo lamas. Existe um grande uso no meio rural das bombas de diafragma flexível, também neste caso vulgarmente denominada “bomba sapo”, ou ainda “bomba submersa elétrica” e “bomba vibratória elétrica”. Este tipo de bomba é bastante simples, composta por um eletroímã, uma válvula e um martelete que vibra à 120 pulsos por segundo, conseguindo elevar água à altura de 85 m com vazão de cerca de  $0,00022\text{m}^3/\text{s}$ .

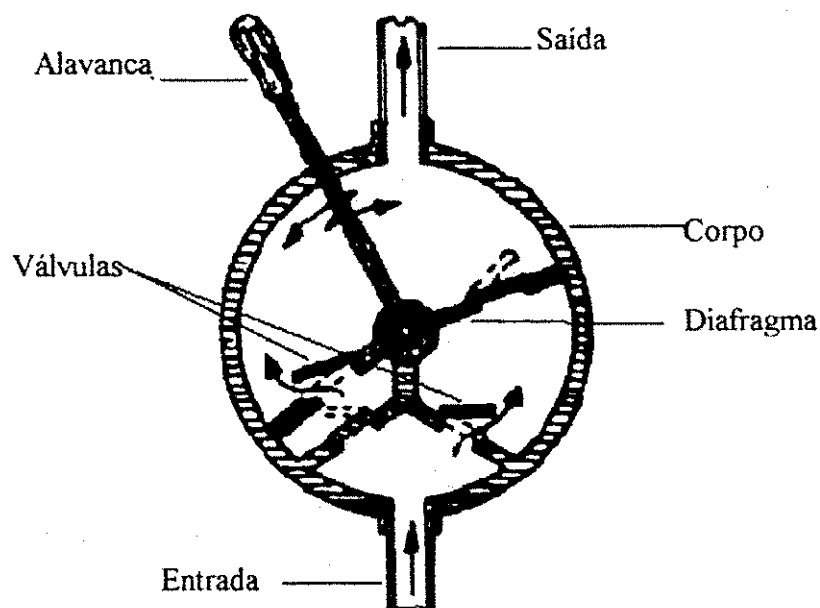


Figura 2.8 - Corte de uma bomba de diafragma rígido. Fonte: Black (1979)

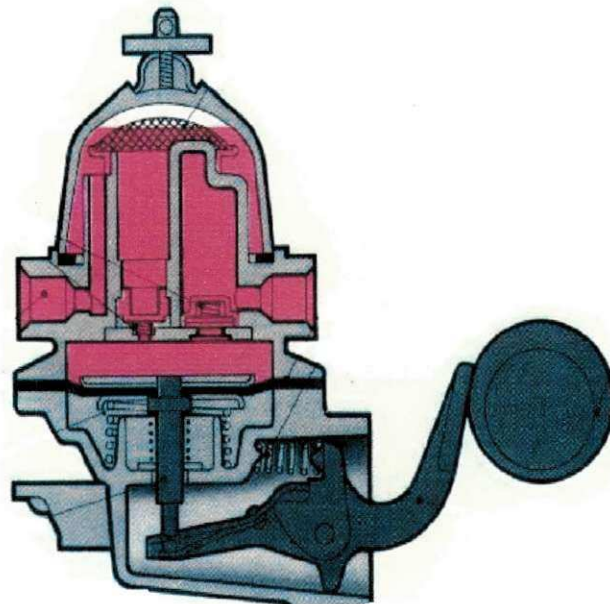


Figura 2.9 - Bomba de diafragma para automóvel com acionamento mecânico.

Fonte: Albuquerque et al (1978)

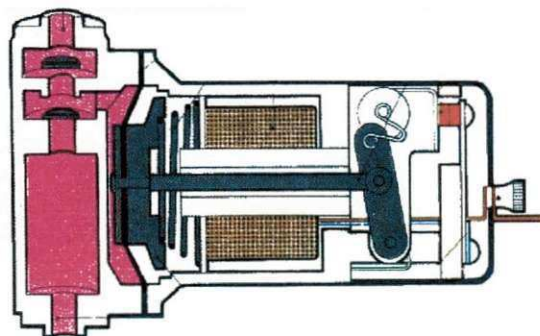


Figura 2.10 – Corte de uma bomba de diafragma elétrica para automóvel.

Fonte:Albuquerque et al (1978)



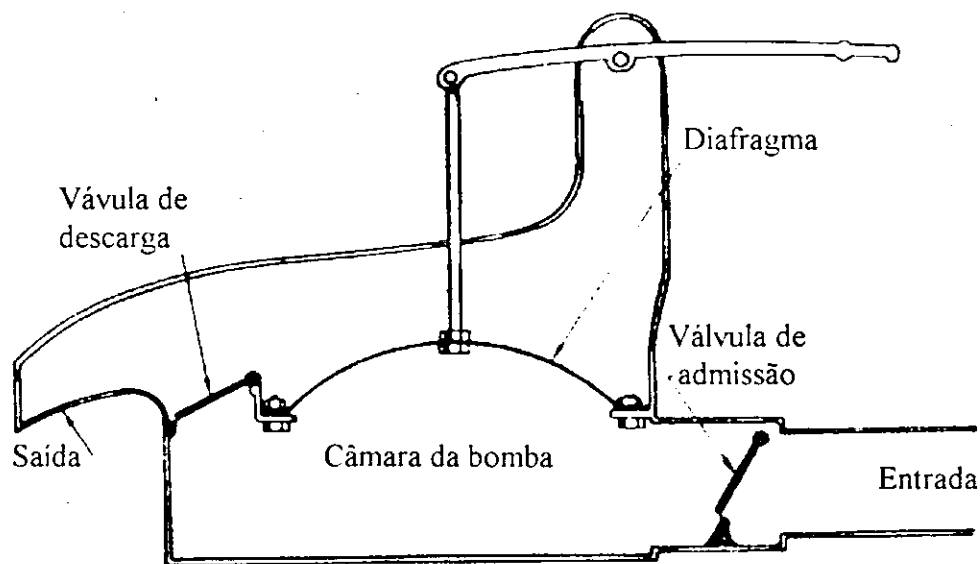


Figura 2.11 - Corte de uma bomba de diafragma tipo sapo. Fonte: Black (1979)

#### • Funcionamento da bomba vibratória elétrica

As Figuras 2.12a-b mostram em corte o funcionamento de uma bomba de pulsação. O trabalho realizado por essa bomba vibratória está diretamente ligado a ciclagem da corrente alternada. Engenhosamente construída e constituída por um corpo caneca que abriga um eletroímã, um martelete, um amortecedor, uma ventosa e uma válvula, essa máquina pulsa 120 vezes por segundo garantido vazões que vão de  $0,0005 \text{ m}^3/\text{s}$  com altura de elevação zero até  $0,00014 \text{ m}^3/\text{s}$  para uma altura de 65 metros de coluna d'água. Acompanhando as ilustrações, pode-se entender o funcionamento simples dessa bomba. Ao ser ligada a uma fonte de energia elétrica alternada, com tensão nominal adequada, tem início o ciclo de trabalho. Considerando o início no instante em que a tensão é máxima, o martelete é atraído pelo eletroímã, onde é exercida uma força  $F$  fazendo com que a ventosa afaste-se da câmara, provocando uma depressão, que por sua vez faz com que a válvula abra e a água penetre no interior da câmara. No instante em que a tensão atinge o valor nulo, isto é, a curva senoidal passa pelo zero, o eletroímã libera o martelete que sob a ação do amortecedor retorna com força ascendente forçando a ventosa contra a câmara. Como resultado dessa ação, a válvula é fechada e a câmara recebe líquido em excesso, que força a ventosa, deformando sua borda. O espaço

criado entre a entrada da câmara e a borda deformada da ventosa proporciona a saída do fluido em excesso para o espaço contíguo interior da caneca. O líquido vai se acumulando até que preencha todo espaço, momento em que só haverá um caminho para o líquido excedente que é o duto de saída. A partir daí o ciclo completa-se e volta a se repetir na frequência citada.

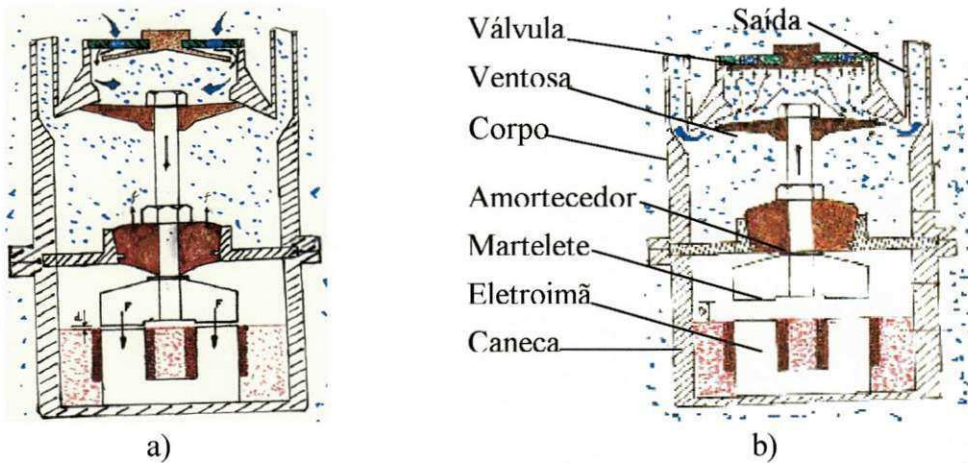


Figura 2.12 - Corte de uma bomba de pulsação. a) Instante da admissão d'água. b) Instante do recalque

### b) Bombas rotativas

Nas bombas rotativas o fluido circula pela periferia do corpo. Esta característica é responsável pela diferença entre este tipo de bomba e a bomba centrífuga. A Figura 2.14 a-c mostra em corte três tipos de bombas rotativas, uma de engrenagem, uma de rotores trilobulados e uma de rotores quadrilobulados. O sentido das setas mostra o caminho do fluido. As bombas rotativas têm princípio de funcionamento semelhante ao da bomba de pistão. Apresentam as vantagens das bombas de pistão e elimina a desvantagem da bomba centrífuga, relativo a necessidade de escorvamento prévio. Essas bombas têm ainda a vantagem de não turvar em demasia o líquido bombeado. Funciona também com baixa rotação, sendo que os tipos menores podem ser acionados manualmente. As bombas de engrenagens são usadas no bombeamento de óleo e são empregadas em todos os automotores, no bombeamento do óleo do cárter.

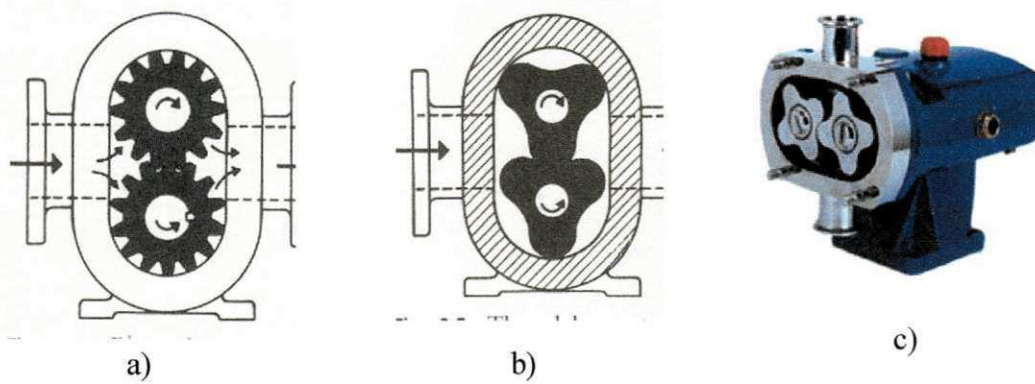


Figura 2.13 - Cortes de bombas rotativas a) Bomba de engrenagem comum. b) Bomba de rotor trilobulado. (Fonte: Hick and Edwards 1971) c) Bomba rotativa quadrilobular moderna.

Fonte: Alfa Laval (2001)

### b) Bombas elevadoras por coluna

As mais conhecidas e aplicadas são: carneiro hidráulico e a bomba de ar comprimido. O carneiro hidráulico ou aríete hidráulico (Figura 2.14 e 2.15) é uma máquina simples composta de um tubo de adução “AB” que deve ter comprimento aproximadamente igual à altura vertical de elevação “H”, uma válvula de escape “E”, uma válvula de recalque “V”, uma câmara de ar “G” e um tubo de recalque. O tubo de alimentação “AB” deverá ter no mínimo 6 e no máximo 10 vezes a altura “h”.

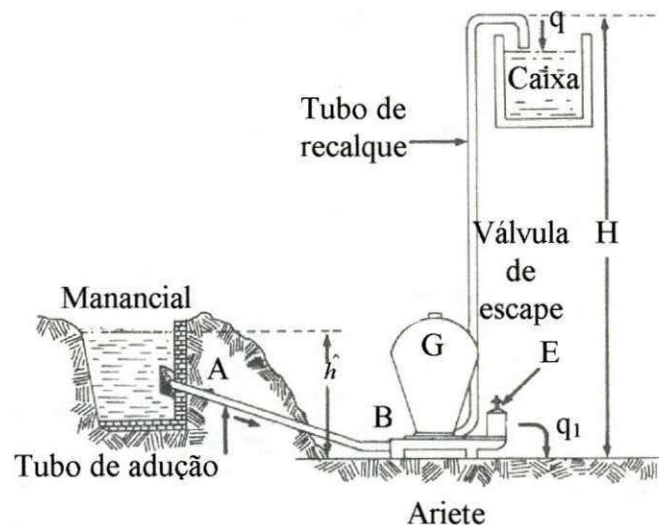


Figura 2.14 – Planta de instalação de um carneiro hidráulico. Fonte: Mialhe (1990)

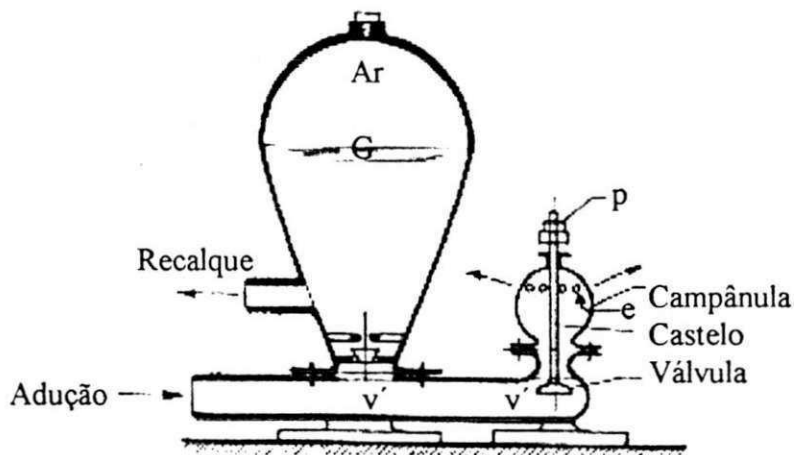


Figura 2.15 - Corte de uma elevadora tipo carneiro hidráulico. Fonte: Macintyre (1983)

A vazão volumétrica é dada por:

$$Q = \frac{qH}{\eta \hat{h}} \quad (2.5)$$

O rendimento  $\eta$  depende da relação  $\frac{\hat{h}}{H}$  e da qualidade de acabamento do equipamento.

A Tabela 2.2 mostra o rendimento em função da relação  $\frac{\hat{h}}{H}$ .

Tabela 2.2 – Rendimento de uma bomba elevadora por coluna.

$\frac{\hat{h}}{H}$	$\eta$ (%)
Até 1:04	75 a 70
1:4 a 1:20	70 a 60
1:20 a 1:30	60 a 50

#### d) Bomba de ar comprimido (air lift)

A bomba de ar comprimido é uma bomba muito simples e sem peças móveis. É um equipamento de uso generalizado e com aplicação na elevação de água em poços profundos.

O princípio de funcionamento dessa bomba baseia-se na leveza da água no tubo de elevação. A Figura 2.16 mostra os detalhes da bomba. Seu funcionamento é o seguinte: o tubo de elevação da água é submerso no poço, na base desse tubo, por meio de outro é injetado ar comprimido. O borbulhar do ar misturado à água, torna esta mais leve no interior do tubo, fazendo com que a água suba até o reservatório fora do poço.

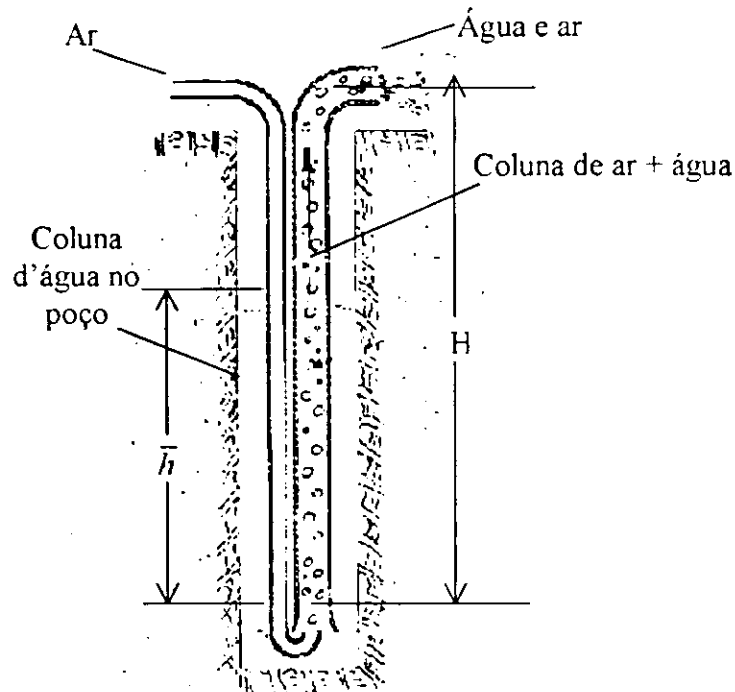


Figura 2.16 - Corte de uma bomba de ar comprimido (air lift) em um poço profundo.

Fonte: Teixeira (1977)

### e) Bomba de pistão

A bomba de pistão ou de êmbolo denominada ainda bomba de cilindro, é constituída por um cilindro em cujo interior move-se um pistão ou êmbolo atrelado a uma haste que se prolonga para fora. As bombas de pistão classificam-se em aspirante, aspirante elevatória, aspirante calcante, calcante e duplo efeito. As Figuras 2.17 a - e ilustram cada uma delas.

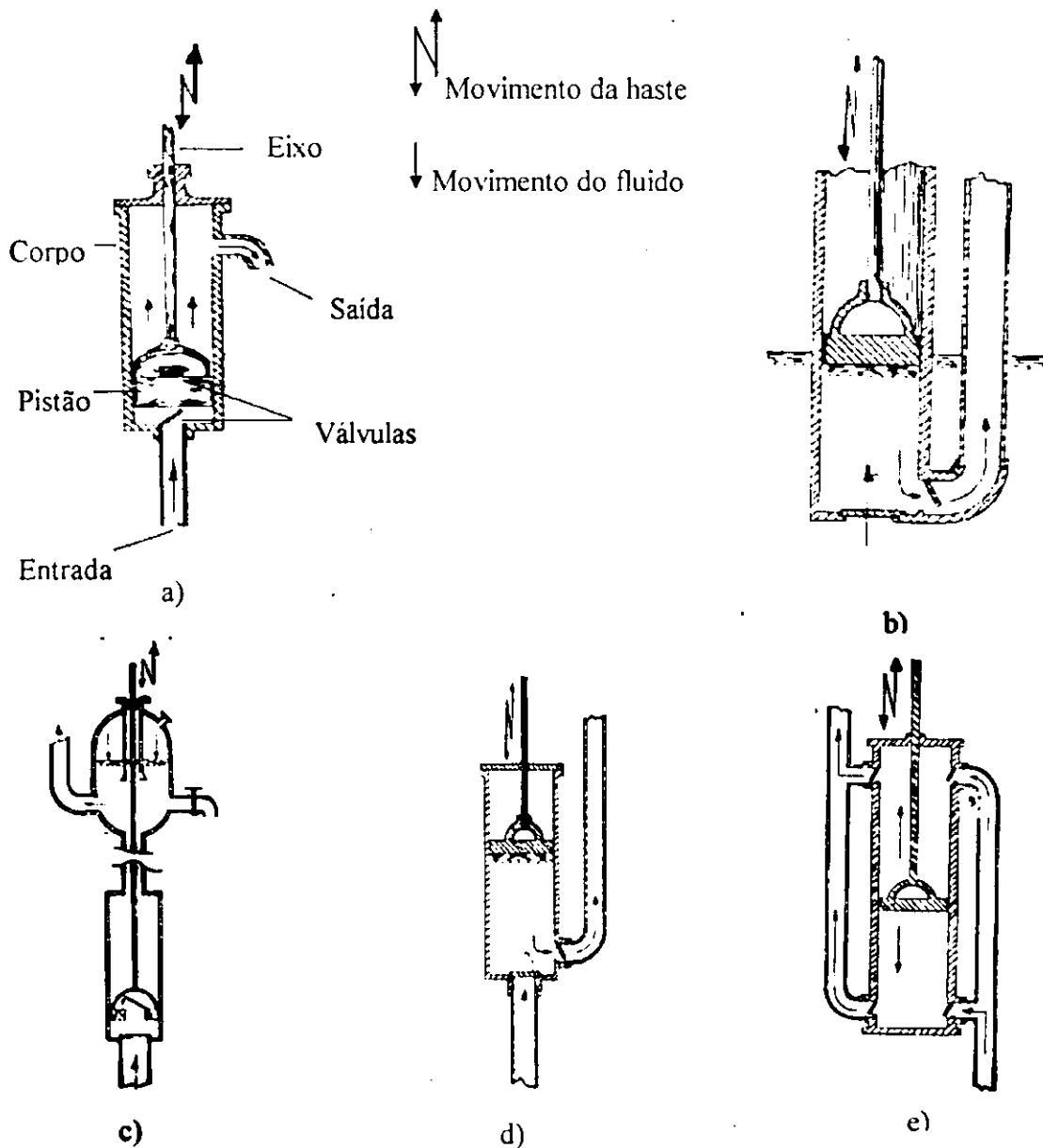


Figura 2.17 – Tipos de bombas de pistão. a) Aspirante, b) Calcante, c) Aspirante elevatória, d) Aspirante calcante e) Duplo efeito. Fonte: Daker (1983)

As bombas alternativas são bombas de deslocamento positivo onde o fluido recebe ação das forças exercidas por um pistão ou êmbolo ou de uma membrana flexível (diafragma). As Figuras 2.18 e 2.19 representam esquematicamente uma bomba aspirante premente, onde o deslocamento dos órgãos propulsores no sentido indicado pela seta verde produz uma

depressão no interior da bomba, fazendo com que o líquido contido em um reservatório, impelido por pressão externa, escoe para o interior da mesma. Essa diferença de pressão é responsável pela abertura da válvula de entrada e conseqüentemente, o fechamento da de saída. Estando o interior da bomba cheio, no ciclo de descarga, o elemento propulsor exerce pressão sobre o conteúdo impelindo-o para o recalque, provocando a abertura da válvula de saída e mantendo fechada a de entrada. Nesse tipo de bomba, a descarga é intermitente e as pressões variam periodicamente em cada ciclo. Uma das vantagens desse tipo de bomba reside no fato delas serem auto-escorvante, podendo funcionar como bomba de ar, fazendo vácuo mesmo quando não há líquido a aspirar. Nas bombas de efeito simples, em cada rotação completa do eixo manivela haverá dois cursos do pistão ou do êmbolo, um de aspiração e outro de descarga, correspondendo a uma vazão que é função do comprimento do curso, da área do pistão e da freqüência de deslocamento desse. O volume de uma bomba de efeito simples é dado por:

$$V = 2RS \quad (2.6)$$

Nas bombas de pistão é necessário levar em consideração o coeficiente volumétrico, que é a relação entre o volume realmente aspirado e o volume gerado pela face ativa do pistão no curso de aspiração. O coeficiente volumétrico menor que a unidade é expresso pela Equação (2.7). Esse coeficiente é o resultado de várias causas ocorridas durante o trabalho que a bomba realiza. Como a aspiração é uma conseqüência do vácuo ocorrido na câmara da bomba devido o deslocamento do pistão, isso provoca o desprendimento parcial dos gases dissolvidos no líquido, que passam a ocupar parte do volume criado pelo movimento do pistão no sentido da admissão. Quando o movimento ocorre no sentido inverso, isto é, no tempo de descarga, o pistão exerce pressão sobre o líquido fazendo com que os gases tornem a dissolver-se no líquido, voltando a situação inicial. Portanto, o coeficiente volumétrico depende da pressão reinante no momento da admissão e do percentual de gás que o líquido traga em dissolução. Outras causas que contribuem para redução do rendimento volumétrico são: a fuga no atraso do fechamento das válvulas e a presença de vazamento nas válvulas no instante do fechamento.

Perdas nos anéis de vedação e gaxetas concorrem também para um menor rendimento.

O coeficiente  $\lambda$  é um indicador da qualidade da bomba chegando a 0,98 nas bombas de grandes dimensões e de boa qualidade. O volume real fornecido por uma bomba de pistão é dado pela Equação (2.6) multiplicado pelo coeficiente  $\lambda$  como mostra-se a seguir:

$$\lambda = \frac{q_r}{q_t} \quad (2.7)$$

De acordo com as Figuras 2.19 e 2.20, se o eixo manivela girar com  $N$  rotações por minuto com um curso  $2R$ , a descarga resultante é dada pela Equação 2.8. (Macintyre,1983)

$$q = \frac{NV}{60} \quad (2.8)$$

Considerando que a área da face do pistão é dada por:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2.9)$$

e substituído-se a Equação (2.9) na Equação (2.8) obtém-se a expressão final para cálculo da vazão (Equação 2.10). Esta equação mostra que a vazão em uma bomba de pistão ou êmbolo é função do comprimento do curso, seção do pistão e sua frequência de deslocamento.

$$q = \frac{N\pi}{120} D^2 R \lambda \quad (2.10)$$



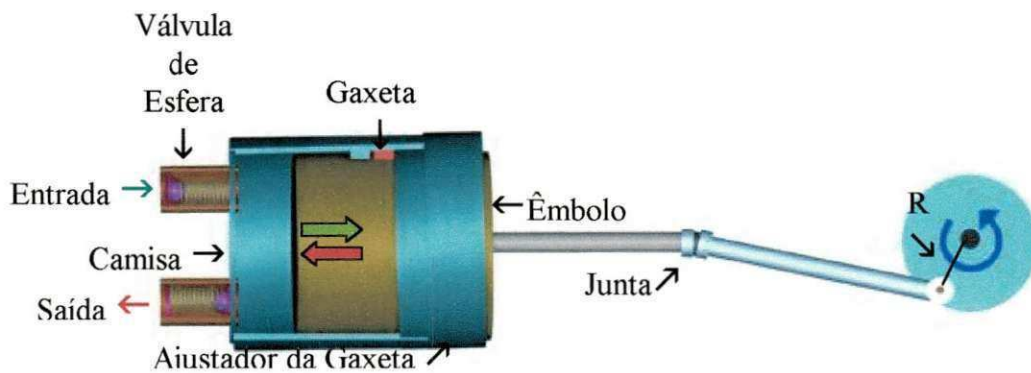


Figura 2.18 - Bomba de êmbolo.

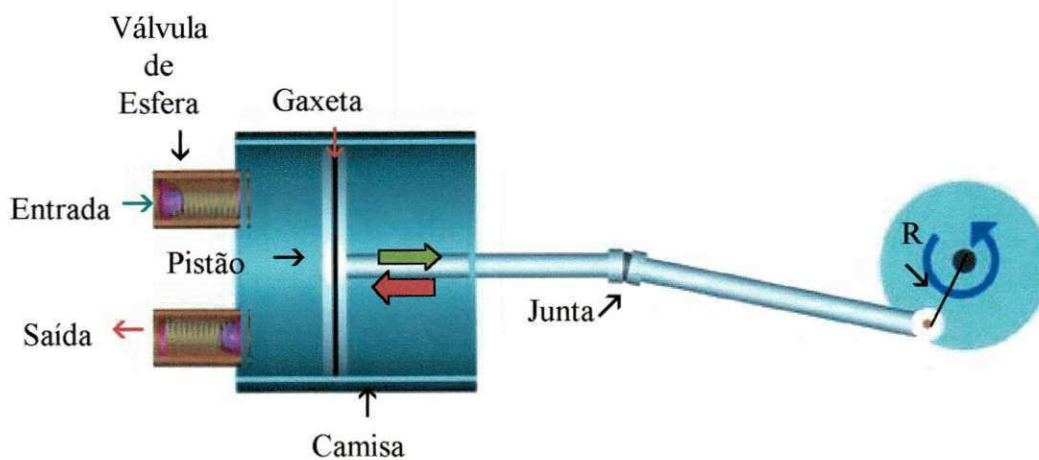


Figura 2.19 - Bomba de pistão.

### f) Bombas centrífugas

São bombas que usam a força centrífuga para elevar líquidos. A Figura 2.20 mostra o desenho em corte de uma dessas bombas. Essa bomba é constituída por um rotor que gira a grande velocidade em uma caixa de forma espiral. A água é aspirada pela parte central e colocada pelas pás, devido a ação da força centrífuga e da gravidade, para a periferia do corpo da bomba, donde sai pelo tubo de descarga. O líquido é sugado devido a formação de vácuo parcial na área central do rotor. Essas bombas atingem rendimento que variam de 60 a 90 % para as grandes bombas. A Figura 2.20 ilustra a constituição desse tipo de bomba. O tipo de bomba aqui referido é o mais simples. Existem outros tipos de bombas centrífugas, que são discutidas nos trabalhos Hicks e Edward, (1971), Black, (1979), entre outros.

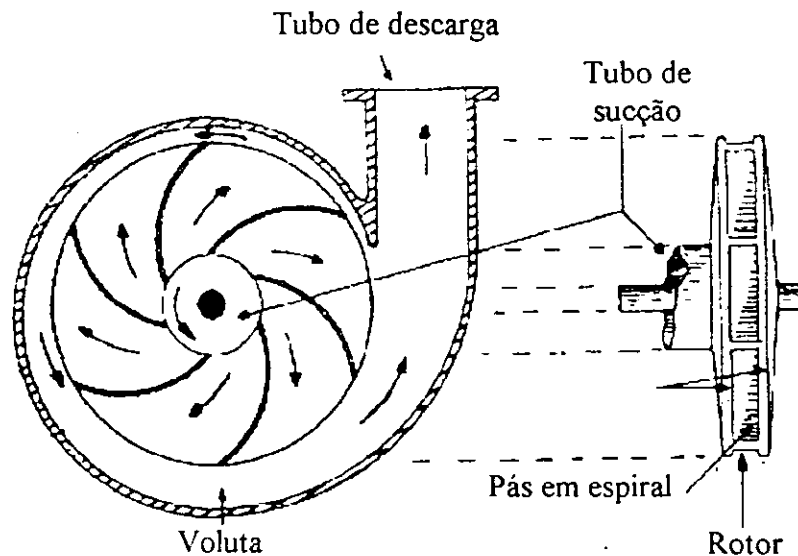


Figura 2.20 – Corte de uma bomba centrífuga. Fonte: Macintyre (1983)

#### g) Bomba peristáltica

É a mais próxima concorrente da bomba de diafragma. As bombas peristálticas sempre foram notabilizadas por sua aplicação em máquinas de hemodiálise devido a seu princípio de funcionamento, que isola totalmente o fluido bombeado do meio ambiente, evitando portanto a contaminação do fluido bombeado ou do meio ambiente. A bomba peristáltica vulgarmente conhecida como “bomba de mangueira”, impele o fluido devido a pressão sofrida por rolos compressores levando o líquido no sentido do escoamento (Figura 2.21). O Spirax Sarco Notícias (2000) publicou um artigo enfatizando o uso da “Bomba Peristáltica Heavy Duty Watson-Marlow Bredel SP15” como componente dosador de produtos químicos no tratamento de dois mil litros de água por segundo, instaladas na Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) (Figura 2.22). A bomba em questão exige um torque mínimo de 60 Nm, para uma vazão de 0,083 litros por revolução. Essa bomba é projetada para altas pressões de descarga, sendo 100% de fluxo positivo (sem contrafluxo). Operando a seco e com rotação reversível, é uma bomba auto-escorvante, sem válvulas, sem cavidades ou selos e sem contato metal-metal

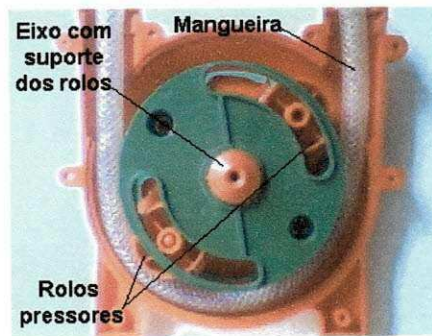


Figura 2.21 - Corte de uma bomba peristáltica (ou tubo flexível) para uso doméstico.



Figura 2.22 - Vista do conjunto de bombas peristálticas na Sanepar.

Fonte: Spirax Sarco Notícias (2000)

### 2.1.2 Estado da arte mais recente sobre bombas

Atualmente, vários pesquisadores têm estudado os mais variados tipos de bombas sob os mais diversos aspectos. Visando agrupar algumas dessas informações, apresenta-se a seguir uma revisão bibliográfica sobre o tema relatado neste trabalho.

Timm et al. (1995) estudando o uso de bomba de diafragma como bomba auxiliar, reportam que um refrigerador equipado com bomba criogênica necessita de uma bomba preliminar para dar partida com baixa pressão antes da baixa temperatura de operação. Normalmente para esses propósitos são usadas bombas rotativas lubrificadas a óleo. Contudo, para uma demanda com completa ausência de hidrocarbonetos e sistema de alto vácuo, não deve ser usado esse tipo de bomba preliminar. Iniciaram então uma pesquisa com bomba livre de óleo, no caso bomba de diafragma. Mostram que, apesar da pressão final ser muito alta, uma bomba de diafragma pode ser usada.

Liebenberg et al. (1995) descrevem um experimento de uma bomba de diafragma fotovoltaica para sistemas de bombeamento d'água, consistindo de um motor dc de imã permanente que aciona o diafragma através de uma came. A eficiência da bomba é baixa e a vida útil é curta. Sendo assim os autores sugerem o uso de um motor dc linear como elemento acionador, alcançando assim alta eficiência e uma expectativa de vida maior. O objetivo desse projeto foi a avaliação da bomba e possíveis configurações eletromagnéticas usando elementos finitos, e por fim, a análise de diversas opções de acionamentos eletromagnéticos. Concluíram que existe a possibilidade da substituição do motor dc por um atuador linear com redução de desgaste. De todas as configurações simuladas, dois acionadores cilíndricos lineares acoplados por um braço pivotado forneceu a mais promissora solução.

Zengerle, et al. (1995) apresentam um estudo sobre uma microbomba bidirecional de silício. Ela consiste num diafragma acionado eletrostaticamente e duas válvulas: uma de entrada e outra de saída. Ela é diferente da maioria das bombas de diafragma em seu arranjo de válvulas. Foram projetadas duas válvulas de membrana que em primeiro lugar entram em

ressonância mecânica entre 1 e 2 kHz. Em baixas frequências (0,1 à 800 Hz), a bomba trabalha num sentido. Nas frequências mais altas (2 à 6 kHz), a bomba opera em sentido inverso. A unidade de deslocamento da bomba em questão é normalmente operada por uma onda quadrada com amplitude de 150 à 200 V em frequência de 0,1 até centenas de Hertz. Investigações em diversas bombas mostraram que as máximas vazões alcançadas estiveram nas faixas de 0,0000042 e 0,0000142 m<sup>3</sup>/s (250 e 850 µl/min) no sentido direto, bem como 0,0000067 e 0,0000033 m<sup>3</sup>/s (400 e 200 µl/min) no sentido inverso. As máximas pressões obtidas foram 30388,68 N/m<sup>2</sup> (3,1 mH<sub>2</sub>O) no sentido direto e 6861,96 N/m<sup>2</sup> (0,7 mH<sub>2</sub>O) no sentido inverso. A potencia total consumida situa-se entre 1 e 5 mW para bomba de dimensões 98mm<sup>3</sup> (7x7x2mm).

Zengerle et al. (1995) investigaram experimentalmente os transientes de pressão em microbombas medidos em escala de milissegundos. Os resultados foram comparados com simulações. Eles mostraram que há uma forte interação entre a dinâmica da bomba de diafragma miniaturizada e a geometria do canal de escoamento, causada pela inércia do fluido. Nos estudos concluíram que, com fluidos, as resistências nas microválvulas são baixas, causando oscilações de pressão tanto na entrada como na saída da câmara da bomba. Observaram também, que as microbombas quando operadas com diferentes fluidos, apresentam diferentes desempenhos, especialmente nas operações acima de 50 Hz. As microbombas são aplicadas nas dosagens de produtos químicos.

Olsson et al. (1995) apresentam o estudo de uma bomba plana sem válvulas, constituída de duas câmaras de operação com quatro diafragmas, tendo cada câmara dois bicos difusores. As duas câmaras de acionamento são ligadas em paralelo a duas outras através de quatro bicos difusores. As duas últimas câmaras são, respectivamente, a entrada e a saída da bomba. Os diafragmas dessa bomba são discos piezoelétricos. A bomba plana tem espessura total de 1mm, e é fabricada em metal. O diâmetro de cada câmara é de 13 mm, com diafragma de 10 mm de diâmetro e 0,2 mm de espessura. Os difusores de entrada são levemente arredondados com gargalo de 0,3 mm e o de saída 1,0 mm. Os bicos difusores são os elementos básicos da bomba substituindo as válvulas. O difusor de entrada é definido como um conduto com área de seção transversal expandida no sentido do fluxo e o tubo de descarga

é um conduto com área da seção transversal decrescente no sentido do fluxo. Foi demonstrado que a configuração plana de câmara dupla, excitada no modo anti-fase, era duas vezes mais estável que no modo em fase, em termos de fluxo e pressão da bomba. O fluxo máximo da bomba foi de  $0,00027\text{m}^3/\text{s}$  (16 ml/min) a pressão máxima foi  $16664,76\text{ N/m}^2$  (1,7 mH<sub>2</sub>O) quando os diafragmas eram excitados na frequência de ressonância de bomba de 540Hz.

Eckle et al. (1995) explicam que, durante décadas, as bombas rotativas foram excelentes como bombas de vácuo. Contudo, os desempenhos das bombas com lubrificação selada ficam limitados quando vapores condensáveis ou corrosivos são bombeados, ou ainda quando a contaminação por refluxo de óleo é crítica. As bombas de diafragma são totalmente livres de óleo e ainda podem ser construídas com materiais altamente resistentes contra ataques químicos. Seu desempenho está limitado principalmente pelo pequeno bombeamento e um restrito vácuo final. Conectando uma bomba de diafragma em série com uma bomba rotativa todas as vantagens desses tipos de bombas são combinados, isto é, resistência química, baixo vácuo final, alta velocidade de bombeamento e grande redução de depósito de hidrocarbonetos no interior da bomba.

Bazzo et al. (1996) analisam o comportamento térmico de bombas capilares aplicadas a circuitos de transferência de calor de dupla fase. Afirmam que, de acordo com os resultados experimentais, há uma boa concordância dos valores medidos com os valores de potência máxima estimada com base no limite capilar. Os resultados analisados indicaram que as bombas capilares de ranhuras circunferenciais permitem que o circuito opere com sucesso, tanto na partida, quanto em condições de regime permanente, suportando variações bruscas de potência no evaporador. Os resultados mostram ainda que a opção por bombas capilares de ranhuras circunferenciais pode constituir um novo caminho para contornar problemas detectados e ainda não resolvidos, em bombas capilares constituídas por estruturas porosas tubulares.

Eckle et al. (1996) reportam em seu trabalho que as modernas bombas de diafragma para vácuo são aplicadas em geração leve e de alto vácuo, devido a conhecimentos tecnológicos tais como: velocidade de bombeamento, alta razão de compressão, longa-vida de diafragma e

válvulas, facilidade de manutenção, totalmente livre de óleo e sua afinidade com o meio ambiente. Com o amplo uso das bombas de diafragma, se fez necessário introduzir novo padrão de medida da velocidade de bombeamento dessa bomba oscilante, alcançando alta precisão (A norma DIN28432 contém as especificações para bomba de diafragma). Com o novo padrão, as curvas de velocidade e pressão final para o Hélio, Nitrogênio e Argônio, foram determinadas para bombas de diafragma de um a quatro estágios, sendo os parâmetros medidos e analisados sob bases de fluxo turbulento e laminar bem como o efeito térmico.

Bowan et al. (1997) descrevem as especificações de uma bomba de diafragma operada por ar. Dois grupos de componentes de bomba são particularmente importantes, quando materiais de construção precisam ser especificados: as partes molhadas e os elastômeros. Partes molhadas são definidas como a admissão, a descarga, câmara de líquido, parte externa dos diafragmas e cabeça dos pistões. Diafragma, válvulas esféricas, sede de válvulas e anéis O-rings são conhecidos como bomba elastômero. Na definição dos materiais para construção de bombas, deve-se em primeiro lugar considerar quatro fatores importantes: a) compatibilidade química; b) grau de abrasão dos materiais; c) limitações de temperatura e d) investimento inicial.

Alfa Laval (1999) experiente empresa no desenvolvimento e fornecimento de bombas de diafragmas operadas por ar, oferece uma introdução e orientação para seleção e entendimento dessas bombas. De aparência grosseira, essas bombas têm um custo inicial baixo e uma excepcional tolerância à variação nas condições operacionais. A bomba usa ar para acionar reciprocamente dois diafragmas dentro de uma câmara, que puxa o fluido para o interior da bomba e descarrega a pressão forçando o fluido para fora da bomba. O coração da bomba é um sistema de válvulas de ar que fornece um serviço de dupla ação, distribuindo ar para cada uma das câmaras. Essas bombas são providas de sistema autolubrificante reduzindo em muito a possibilidade de contaminação do produto bombeado.

All-Flo Pump Co. (1999) reporta uma bomba metálica de duplo diafragma (All-Flo's), medindo 13mm (1/2pol) com capacidade de bombear  $0,0008833\text{m}^3/\text{s}$  (53 l/min) sendo o último lançamento para empresas na linha duplo diafragma sem lubrificação. Essas bombas estão

disponíveis em alumínio ou aço inoxidável, com diafragma em termoplástico ou elastômero. Há opção de bombas múltiplas para grandes capacidades.

Warnner International Ltda. (2000) descreve detalhes construtivos de uma bomba denominada Hydra-Cell, que é um misto de bomba rotativa, pistão e diafragma. A Hydra-Cell funciona da seguinte maneira: um eixo gira, movimentando um prato oscilante, que por sua vez aciona três conjuntos de pistões hidráulicos ligados a três diafragmas flexíveis, sendo estes últimos responsáveis pelo bombeamento do fluido. A Hydra-Cell trabalha com uma eficiência de 80%, operando com 900 rpm, e é capaz de bombear  $0,0024\text{m}^3/\text{s}$  (144 l/min) com uma pressão de  $140174,65\text{ N/m}^2$  (200 psi).

Borges et al. (1996, 1998, 2000) apresentam em seus trabalhos estudos de avaliação de desempenho de bombas eletromagnéticas de corrente contínua. A bomba em estudo tem grande importância na refrigeração de reatores rápidos através de circuito de metal líquido. Ela funciona de acordo com a lei de Faraday e tem como coração um magneto em forma de "C", responsável pelo campo magnético. Esse campo magnético por sua vez, interage com a corrente aplicada no fluxo do metal líquido no caso, mercúrio líquido. Os resultados experimentais obtidos levaram os autores a ver a importância de elaboração de modelos matemáticos específicos para os casos estudados.

Lewa Hebert Co. (2000) detalha uma bomba de diafragma triplice para uma vazão de  $0,194\text{m}^3/\text{s}$  ( $70\text{m}^3/\text{h}$ ) sob pressão acima de  $119969,59\text{ kN/m}^2$  (1200 bar). Esse nível de bombeamento é possível devido a um projeto avançado de engrenagens que a torna compacta. Uma unidade de torção sem acoplamento com uma transmissão leve, não exigindo banho de óleo e selo dinâmico, torna o conjunto um sistema de fácil manutenção e de baixo custo operacional.

Blackmer (2000) reporta o projeto de um disco excêntrico, especificamente para reduzir custos, pela eliminação de vazamentos e redução do tempo de manutenção. A bomba em aço inoxidável foi projetada para uso em química, química fina, indústria farmacêutica, agroquímica, indústria de papel e petroquímica. A bomba descrita não tem selo mecânico, no



seu lugar é usado um inovador fole de aço inoxidável. A capacidade de bombeamento em termo de viscosidade está em torno 5000 cSt (24000 SSU) para pressões de 896097.26 N/m<sup>2</sup> (72.5 à 130 psi). A bomba avaliada para temperatura de 100°C, demonstrou alta capacidade de autoescorvamento, limitando a condição de trabalhar a seco.

All-Flo Pump Company Inc. (2000) introduziu no mercado internacional uma bomba de diafragma em alumínio com 25mm (2 pol) e diafragma intercambiável. Essa bomba é capaz de bombear 0,0094m<sup>3</sup>/s (150 gpm) e é equipada com válvula cuja sede em polipropileno é resistente a abrasão. O sistema de acionamento por ar é o mais eficiente do mercado, quando comparado com os até então conhecidos. Devido a sua construção com poucos componentes e sem lubrificação, esse tipo de bomba torna-se um modelo de fácil manutenção.

Charles Austen Pumps Ltd. (2000) descreve uma combinação de bomba rotativa autoescorvante com bomba de diafragma. A bomba combina as vantagens da ausência de selo das bombas de diafragma, a suavidade das rotativas sem válvulas e o autoescorvamento das bombas de pistão em um único projeto. Essa bomba tem uma capacidade de escoamento de fluido numa faixa compreendida entre 0,000016 a 0,00016m<sup>3</sup>/s (1 a 10 l/min) com pressão de 199950,7011 N/m<sup>2</sup> (2 bar). Uma outra vantagem é a sucção que atinge 8 m, mesmo estando seca. Em suas aplicações estão incluídas, remoções de condensação, transferência de líquidos e sistemas de refrigeração.

Charles Austen Pumps Ltd. (2001) expõe sua mais recente tecnologia, uma bomba de diafragma rotativa que inovou as bombas de vácuo. A série RD5V combina a performance de alto vácuo de uma ventoinha lubrificada a óleo e a vantagem de uma bomba de diafragma que não necessita de lubrificação. A compacta e silenciosa bomba dá um excepcional vácuo para o seu tamanho. Ela fornece 1,33 N/m<sup>2</sup> (10<sup>-2</sup> Torr) e um fluxo de 0,000025m<sup>3</sup>/s (1,5 l/min). Podem ser acionadas por motores ac ou dc são ideais para uso em indústrias e laboratórios. Em sua gama de aplicações estão incluídos testes de componentes para uso em satélites, detecção de vazamentos, bomba de apoio para alto vácuo e calibração de instrumentos.

## **CAPÍTULO 3**

### **METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

#### **3.1 Aspectos construtivos e de funcionamento da bomba de diafragma**

##### **3.1.1 Projeto e construção**

Na construção da bomba modelo, não foram seguidos os fatores referentes à compatibilidade química, grau de abrasão, limitação de temperatura e investimento inicial, definidos por Bowan et al. (1997), por tratar-se de um equipamento cujo objetivo principal é comparar o desempenho em relação a uma bomba de pistão comercial. Usar materiais resistentes à corrosão seria interessante porém oneraria muito o protótipo, cuja utilização praticamente se limita aos testes. O conjunto conversor-bomba teve sua construção dividida em duas partes principais: a bomba propriamente dita, conforme ilustra a Figura 3.1, e o mecanismo conversor, mostrado na Figura 3.2.

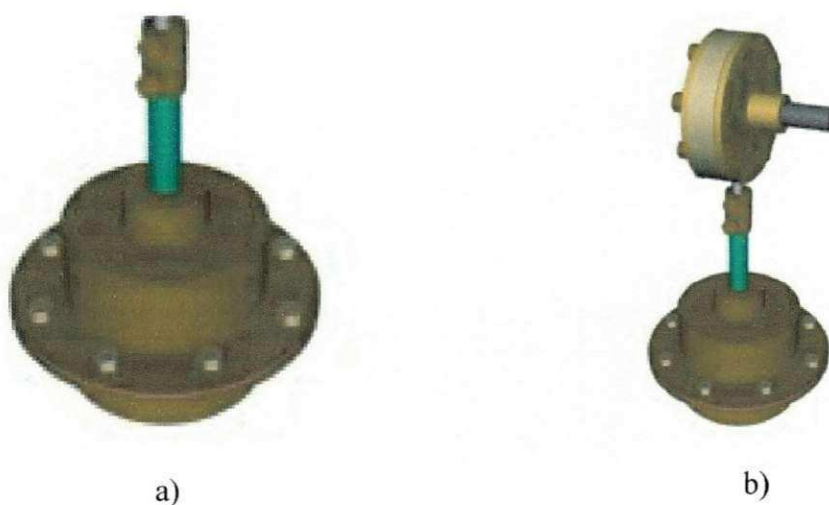


Figura 3.1 - Bomba de diafragma. a) Vista em perspectiva. b) Acoplada ao conversor.

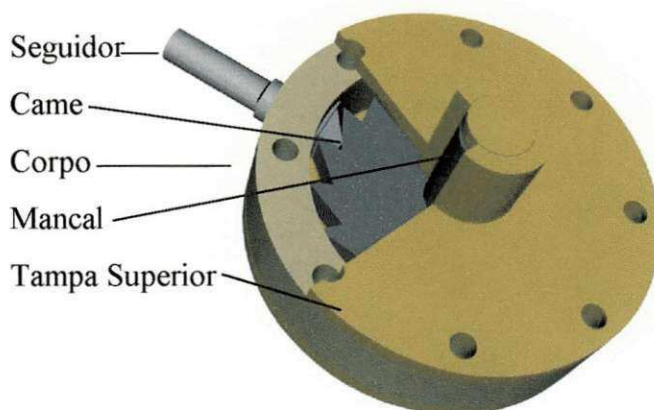


Figura 3.2 - Conversor com corte mostrando o interior.

### 3.1.1.1 Mecanismo conversor

Normalmente as máquinas acionadas por fontes alternativas de energia giram em baixa rotação, pois essa é uma característica marcante desse tipo de fonte. As bombas de diafragma, devido o seu limitado curso, necessitam trabalhar com velocidade bem mais alta, em torno de 91,3 rad/s rpm (Warnner International Ltda., 2000). Neste sentido, acionar uma bomba de diafragma com máquinas impulsionadas por energia natural requer algum tipo de

transformação de baixa rotação para alta frequência de impulso, devido às características dessa bomba. A idéia de usar pulsos surgiu da observação de um acoplador auto-separável de um torno mecânico conforme mostra a Figura 3.3. Posteriormente, pela observação do mecanismo de impacto de uma furadeira elétrica portátil, que usa elemento transformador semelhante, concretizou-se a idéia do uso de um mecanismo análogo.

O acoplador da Figura 3.3 é composto de dois flanges “A” e “B” com dentes triangulares, acoplados entre si por um eixo e pressionados por uma mola “M” que tem a função de mantê-los unidos, de maneira que funcione como componente regulador da potência solicitada no eixo de trabalho, equilibrando a potência motora em condições normais. Quando o eixo que contém o acoplador funciona em condições normais, um lado dele está ligado a fonte acionadora e o outro a carga acionada. Se por qualquer motivo, a carga ofereça resistência superior àquela para qual foi calibrada, nesse momento, o flange “A” se movimentará com relação ao flange “B” afastando-se e aproximando-se, desta feita em movimento oscilatório, com amplitude igual à altura do dente. O mecanismo de impacto da furadeira oferece uma saída pulsante de 12 ipm para cada 1 rpm, tem uma pequena diferença construtiva e não possui a mola. Essa mola é substituída pelo esforço que o operador impõe sobre a máquina contra o objeto a ser perfurado.

A Figura 3.4 mostra os detalhes do mecanismo pulsador de uma furadeira elétrica portátil. Devido à falta de equipamentos necessários não foi possível construir um mecanismo como o acoplador já descrito. A solução mais aproximada para fornecer o mesmo resultado, isto é, transformar rotações em impulsos, foi encontrada em uma catraca conforme ilustra a Figura 3.5.

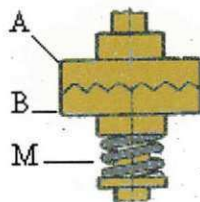


Figura 3.3 - Vista do Acoplador auto-separável.

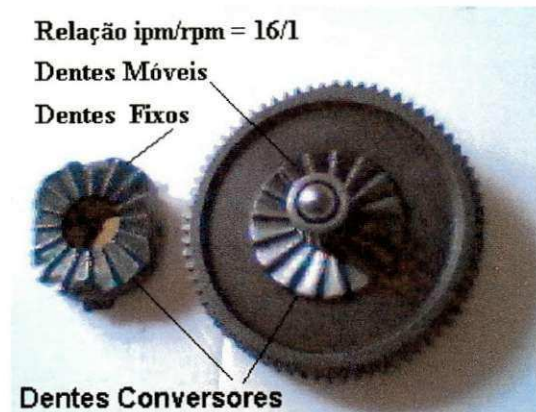


Figura 3.4 - Mecanismo de uma furadeira elétrica portátil.

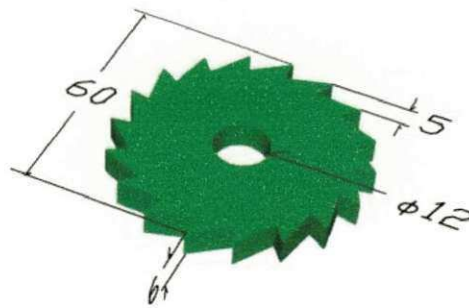


Figura 3.5 – Catraca. (dimensões em mm)

O mecanismo foi inicialmente projetado como está apresentado na Figura 3.6 e foi constituído por uma caixa circular formada por um anel, onde deveriam ser fixadas por parafuso passantes, duas tampas contendo mancais. No interior da caixa continha uma catraca com a função de uma came e o respectivo seguidor que se prolonga para o exterior da mesma, para ser acoplado a haste da bomba. Por ocasião da construção houve algumas modificações visando redução no tempo construtivo, embora com maior desperdício de material. A modificação fundamental processou-se na caixa, que agora é composta de um corpo cilíndrico com mancal e uma tampa com quatro parafusos de cabeça cilíndrica com sextavado interno conforme mostra a Figura 3.7. A peça de elaboração mais crítica foi a catraca, devido as condições técnicas de produção artesanal. A Figura 3.8 elucida melhor o projeto da came com o sistema de acoplamento.



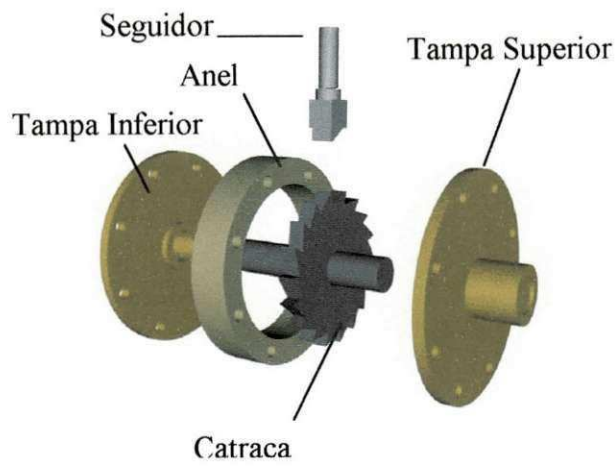


Figura 3.6 - Vista explodida do conjunto conversor.

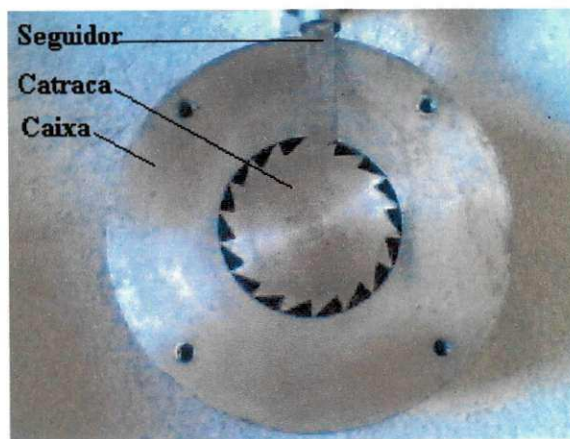


Figura 3.7 - Came na caixa, fabricada em aço.



Figura 3.8 - Conjunto came e seguidor com os seus acopladores.

### 3.1.1.2 A bomba

A bomba é constituída por duas câmaras cilíndricas entre as quais fica preso o diafragma, fabricado em borracha apropriada para tal fim. Maiores detalhes podem ser vistos na Figura 3.9. O aspecto final da bomba construída e totalmente pronta é mostrado na Figura 3.10 a-b Na Figura 3.10a vê-se a bomba acoplada ao sistema conversor que por sua vez está ligado ao eixo da roda d'água. A Figura 3.10b enfoca a bomba com as tubulações de admissão e recalque e o sistema de válvulas de entrada e saída.

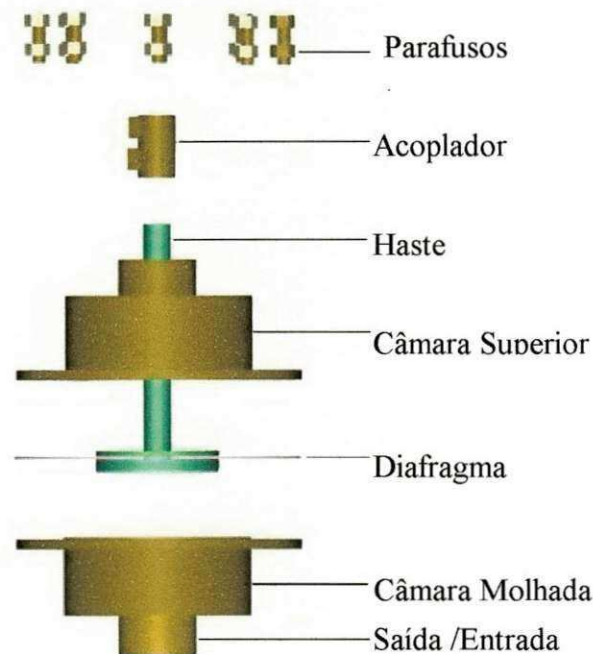


Figura 3.9 - Detalhes de uma bomba de diafragma.

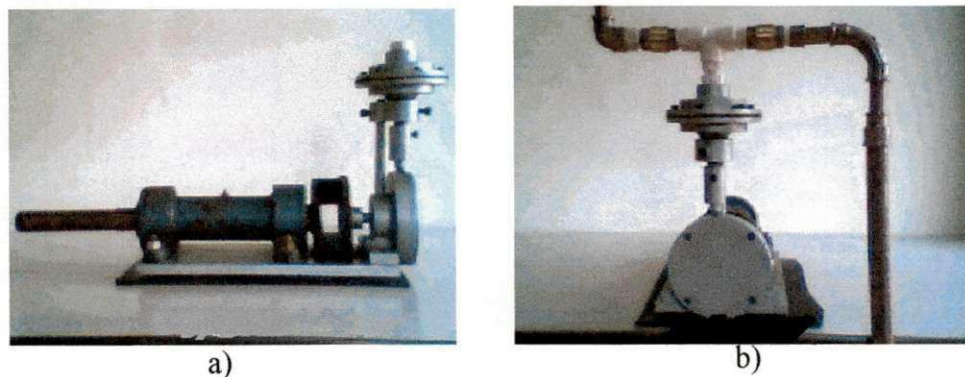


Figura 3.10 - A bomba de diafragma no sistema de bombeamento. a) Acoplada ao eixo da roda d'água. b) Vista frontal com tubulação e válvulas.

### 3.1.2 Princípio de Funcionamento

As bombas de diafragma são usadas para bombeamento de líquidos limpos ou contendo sólidos, substâncias pastosas, drenagens, lodos, soluções ácidas e alcalinas. Um diafragma de material flexível não metálico suporta melhor a ação corrosiva e erosiva que as partes metálicas de uma bomba de pistão. Essas bombas funcionam pela ação de compressão de um diafragma, de lâmina flexível ou membrana de borracha. O movimento alternativo que comprime o diafragma é normalmente fornecido por um sistema excêntrico, pela ação de ar comprimido ou óleo, proveniente de uma fonte exterior.

A própria constituição característica da bomba de diafragma (Figura 3.11), leva a deduzir que a amplitude de deslocamento do diafragma não pode ser grande. O movimento alternativo imposto ao diafragma através da haste, deve ser fornecido por um eixo com excentricidade igual ao deslocamento do diafragma. Quando o excêntrico estiver no ponto mais alto, a mola e o diafragma estarão em compressão, que por sua vez comprime o fluido contido na câmara molhada forçando as válvulas. A pressão do fluido fecha a válvula de entrada e abre a de saída realizando-se a descarga. No momento seguinte, 180° após, o excêntrico atinge o ponto mais baixo e o diafragma então retorna para posição inicial devido a força da mola, realizando o vácuo na câmara. Com a depressão, a válvula de saída é fechada e a de entrada é aberta e o fluido que passa pela válvula de entrada preenche a câmara. O ciclo volta a se repetir enquanto houver giro no eixo de acionamento. A Figura 3.12 mostra esquematicamente o detalhe do excêntrico na posição neutra. O sentido de rotação independe, podendo ser positivo ou negativo.

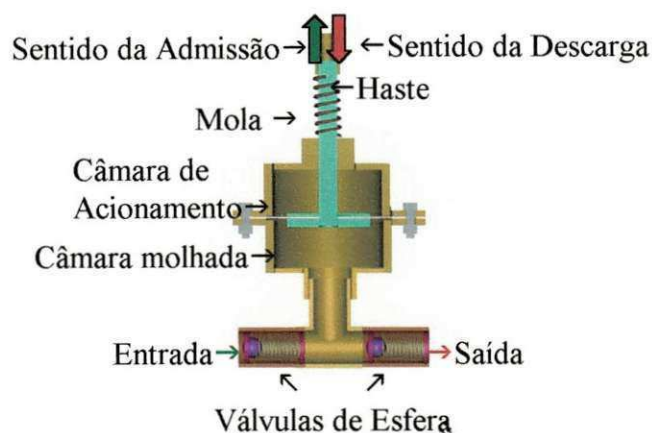


Figura 3.11 - Bomba de diafragma. Vista em corte.



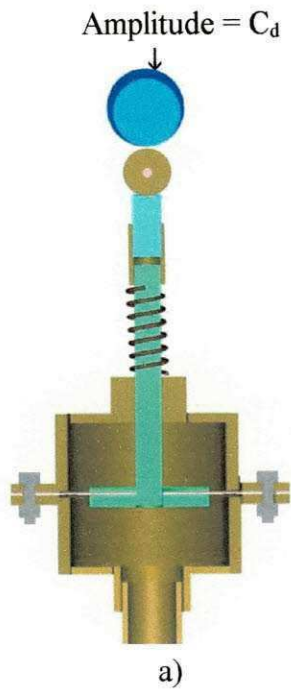


Figura 3.12 - Detalhe da amplitude de uma came. a) Vista frontal; b) Vista em 45°.

A vazão de uma bomba de diafragma (como numa bomba de pistão) é função da frequência de oscilação do diafragma, da área e da amplitude de deslocamento da membrana. O volume deslocado pela membrana quando está sob pressão máxima é dado pela Equação (3.1) que é aproximadamente igual ao volume de uma zona esférica.

$$V = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot \tilde{H}(3a^2 + 3b^2 + \tilde{H}^2) \quad (3.1)$$

Se o eixo gira com  $N$  rotações por minuto, a vazão será expressa pela Equação (3.2), isso no caso do excêntrico da Figura 3.12.

$$q = \frac{N}{360} \cdot \pi \cdot \tilde{H}(3a^2 + 3b^2 + \tilde{H}^2) \quad (3.2)$$

O projeto em estudo usa a catraca ilustrada na Figura 3.5 que fornece  $m$  pulsos em cada revolução. Sendo assim a vazão será calculada conforme a Equação (3.3).

$$q = \frac{m \cdot N}{360} \cdot \pi \cdot \tilde{H}(3a^2 + 3b^2 + \tilde{H}^2) \quad (3.3)$$

Considera-se  $m = 18$ , e incorporando o coeficiente volumétrico  $\lambda$ , a vazão final será dada por:

$$q = \frac{N}{20} \cdot \pi \cdot \tilde{H}(3a^2 + 3b^2 + \tilde{H}^2)\lambda \quad (3.4)$$

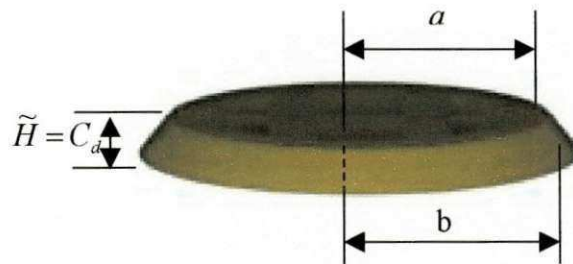


Figura 3.13 - Vista de uma zona esférica. Fonte: Provenza (1976)

### 3.2 Metodologia Experimental

A fim de comparar o desempenho da bomba de diafragma proposta neste trabalho com uma bomba de pistão, torna-se necessário determinar o volume expelido por cada bomba em uma revolução da roda d'água. Com esse procedimento, os dois êmbolos das bombas de pistão terão realizado o trabalho total. Com o movimento lento as válvulas terão perdas reduzidas. Com as câmaras enchendo vagarosamente, as perdas devido aos gases dissolvidos na água são minimizadas e desta forma não influenciam nas medidas. O volume lançado deverá então estar bem próximo do valor teórico calculado pela Equação (2.6). Procedimento idêntico foi realizado na bomba de diafragma, começando pela expulsão do volume gerado pela amplitude de um dente. Em seguida foi realizada a medida de uma revolução que abrange o volume gerado por todos os dentes que compõem a catraca. Este procedimento foi realizado manualmente.

Na segunda etapa foram efetuadas as medidas no conjunto de bombas que compõe a roda d'água. As medidas realizadas foram as seguintes:

- a) Pressão na admissão da água - No funcionamento normal a pressão na admissão é negativa, portanto, usou-se um vacuômetro comercial marca ASTA com escala de 0 a 101.325 kPa (760 mmHg);
- b) Pressão no recalque - Essa pressão teve sua medida aferida por intermédio de um manômetro comercial marca ASTA com escala de 0 a 392.266 kPa (4 kgf/cm<sup>2</sup>).
- c) Temperaturas da água e ambiente - Para essas medições foi adquirido um termômetro eletrônico digital comercial marca Minimipa, que opera na faixa de -50 à 1000° C, com resolução de 1° C.
- d) Vazão de água das bombas - Devido à intermitência dos tipos de bombas em estudo não poderá ser usado um rotâmetro, em razão da imprecisão da leitura. A solução encontrada foi construir um instrumento capaz de realizar com precisão a medida desejada (Figura 3.14). Esse é composto de um vaso coletor com sensores de nível alto e baixo. O comando desse instrumento é feito eletronicamente esvaziando o vaso

por meio de uma pequena bomba, quando a água coletada atinge o nível correspondente a um volume previamente determinado.

- e) Vazão de acionamento da roda d'água - A medida em questão é realizada num canal com saída através de um Vertedor Triangular (Figura 3.15 e 3.16) e usando a fórmula de Thompson quando  $\alpha = 90^\circ$  (Equação (3.5)), básica na aferição da vazão em questão. A altura H foi medida com uma régua milimetrada. (Macintyre, 1983)

$$Q = 1,4H^{\frac{5}{2}} \quad (3.5)$$

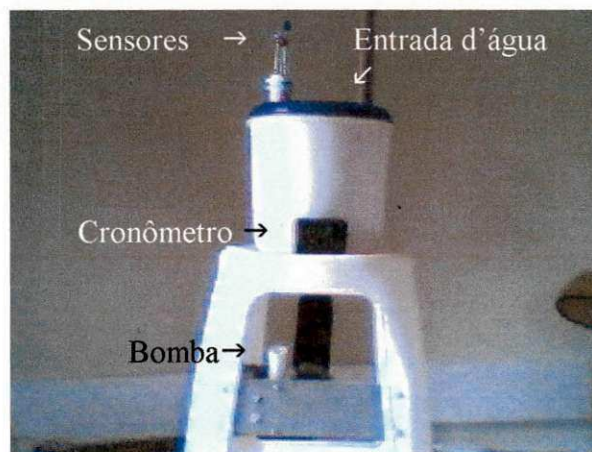


Figura 3.14 - Aspecto do medidor de vazão construído pelo autor para o projeto.

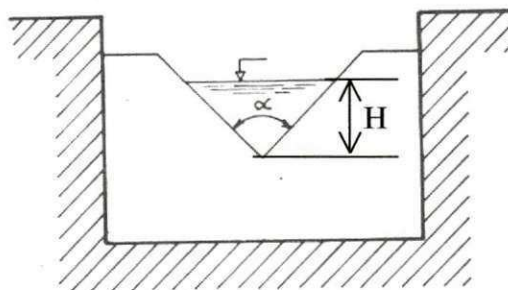


Figura 3.15 - Vista do Vertedor Triangular. Fonte: Macintyre (1983)

- e) Rotação da roda – Mais uma vez surge à necessidade de construção de um equipamento para realizar medidas, dessa vez foi construído um tacômetro usando uma

calculadora comum, fornecendo uma precisão de 0,5 revolução. A calculadora permanece inalterada em suas funções, apenas foi introduzida uma ligação no teclado que foi conectada a um sensor magnético do tipo relé de lâmina ou “Reed-switch”. No eixo da roda, colado em um disco existem dois ímãs que, ao passar em frente ao sensor, acionam um dígito da calculadora. Desta forma acumula-se o número de voltas no tempo, antecipadamente determinado em um temporizador. Terminada a contagem do tempo, o temporizador desliga o sinal do sensor, permanecendo o total de rotações no display da calculadora. A Figura 3.17, ilustra o tacômetro mencionado.

A Figura 3.16, mostra uma fotografia onde se pode observar com detalhes, o canal com o vertedor triangular em funcionamento.

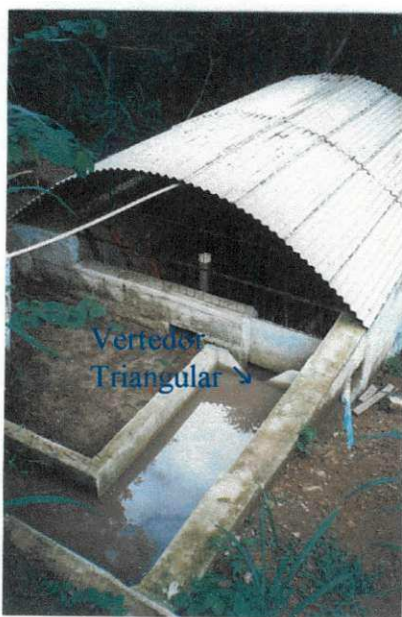


Figura 3.16 - Canal com Vertedor Triangular em funcionamento.

Dentre as máquinas que podem acionar bombas de pistão ou bombas de diafragma encontram-se, as que usam energia convencional ou as que trabalham com energia natural. Normalmente, as que usam energia convencional, trabalham em alta rotação, como é o caso das máquinas elétricas, motores de combustão interna e as máquinas a vapor. Já as máquinas acionadoras que usam energia natural como eólica, força animal e energia proveniente das



quedas d'água, (por exemplo roda d'água conforme ilustrado na Figura 3.18), caracterizam-se pelas baixas rotações e algumas pela intermitência no funcionamento como acontece nos casos das fontes solar e eólica.

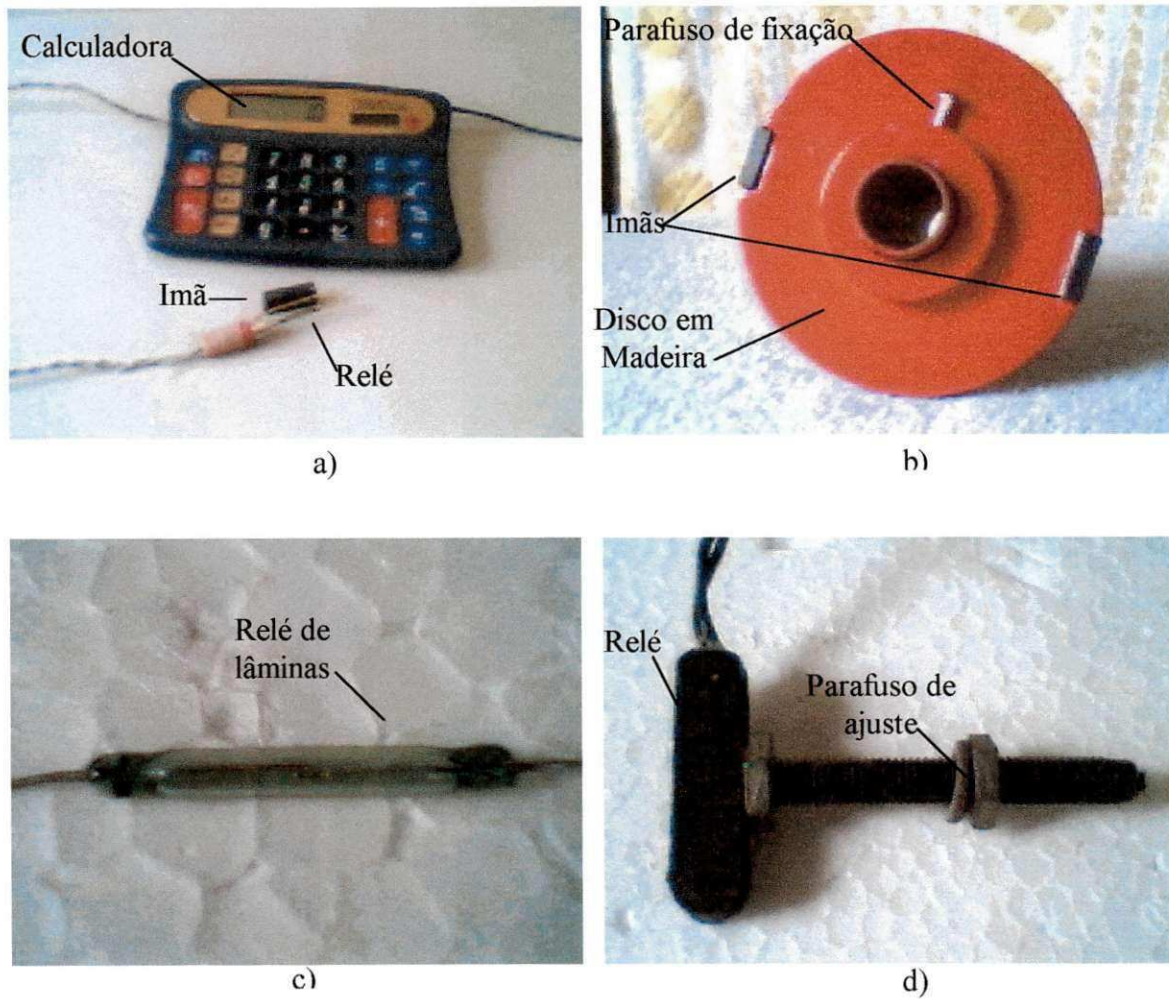


Figura 3.17 - Tacômetro construído pelo autor. a) Calculadora com imã e sensor; b) Disco com imãs; c) Relé de lâminas; d) Relé de lâminas encapsulado.

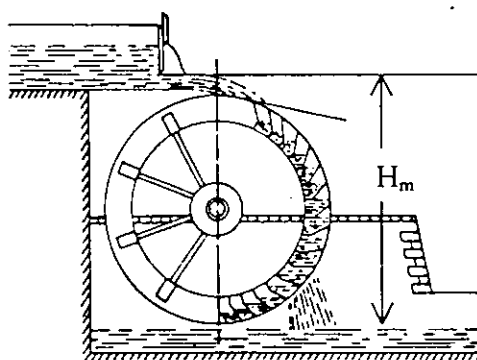


Figura 3.18 - Vista esquemática de uma roda d'água de cima. Fonte: Mialhe (1980)

Uma vez instalados todos equipamentos necessários, começou-se os testes para estudar o desempenho das bombas. Iniciou-se com a bomba de pistão. Preliminarmente foi controlada a vazão de acionamento, pela fixação da altura  $H = 25 \text{ mm}$  no vertedor que, de acordo com a fórmula de Thompson, corresponde uma vazão de  $0,00014 \text{ m}^3/\text{s}$ . Para essa vazão a roda passou a girar com uma velocidade de  $2,5 \text{ rpm}$ . Em seguida mediu-se a pressão manométrica de  $-14 \text{ kPa}$  na admissão da bomba e uma pressão de recalque igual a  $98 \text{ kPa}$ , gerando uma vazão de água na tubulação de  $3,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ . Esse nível de alimentação da roda não é suficiente para um bom desempenho no bombeamento. A roda trabalha com intermitência, sendo assim, esses dados foram desprezados, considerando-se esse ponto como o limite inferior, no funcionamento da roda, para uma altura topográfica de  $10 \text{ m}$ . O conjugado motor responsável pelo movimento dessa máquina é originado exclusivamente pelo peso da água que enche as suas cubas, por essa razão, existe um nível superior de vazão para alimentação que se situa em torno de  $7 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ . Se a vazão da água de acionamento da roda d'água estiver acima de  $7 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  haverá desperdício de água, o que não é interessante nos tempos atuais.

Como o objetivo deste trabalho é o uso de uma bomba de diafragma acionada por energia natural, optou-se por uma roda d'água como máquina motora visto que esta possui maior regularidade no funcionamento e possibilidade de fácil controle na velocidade de funcionamento.

Instaladas as tubulações necessárias e os instrumentos nos pontos de testes, iniciou-se o procedimento experimental para obtenção dos resultados.

Os seguintes procedimentos foram adotados:

- a) Inicialmente foi controlada a vazão de água para acionamento da roda d'água, pela fixação do nível de água no vertedor.
- b) Em seguida mediu-se a rotação da roda d'água.
- c) Posteriormente mediu-se a vazão volumétrica e as pressões da água na entrada e saída da bomba.
- d) Finalmente, mediu-se as temperaturas da água e a ambiente.

As medidas foram repetidas em intervalos regulares de 10 em 10 minutos para valores crescentes de descarga para alimentação da roda d'água. A roda usada neste trabalho é a roda de cima, também denominada motor de gravidade (Figura 3.18). Tendo obtido os resultados experimentais calculou-se as potências de acionamento da roda d'água e das bombas e o trabalho por unidade de massa de cada uma das bombas.

A potência motriz no eixo da roda d'água é dada por (Mialhe, 1980; Macintyre, 1983)

$$\dot{W}_r = \eta \gamma Q H_m \quad (3.6)$$

onde  $\gamma = \rho g$ ,  $\rho = \frac{1}{v}$  e considerou-se  $\eta_r = 0,7$ .

Esta potência compreende a potência fornecida pelo motor ao eixo da bomba.

Assumindo que o processo de bombeamento é permanente, adiabático e reversível, e desprezando-se as variações das energias cinética e potencial, o trabalho por unidade de massa realizado pela bomba pode ser determinado por (Van Wylen et al, 1993):

$$W_b = (P_s - P_c) \left( \frac{v_c + v_s}{2} \right) \quad (3.7)$$

Do resultado observou-se que o trabalho no eixo associado com este tipo de processo está diretamente ligado ao volume específico do fluido durante o processo de bombeamento.



Observe-se que o fluido foi assumido incompressível. Isto é bastante aceitável tendo em vista o processo de bombeamento ser realizado em temperaturas suficientemente baixas. Vale salientar que quando a compressibilidade torna-se significativa devem ser utilizados as propriedades da água líquida comprimida. A Equação (3.7) também é válida para processos isotérmicos e reversíveis.

A potência necessária para bombear o fluido é obtida por:

$$\dot{W}_b = q(P_s - P_e) \quad (3.8)$$

As propriedades termodinâmicas da água nas diversas condições de trabalho foram obtidas utilizando-se o programa computacional CATT.

A eficiência total roda d'água-bomba do sistema é dada por:

$$\eta_{br} = \frac{\dot{W}_b}{\dot{W}_r} \quad (3.9)$$

A Figura 3.19 ilustra um esquema representativo do sistema de bombeamento discutido neste trabalho.

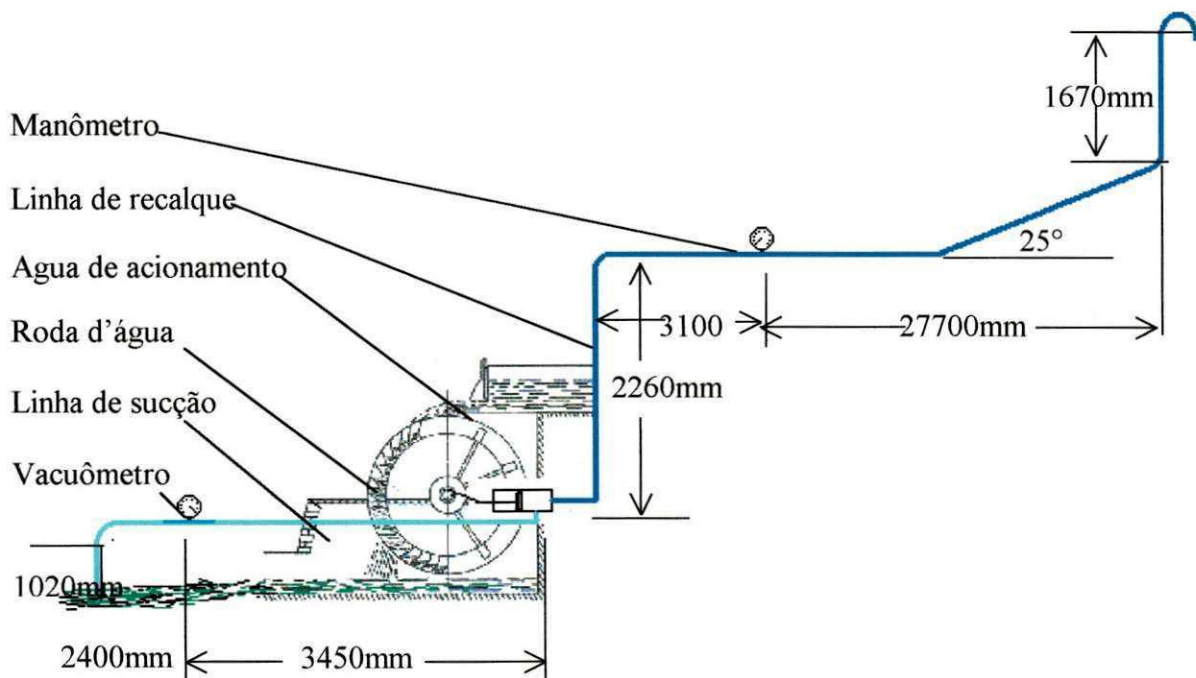


Figura 3.19 – Esquema representativo do sistema de bombeamento.

As Figuras 3.20 – 3.26 ilustram detalhes do sistema operacional utilizado. Vale salientar que, devido a dificuldade de incorporação do manômetro na tubulação de recalque e para evitar erros de medição, o mesmo foi acoplado a 2,26 m da saída da bomba. Devido a isto, os valores de pressão constantes nas tabelas reportadas nos Anexos A e B referem-se aos valores das pressões lidas no manômetro adicionadas 19.61 kPa que corresponde aproximadamente a perda de carga da saída da bomba até o manômetro.

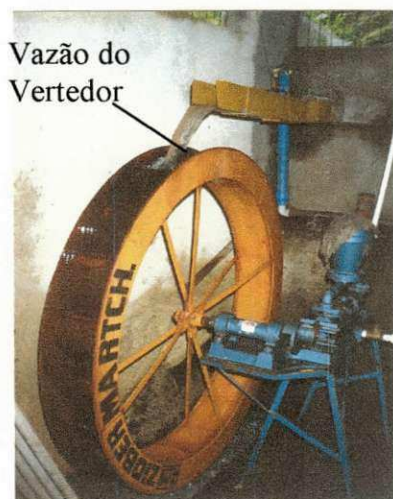


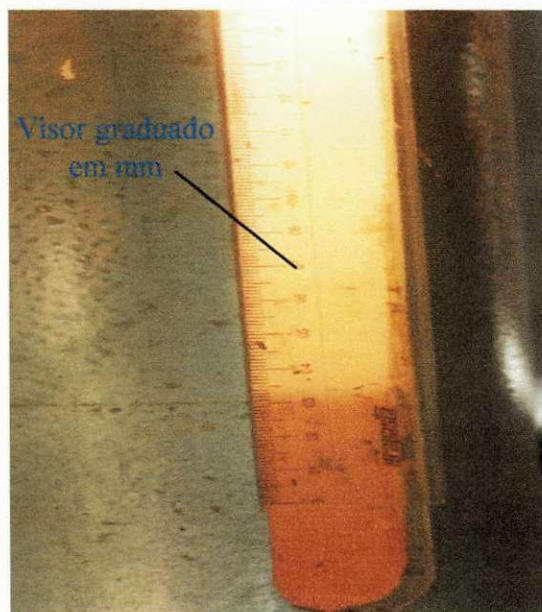
Figura 3.20 - Roda d'água em funcionamento.



Figura 3.21 – Vista lateral do vertedor.



a)



b)

Figura 3.22 - Sistema de controle da vazão. a) Vista geral b) Visor de controle ampliado.



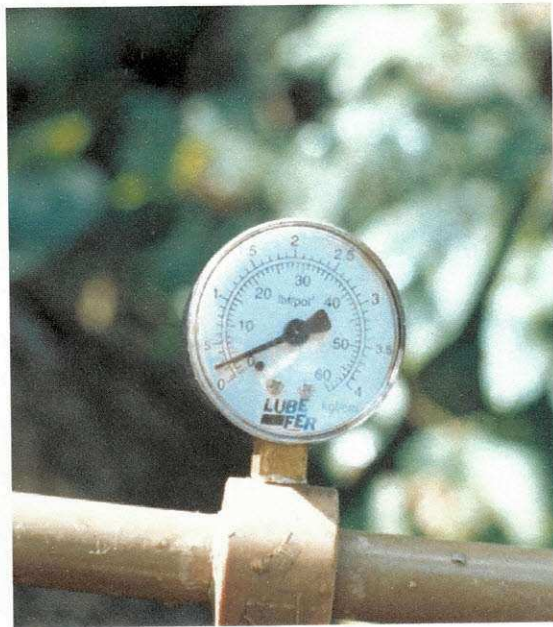
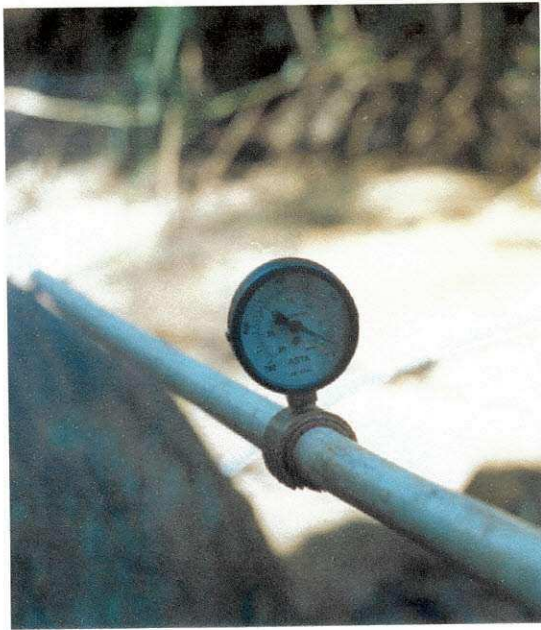
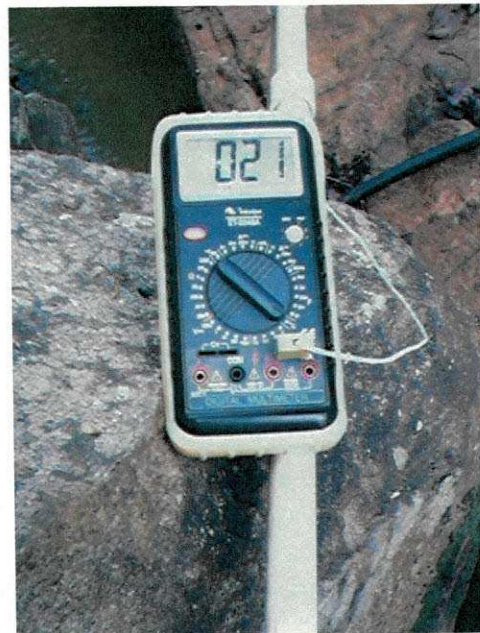
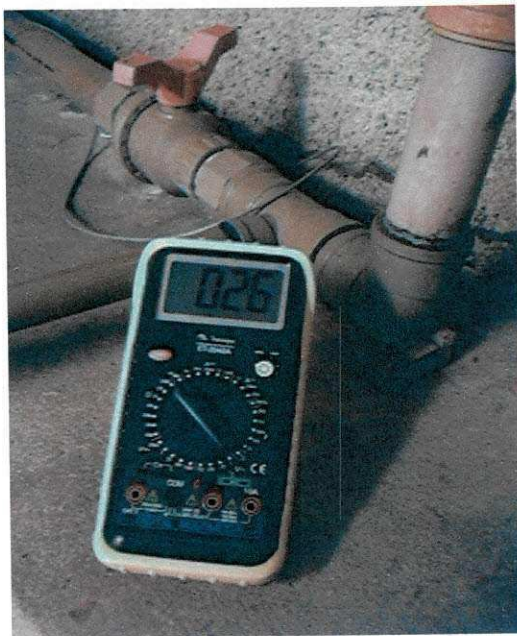


Figura 3.23 – Medidores de pressão. a) Vacuômetro na admissão. b) Manômetro no recalque.



a)

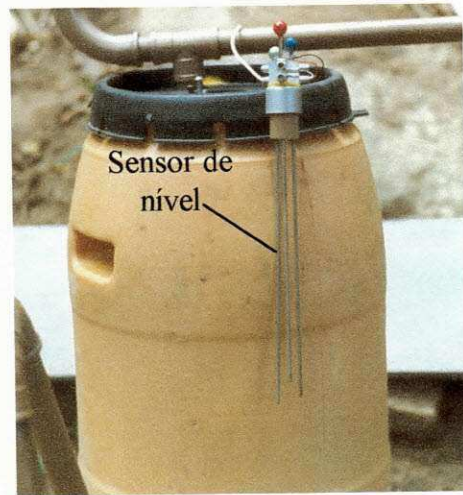
b)

Figura 3.24 – Medidor de temperatura. a) Temperatura ambiente. b) Temperatura da água.





a)



b)

Figura 3.25 – Sistema de medição da água bombeada. a) Vista geral b) Detalhe do sensor da vazão.

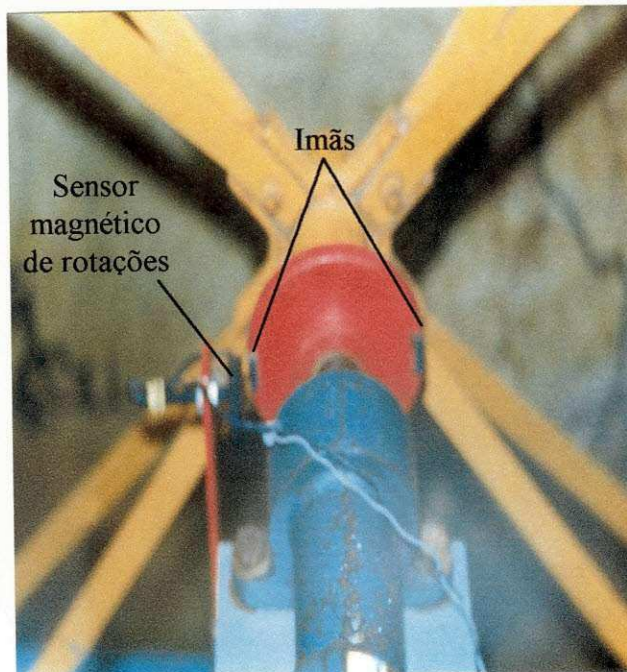
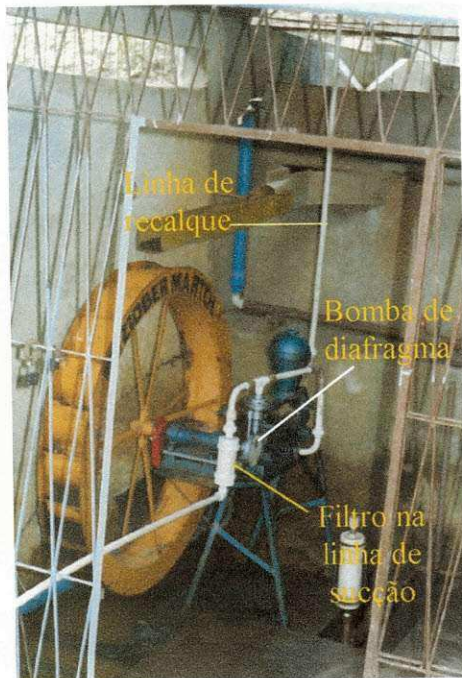


Figura 3.26 – Bomba de diafragma em funcionamento. a) Vista geral da roda d'água e os principais componentes. b) Detalhe do sensor de rotações.

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

A operação de bombeamento consiste em fornecer energia ao fluido para que possa executar o trabalho necessário para vencer todas as resistências que se apresentem no seu processo.

A Tabela 4.1 apresenta os valores das alturas do nível d'água no vertedor, vazão de alimentação e rotação da roda d'água, pressão de entrada e saída da bomba de pistão, bem como as temperaturas da água e a do ambiente. Estes resultados correspondem aos valores médios obtidos a partir dos dados experimentais e que constam nas tabelas contidas no Anexo A, Tabelas A1.1 à A1.3. Para estes experimentos utilizou-se uma altura topográfica de recalque de aproximadamente 10 m.

Da análise da tabela verifica-se que quanto maior a altura do nível de água no vertedor maior a vazão da água fornecida pela bomba de pistão, como esperado.

Tabela 4.1 - Valores médios obtidos durante o funcionamento da roda d'água com a bomba de pistão.

Testes	$H_m$ (m)	$Q \times 10^3$ (m <sup>3</sup> /s)	N (rpm)	$P_b$ (kPa)				T		$q \times 10^3$ (m <sup>3</sup> /s)
				Man		Abs		(°C)		
				Ent	Saída	Ent	Saída	Amb	Água	
1	1,770	0,45	6,8	-13,599	117,68	87,701	218,980	21,4	21,3	0,017
2	1,785	0,99	14	-14,665	117,68	86,635	218,980	21,5	22,0	0,052
3	1,800	1,81	25	-14,665	117,68	86,635	218,980	21,0	22,3	0,102

A Tabela 4.2 apresenta as propriedades termodinâmicas da água de bombeamento para cada teste experimental contido na Tabela 4.1. Estes resultados foram obtidos supondo um processo isotérmico. Da análise da tabela verifica-se que o processo de bombeamento d'água realizado ocorre a entropia e volume específico praticamente constantes, implicando assim, num processo isotérmico, incompressível e aproximadamente reversível.

Tabela 4.2 - Propriedades termodinâmica da água para cada experimento.

Testes	$u_c$ (kJ/kg)	$h_c$ (kJ/kg)	$s_c$ (kJ/kg.K)	$v_c$ (m <sup>3</sup> /kg)	$u_s$ (kJ/kg)	$h_s$ (kJ/kg)	$s_s$ (kJ/kg.K)	$v_s$ (m <sup>3</sup> /kg)
1	89,38	89,46	0,3151	0,001002	89,37	89,59	0,3150	0,001002
2	92,31	92,39	0,3250	0,001002	92,30	92,52	0,3250	0,001002
3	93,56	93,66	0,3293	0,001002	93,55	93,77	0,3292	0,001002

A Tabela 4.3 mostra os dados de desempenho da bomba de pistão para cada condição de operação. Calculada a partir das Equações (3.6 – 3.9) e referente aos dados constantes nas Tabelas (4.1) e (4.2).

Observa-se que quanto maior a vazão de alimentação maior a potência fornecida pela roda d' água. Como consequência, maior a potência absorvida pela bomba de pistão para realizar o processo.

Tabela 4.3 - Dados de desempenho da bomba de pistão.

Testes	$\dot{W}_r$ (W)	$W_b$ (J/kg)	$h_s - h_c$ (J/kg)	$\dot{W}_b$ (W)	$\eta_{br}$ (%)
1	5,453	131,541	130,00	2,232	40,93
2	12,098	132,609	130,00	6,882	56,88
3	22,305	132,609	110,00	13,499	60,52

Verifica-se ainda que a eficiência do sistema roda d' água-bomba de pistão aumenta com o acréscimo da vazão de água na bomba. Quando a vazão de água na bomba de pistão utilizada é triplicada a eficiência do sistema aumenta em torno de 38,9%. Esta eficiência inclui os rendimentos hidráulico, volumétrico e mecânico da bomba, além das perdas na transmissão de energia da roda d' água para bomba. De acordo com Macintyre (1983), o rendimento total pode ser inferior a 40% nas bombas pequenas até ultrapassar os 85% nas bombas centrífugas.

A eficiência mecânica determina que parte do trabalho fornecido é convertido em trabalho útil, que pode ser obtido diretamente no eixo do equipamento. Então esta eficiência leva em conta todas as perdas mecânicas causadas por fricção e resistência no equipamento tais como fricção entre o pistão e as paredes do cilindro e o suporte do eixo, assim como as perdas relacionadas com o acionamento da bomba, compressão e outras unidades auxiliares requeridas para operação das máquinas. Já o rendimento hidráulico se refere às perdas de carga no interior da bomba, devido o acabamento interno e restrições de ar (quando for o caso).

O rendimento volumétrico por sua vez, decorre das perdas por vazamento interno do sistema da bomba e devido à recirculação de água, a depender do tipo de bomba.

Na Tabela 4.3, observa-se que existe uma pequena diferença entre as entalpias da água nas entrada e saída e o trabalho específico na bomba. Esta diferença pode ser atribuída ao aquecimento da água durante o processo de compressão no interior da bomba, bem como a variação de velocidade do fluido ao passar pela bomba e até mesmo erros na medição das pressões de entrada e saída da água na bomba.

A Tabela 4.4 mostra os valores médios dos resultados reportados no Anexo B, nas Tabelas B.1.1 à B.1.6. Estes resultados representam a variação de altura do nível d'água no vertedor, vazão de alimentação e os valores de rotação que a roda d'água atinge durante a seqüência de testes, pressões de entrada e saída na bomba de diafragma, temperaturas ambiente e da água, bem como a vazão fornecida pela bomba de diafragma. Estes dados foram obtidos utilizando-se uma altura topográfica de aproximadamente 10 m.

Da análise da Tabela 4.4 verifica-se que há inicialmente um aumento da vazão na bomba em função do aumento da vazão do vertedor, em seguida a vazão da bomba permanece constante e finalmente decresce, isto é esperado visto que com o aumento da velocidade da roda d'água o seguidor não trabalha mais em sua amplitude total. Em conseqüência tem-se uma redução no deslocamento do diafragma. Como a vazão é função da amplitude desse deslocamento justifica-se a redução da vazão na bomba. Este comportamento é bem diferente daquele apresentado pela bomba de pistão. Verifica-se que para um  $H_m$  a rotação  $N$  na roda é maior na bomba de diafragma que na bomba de pistão. Isto é explicado da seguinte maneira:

Tratando-se de uma roda de cima, quando a velocidade angular diminui, devido ao aumento da resistência útil, o momento motor aumenta numa proporção que pode atingir até 1:3 com relação ao momento resistivo. (Macintyre et al., 1969). Isto justifica-se devido ao fato de que, em velocidades mais baixas, as cubas enchem-se mais, aumentando o momento motor em relação ao eixo, devido ao peso da água contida nas cubas da roda.



A Tabela 4.5 mostra as propriedades termodinâmicas da água em cada teste experimental, referentes aos dados constantes na Tabela 4.4.

Da análise verifica-se que o processo de bombeamento realizado ocorre da mesma maneira que na bomba de pistão (Tabela 4.2), isto é, a entropia e o volume praticamente permanecem constantes. A consideração de ser o processo de bombeamento isotérmico, incompressível e aproximadamente reversível, é perfeitamente aceitável. (Van Wylen, et al, 1993)

Tabela 4.4 - Valores médios obtidos durante o funcionamento da roda d'água com a bomba de diafragma.

Testes	H <sub>m</sub> (m)	Q x10 <sup>3</sup> (m <sup>3</sup> /s)	N (rpm)	P <sub>b</sub> ( kPa)				T (°C)		q x10 <sup>3</sup> ( m <sup>3</sup> /s)
				Man		Abs		Amb	Água	
				Ent	Saída	Ent	Saída			
1	1.780	0.78	16.50	-5.33	130.43	95.97	231.73	23.10	22.75	0,020
2	1.785	0.99	21.50	-5.33	130.43	95.97	231.73	25.10	23,4	0,022
3	1.790	1.23	25,85	-5.33	130.43	95.97	231.73	25.60	24,95	0,027
4	1.795	1.51	31,00	-5.33	130.43	95.97	231.73	25.67	25,00	0,027
5	1.800	1.81	33,47	-5.33	130.43	95.97	231.73	25,17	24,35	0,026

Tabela 4.5 - Ppropriedades termodinâmicas da água para cada experimento da bomba de Diafragma.

Testes	u <sub>c</sub> (kJ/kg)	h <sub>c</sub> (kJ/kg)	s <sub>c</sub> (kJ/kg.K)	v <sub>c</sub> (m <sup>3</sup> /kg)	u <sub>s</sub> (kJ/kg)	h <sub>s</sub> (kJ/kg)	s <sub>s</sub> (kJ/kg.K)	v <sub>s</sub> (m <sup>3</sup> /kg)
1	95,44	95,54	0,3356	0,0010023	95,43	95,67	0,3356	0,0010023
2	98,16	98,26	0,3448	0,0010025	98,15	98,39	0,3448	0,0010024
3	104,65	104,74	0,3666	0,0010029	104,64	104,87	0,3666	0,0010028
4	104,86	104,95	0,3673	0,0010029	104,85	105,08	0,3673	0,0010028
5	102,14	102,23	0,3582	0,0010027	102,13	102,36	0,3582	0,0010027

Tabela 4.6 Dados de desempenho da bomba de diafragma

Testes	$W_r$ (W)	$W_b$ (J/kg)	$h_s - h_c$ (J/kg)	$\dot{W}_b$ (W)	$\eta_{br}$ (%)
1	9,502	136,045	130,00	2,715	28,56
2	12,098	136,072	130,00	2,986	24,687
3	15,061	136,140	130,00	3,665	24,337
4	18,542	136,140	130,00	3,665	19,769
5	22,290	136,126	130,00	3,530	15,836

A Tabela 4.6 mostra os dados de desempenho da bomba de diafragma em operação, referente aos resultados reportados na Tabela 4.5. Observando-se os testes 2 e 3 da Tabela 4.3 correspondente a bomba de pistão, nota-se o crescimento do rendimento, enquanto que na Tabela 4.6, para as mesmas condições, o rendimento da bomba de diafragma permanece constante com tendência de redução.

Visando uma melhor avaliação da bomba de diafragma optou-se pela realização de novos testes envolvendo um maior número de experimentos, para proporcionar uma análise mais adequada da tendência operacional do conjunto de bombeamento. Definiu-se uma altura topográfica de aproximadamente 5m, tendo em vista a maior velocidade e precisão na aquisição dos dados. A Tabela 4.7 apresenta dados das mesmas variáveis reportadas na Tabela 4.4 com as novas condições operacionais.

Os valores médios obtidos e expressos na Tabela 4.7 correspondem a variação da altura do nível d'água no vertedor de 35 a 95 mm. Observa-se um crescimento da vazão na bomba de diafragma com relação ao aumento no nível da água do vertedor, e conseqüentemente, um aumento da rotação na roda d'água.

Os testes 6 e 7, apresentam uma redução na vazão da bomba de diafragma. Isso foi observado no campo de testes, quando houve dois rápidos cortes no fluxo da água recalçada pela bomba. Este é um problema típico de falha de uma das válvulas, seja a de admissão ou a de recalque. Nos teste, 10 ao 13 houve uma redução na vazão da bomba de diafragma, e essa

redução, com tendência a uma vazão menor e constante. O motivo da diminuição no fluxo está ligado ao não acompanhamento da came pelo seguidor. Com o crescimento da velocidade angular da came, o seguidor não baixa no início do dente da catraca e sim aproximadamente na metade do curso deste, o que causa uma amplitude de 2 mm e que na realidade deveria ser igual a 4 mm. Este deslocamento reduzido é diretamente refletido na amplitude  $C_d$  que é igual ao deslocamento do diafragma (Figura 3.12). Contribui também para redução no fluxo de saída da bomba a elasticidade do diafragma, que, dependendo do material, pode crescer com o aumento da pressão sobre ele, sendo que isso ocorre mais acentuadamente com o maior nível de recalque.

As Figuras 4.1 a-b ilustram a forma natural que o diafragma assume devido a pressão da mola (Figura 3.12), somada a essa modificação encontra-se a deformação dinâmica devido a elasticidade do material que compõe o diafragma. Depois de realizados os testes de funcionamento para a altura de 10m, a bomba de diafragma foi desmontada para observação de desgaste e provável deformação no diafragma. A deformação observada foi de 1mm, medida com um paquímetro

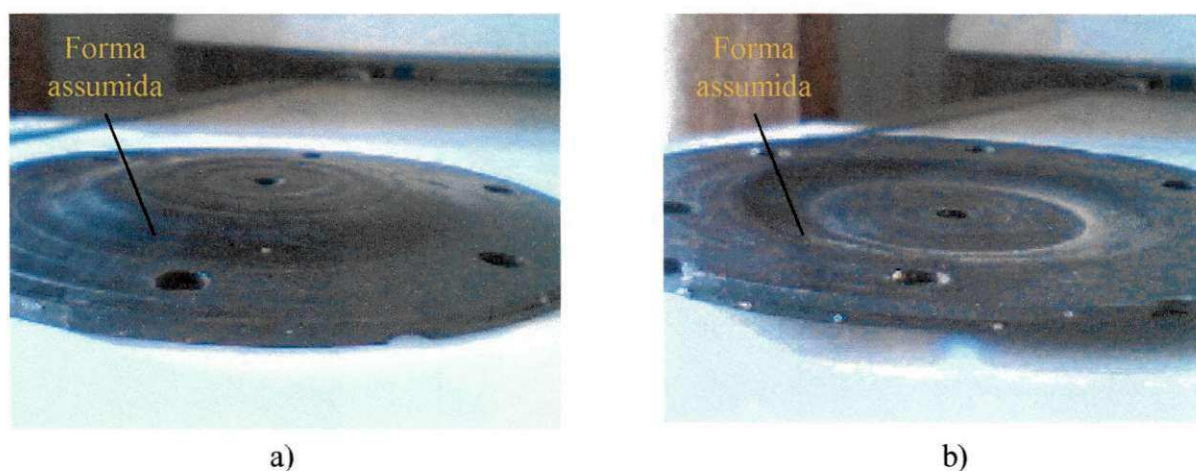


Figura 4.1 - Forma assumida pelo diafragma quando submetido à pressão.

a) Vista inferior. b) Vista superior.

Tabela 4.7 - Valores médios obtidos durante o funcionamento da roda d'água com a bomba de diafragma.

Testes	H <sub>m</sub> (m)	Q x10 <sup>3</sup> (m <sup>3</sup> /s)	N (rpm)	P <sub>b</sub> (kPa)				T (°C)		q x10 <sup>3</sup> (m <sup>3</sup> /s)
				Man		Abs		Amb	Água	
				Ent	Saída	Ent	Saída			
1	1,765	0,321	9,50	-6,666	49,033	94,634	195,934	23,00	23,00	0,0143
2	1,770	0,448	13,17	-6,666	49,033	94,634	195,934	24,30	23,50	0,0225
3	1,775	0,601	17,82	-6,666	49,033	94,634	195,934	25,00	24,50	0,0330
4	1,780	0,783	25,50	-6,666	49,033	94,634	195,934	26,00	24,70	0,0379
5	1,785	0,993	26,80	-6,666	49,033	94,634	195,934	25,00	24,00	0,0454
6	1,790	1,235	32,80	-6,666	49,033	94,634	195,934	25,00	24,00	0,0428
7	1,795	1,508	36,00	-6,666	49,033	94,634	195,934	25,00	24,50	0,0419
8	1,800	1,815	38,65	-6,666	49,033	94,634	195,934	25,00	25,00	0,0436
9	1,805	2,157	39,00	-6,666	49,033	94,634	195,934	25,00	25,00	0,0454
10	1,810	2,534	41,00	-6,666	49,033	94,634	195,934	25,00	24,20	0,0469
11	1,815	2,949	41,32	-6,666	49,033	94,634	195,934	24,30	24,00	0,0461
12	1,820	3,402	41,50	-6,666	49,033	94,634	195,934	24,00	24,00	0,0458
13	1,825	3,894	41,50	-6,666	49,033	94,634	195,934	24,00	24,00	0,0450

Com relação a uma comparação dos resultados da vazão que constam nas tabelas 4.4 e 4.7, verifica-se um considerável aumento nesta grandeza, simplesmente pela diminuição da altura de recalque de 10 para 5 m.

Tabela 4.8 - Propriedades termodinâmicas da água para cada experimento.

Testes	$u_c$ (kJ/kg)	$h_c$ (kJ/kg)	$s_c$ (kJ/kg.K)	$v_c$ (m <sup>3</sup> /kg)	$u_s$ (kJ/kg)	$h_s$ (kJ/kg)	$s_s$ (kJ/kg.K)	$v_s$ (m <sup>3</sup> /kg)
1	96,49	96,58	0,3392	0,0010024	96,48	96,68	0,3391	0,0010023
2	98,58	98,68	0,3462	0,0010025	98,57	98,77	0,3462	0,0010025
3	102,76	102,86	0,3603	0,0010028	102,76	102,95	0,3603	0,0010027
4	103,60	103,70	0,3631	0,0010028	103,59	103,79	0,3631	0,0010028
5	100,67	100,77	0,3533	0,0010026	100,67	100,86	0,3532	0,0010026
6	100,67	100,77	0,3533	0,0010026	100,67	100,86	0,3532	0,0010026
7	102,76	102,86	0,3603	0,0010028	102,76	102,95	0,3603	0,0010027
8	104,86	104,95	0,3673	0,0010029	104,85	105,04	0,3673	0,0010028
9	104,86	104,95	0,3673	0,0010029	104,85	105,04	0,3673	0,0010028
10	101,51	101,60	0,3561	0,0010027	101,50	101,70	0,3561	0,0010026
11	100,67	100,77	0,3533	0,0010026	100,67	100,86	0,3532	0,0010026
12	100,67	100,77	0,3533	0,0010026	100,67	100,86	0,3532	0,0010026
13	100,67	100,77	0,3533	0,0010026	100,67	100,86	0,3532	0,0010026

A Tabela 4.8 relaciona as propriedades termodinâmicas da água de bombeamento, que como esperado não varia muito em relação aos dados apresentados na Tabela 4.2 e Tabela 4.5, quando foram realizados os testes na bomba de pistão e bomba de diafragma, para uma altura de recalque de aproximadamente 10 m.

Tabela 4.9 - Dados de desempenho da bomba de diafragma.

Testes	$\dot{W}_r$ (W)	$W_b$ (J/kg)	$h_s - h_c$ (J/kg)	$\dot{W}_b$ (W)	$\eta_{br}$ (%)
1	3,877	101,538	100,00	1,448	37,36
2	5,426	101,553	90,00	2,279	42,00
3	7,298	101,578	90,00	3,343	45,81
4	9,534	101,583	90,00	3,839	40,26
5	12,125	101,563	90,00	4,599	37,93
6	15,126	101,563	90,00	4,336	28,66
7	18,517	101,578	90,00	4,244	22,92
8	22,349	101,588	90,00	4,416	19,76
9	26,634	101,588	90,00	4,599	17,26
10	31,375	101,568	100,00	4,750	15,142
11	36,622	101,563	90,00	4,670	12,75
12	42,364	101,563	90,00	4,639	10,95
13	48,624	101,563	90,00	4,558	9,37

A Tabela 4.9 mostra o desempenho da bomba de diafragma recalçando água para uma altura topográfica de aproximadamente 5 m. Analisando esta tabela, verifica-se que, para velocidades mais baixas a medida que  $\dot{W}_r$  cresce, o rendimento também cresce. No entanto, a partir do teste 3 o rendimento diminui com o aumento da velocidade mesmo que o aumento da potência de acionamento da roda d'água seja visível.

Diante ao exposto, pode-se concluir que para melhorar o rendimento da bomba de diafragma, torna-se necessário aumentar a resistência útil, ou seja, adicionar mais bombas ao eixo da roda.

No que diz respeito ao comportamento do rendimento total em função da potência no eixo da bomba, verifica-se que após a comparação entre as Tabelas 4.6 e 4.9 houve um considerável aumento nesta variável, no entanto, seu comportamento decrescente permaneceu.

As Figuras 4.2 a 4.4 ilustram os resultados das potências das bombas em função da vazão volumétrica para todos os experimentos com as bombas de diafragma e de pistão.

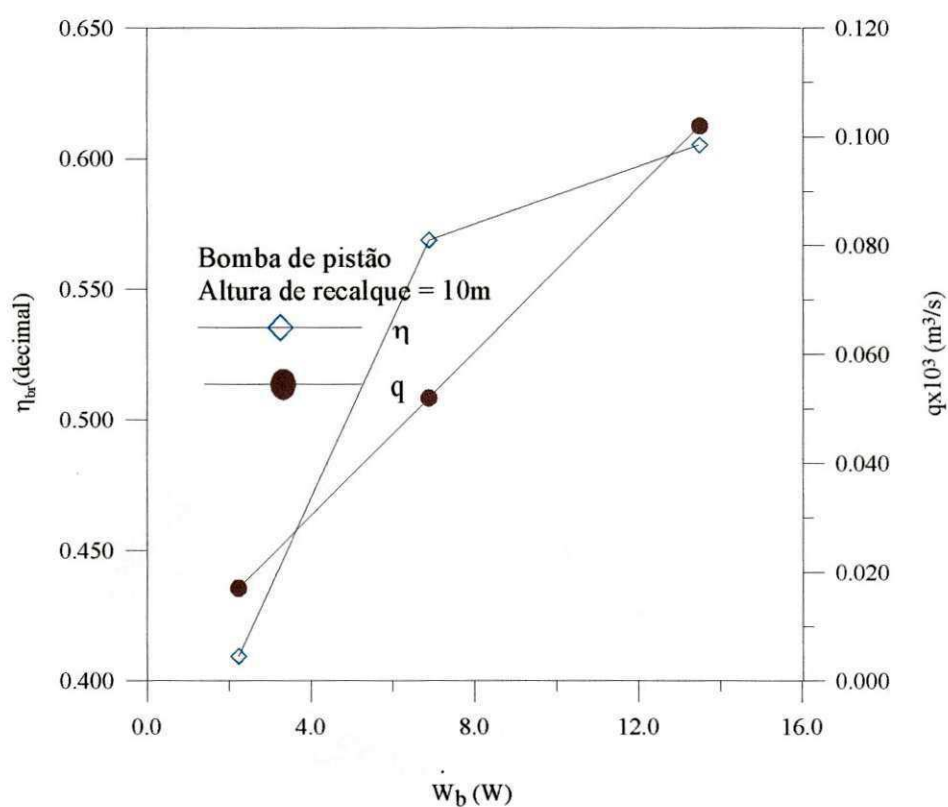


Figura 4.2 – Rendimento total e vazão de água bombeada em função da potência no eixo da bomba de pistão. Altura de recalque = 10m

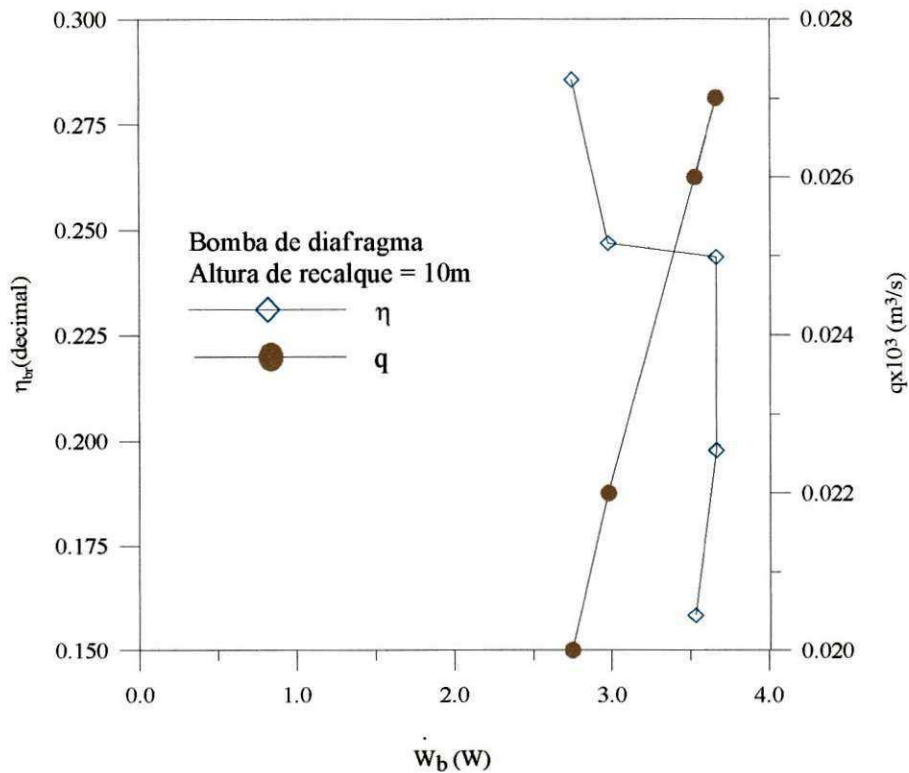


Figura 4.3 - Rendimento total e vazão de água bombeada em função da potência no eixo da bomba de diafragma. Altura de recalque = 10m

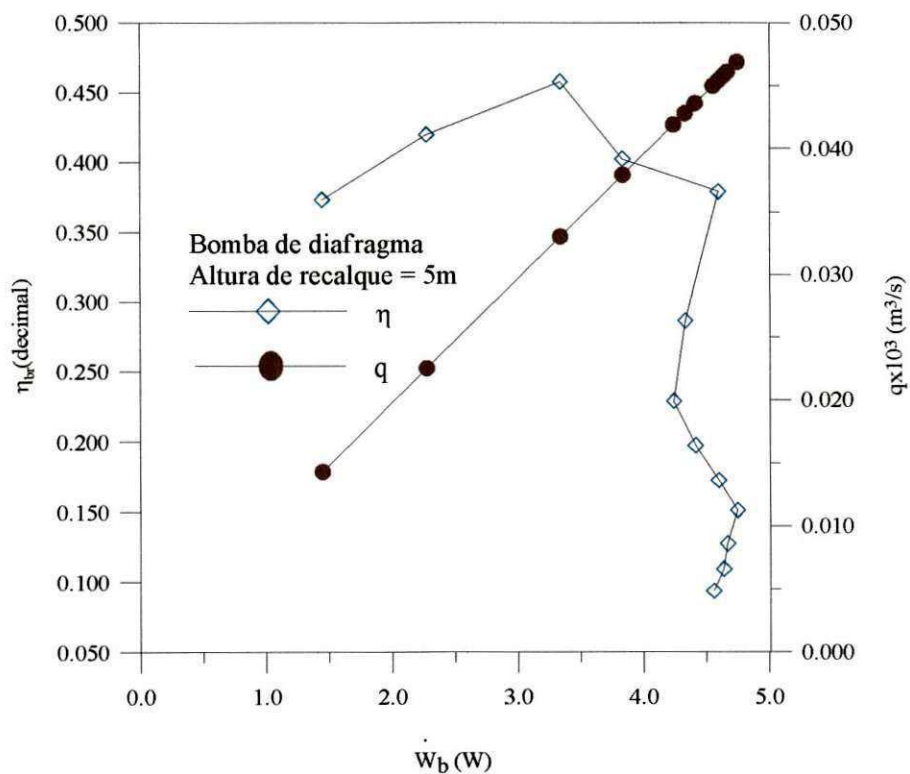


Figura 4.4 – Rendimento total e vazão de água bombeada em função da potência no eixo da bomba de diafragma. Altura de recalque = 5m



#### □ Considerações para otimização do projeto da bomba de diafragma

A bomba de diafragma e o mecanismo transformador funcionam bem. O maior problema apresentado e que é o ponto crítico, está nas válvulas de admissão e recalque que não responderam bem ao pequeno volume, proporcionado pelo deslocamento do diafragma.

Uma falha em qualquer uma das válvulas faz com que a bomba não faça o vácuo necessário ao auto-escorvamento, impedindo a realização do recalque. A troca das válvulas pode corrigir este defeito na bomba construída. Na falta do vácuo, a bomba respondeu ao recalque muito bem quando trabalha afogada, isto é, com a água ao nível da câmara molhada ou superior a esta. Com a troca das válvulas o problema de vedação foi solucionado e o vácuo necessário ao bombeamento foi realizado. No entanto, pesquisas para melhoramento neste sentido devem ser conduzidas.

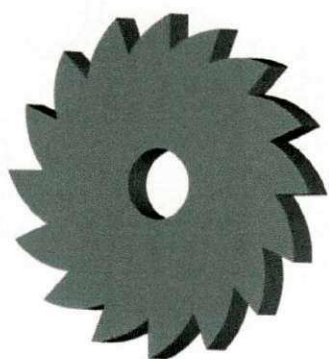
O segundo defeito, menos crítico que o primeiro, refere-se a elasticidade do diafragma que apresenta deformação depois de ser submetido a uma pressão contínua de 98.06 kPa. Esta deformação provoca uma diminuição no volume bombeado, diminuindo a eficiência da bomba. Este defeito pode ser facilmente corrigido reduzindo a área sujeita a deformação com o aumento do diâmetro das arruelas. Isto torna a área total mais rígida, oferecendo em contrapartida maior resistência ao deslocamento, exigindo mais energia por parte da máquina acionadora.

Outra maneira de melhorar a eficiência da bomba em estudo é manter a mesma área de elasticidade do diafragma e aumentar a amplitude de deslocamento do mesmo. Como sugestão pode ser usada uma came como as apresentadas na Figura 4.5, que possivelmente solucionará o problema observado nas velocidades maiores, quando a amplitude cai de 4 mm para aproximadamente 2 mm.

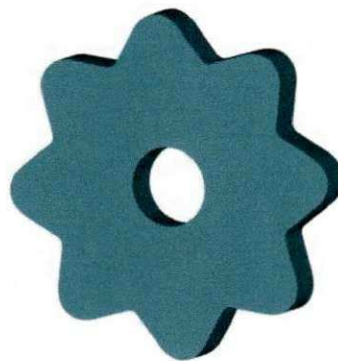
Um outro ponto observado foi o leve desgaste do seguidor, já esperado. Não constitui propriamente um defeito, pois o mecanismo não foi construído dentro das especificações

técnicas de materiais apropriados para o seguidor. Neste caso, este deverá ser construído de material mais resistente ao desgaste.

Vale salientar que a estrutura que sustenta a bomba e o conjunto do seguidor apresentou oscilações necessitando um reforço ou um novo projeto estrutural.



a)



b)

Figura 4.5 - Cames a) Dentes aproximadamente parabólicos. b) Dentes aproximadamente senoidais.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

#### **5.1 Conclusões**

Dos resultados obtidos com esta pesquisa pode-se observar que:

- A vazão de água fornecida pela bomba de pistão aumenta com o aumento da potência no eixo da roda d'água, comportamento não verificado na bomba de diafragma;
- Para vazões fixas de alimentação da roda d'água, o rendimento da bomba de pistão foi muito superior ao apresentado pela bomba de diafragma;
- O rendimento da bomba de diafragma aumentou com o decréscimo da altura de recalque, no entanto, em alguns casos, ainda inferior aqueles apresentados pela bomba de pistão.
- A bomba de diafragma e o mecanismo transformador funcionaram bem, no entanto as válvulas de recalque e admissão necessitam de melhoramentos.

## 5.2 Sugestões para futuros trabalhos

Como sugestões para trabalhos futuros em bombas de diafragma, sugere-se:

- Desenvolvimento de válvulas de hermeticidade perfeita e rápida resposta aos pequenos deslocamentos, a fim de aumentar o volume de bombeamento.
- Construir e estudar uma nova catraca, com dentes obedecendo à forma parabólica ou senoidal e com altura maior que 5mm.
- Modelamento matemático e simulação para estudar os comportamentos do diafragma e do mecanismo conversor de rotações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALL-FLO PUMP CO. Double-Diaphragm Pumps. **Developments**. Jul. 1999.

ALL-FLO PUMP COMPANY INC. Interchangeability Among Diaphragm Pumps. **World Pumps** Jun. 2000.

ALFA LAVAL, Understanding and selecting air operated diaphragm pumps. **World Pumps** Nov. 1999.

BAZZO, E; PASSOS, J.C; COLLE, S. Comportamento Térmico de Bombas Capilares de Ranhuras Circunferenciais In: (VI ENCIT/ VI LACTYM), 11, 1996 Florianópolis, SC

BLACK, P. O. **Bombas**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1979 439p.

BLACKMER. Pump Eliminates Seals, Magnets and Cuts Costs. **World Pumps** Jun. 2000.

BORGES, E.M; BRAZ FILHO, F.A; NETO, F.S; GUIMARÃES, L.N.F. Programa de Projeto e Avaliação de Desempenho de Bombas Eletromagnéticas de Corrente Contínua (CONEM) 2000 São José dos Campos, SP.

BORGES, E.M; NETO, F.S; BRAZ FILHO, F. A. Avaliação de desempenho da bomba Eletromagnética de Corrente Contínua no Controle de Vazão de Mercúrio VII ENCIT Rio de Janeiro, RJ Nov. 1998.

BORGES, E.M; NETO, F.S; PÁSSARO, A; BRAZ FILHO, F..A. Bomba Eletromagnética de Corrente Contínua com Imãs de Terras Raras para o Controle de Escoamento de Metais Líquidos (VI ENCIT / LATCYM) Florianópolis, SC Nov., 1996.

BOWAN, G.J, Specifying air-operated double-diaphragm pumps. *World Pumps*. Jan. 1997.

CHARLES AUSTEN PUMPS LTD. Rotary Diaphragm Pump *World Pumps* Fev. 2000.

CHARLES AUSTEN PUMPS LTD. Self-priming Rotary Diaphragm Pump. *World Pumps* Jun. 2000.

DAKER, A. A Água na Agricultura. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1983. Vol I p. 316.

DAKER, A. Captação, Elevação e Melhoramento da Água. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1983. Vol II p. 408.

DELMEÉ, G.J. *Manual de Medição de Vazão*. São Paulo: Edgard Blücher Ltda 1983, p.483.

ECKLE, F J; BICKERT, P; LACHENMANN, R; WORTMANN, B. Pumping speed of diaphragm pumps for various gases. *Vacuum* v. 47, n. 6-8, p. 799 – 801, 1966.

ECKLE, F J; BICKERT, P; LACHENMANN. Rotary vane and roots pumps backed by diaphragm pumps – progress in corrosive applications and clean vacuum requirements *Vacuum* v. 46 n. 8-10, p. 793 – 796, 1995.

HICKS, T.G. **Bombas su Selecion y Aplicación**. México: Compañía Editora Continental S.A. p. 530.

HICKS, T.G.; EDWARDS, T.W. **Pump Application Engineering**, New York: McGraw-Hill Book Company, 1971, p. 435 p. 31-38; 47-62.

LEWA HERBERT OTT GMBH CO. **Process Diaphragm pumps in More Compact Form World Pumps**. Set. 2000.

LIEBENBERG, R; ENSLIN J. H. R; VAN DER MERWE. High efficiency, long-life actuator for PV water pumping applications. **Renewable Energy**. v. 6, n. 8, p. 1029-1032, Mar. 1995.

MACINTYRE, A. J. **Máquinas Hidráulicas**. Rio de Janeiro: Escola de Engenharia UFE 1969, 300p.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois 1982, 667p.

MACINTYRE, A. J. **Máquinas Motrizes Hidráulicas**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois 1983, 643p.

MARQUES I. N. **Termodinâmica Técnica**. Rio de Janeiro: Editora Científica 1969, 438p.

MIALHE, L.G. **Máquinas Motoras na Agricultura**. São Paulo: EDUSP, 1980, 289p

O LIVRO DO AUTOMÓVEL, **Seleções do Readers Digest**. Lisboa, 1976. p. 379.

OLSSON, A; STEMME, G; STEMME, E. A valve-less planar pump with two pump chambers. **Sensors and Actuators A**. n. 46-47, p. 549-556, 1995.

PROVENZA, F. **Projetaista de Máquinas**, 1976 São Paulo: Ciência e Técnica p. 218.

RESHETOV, D.N. **Atlas de Construção de Maquinas**, São Paulo: Hemus, 1979, p. 452

TIMM, U; KLEIN, H.H; SCHRECK, S; HAFNER H.U; MATTERN-KLOSSON, M;  
MUNDINGER, H.J. Refrigerator cryopumps with a simple oil-free roughing pump. **Vacuum**.  
v. 46, n. 8-10, p. 879 – 881, 1995.

WANNER INTERNATIONAL LTD. Selling the Hydra-Cell. **World Pumps** Ago. 2000.

VAN WYLEN, G.; SONTAG R.; BORGNAKKE C. **Fundamentos da Termodinâmica**  
**Clássica** São Paulo: Edgard Blücher Ltda 1993, p. 589, p.244 –251.

ZENGERLE, R; GEIGER, W; RICHTER, M; ULRICH, J; KLUGE, S; RICHTER. A  
Transient measurements on miniaturized diaphragm pumps in microfluid systems. **Sensors**  
**and Actuators A**. n. 46-47, p. 557-561, 1995.

ZENGERLE, R; ULRICH, J; KLUGE, S; RICHTER, M; RICHTER, A. A bidirectional  
silicon micropump. **Sensors and Actuators A**. n.50 p. 81-86, Set. 1995.



## **ANEXOS**

**ANEXO A** - Dados experimentais obtidos com a bomba de pistão

Tabela A1.1 - Dados experimentais obtidos com a bomba de pistão.

Testes	Hora	H	N	P <sub>b</sub>		T		q	
				Ent.	Saída	Amb.	Água	V	t
				mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	09:30	25	2,5	105	1,2	21,0	20,0	3,0	843
2	09:50	40	7,5	105	1,2	21,0	20,0	3,0	180
3	10:25	40	7,5	105	1,2	21,0	20,0	3,0	173
4	10:35	40	7,5	105	1,2	21,0	20,0	3,0	172
5	10:45	40	7,5	105	1,2	21,0	20,0	3,0	190
6	10:55	40	6,5	105	1,2	22,0	21,0	3,0	168
7	11:10	40	7,0	105	1,2	22,0	21,0	3,0	171
8	11:20	40	7,0	105	1,2	22,0	21,0	3,0	179
9	11:30	40	6,5	105	1,2	22,0	21,0	3,0	166
10	11:40	40	6,0	100	1,2	22,0	21,0	3,0	178
11	11:50	40	7,0	100	1,2	21,0	22,0	3,0	167
12	12:00	40	7,0	100	1,2	21,0	22,0	3,0	165
13	12:10	40	7,0	100	1,2	21,0	22,0	3,0	167
14	12:20	40	7,0	100	1,2	21,0	22,0	3,0	167
15	12:30	40	6,0	100	1,2	21,0	22,0	3,0	173
16	12:40	40	6,5	100	1,2	21,0	22,0	3,0	168
17	12:50	40	6,5	100	1,2	21,0	22,0	3,0	168
18	13:00	40	6,5	100	1,2	22,0	22,0	3,0	167
19	13:10	40	6,5	100	1,2	22,0	22,0	3,0	168
20	13:20	40	6,0	100	1,2	22,0	22,0	3,0	178
Média		40	6,789	102,105	1,2	21,4	21,3	3,0	171,8

Tabela A1.2 - Dados experimentais obtidos com a bomba de pistão.

Testes	Hora	H	N	P <sub>b</sub>		T		q	
				Ent.	Saída	Amb	Água	V	t
				mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	13:30	55	14,5	110	1,2	22,0	22,0	3,0	56
2	13:40	55	14,5	110	1,2	22,0	22,0	3,0	56
3	13:50	55	14,5	110	1,2	22,0	22,0	3,0	59
4	14:00	55	14,5	110	1,2	22,0	22,0	3,0	58
5	14:10	55	14,5	110	1,2	22,0	22,0	3,0	56
6	14:20	55	14,0	110	1,2	22,0	22,0	3,0	59
7	14:30	55	14,0	110	1,2	22,0	22,0	3,0	58
8	14:40	55	14,0	110	1,2	22,0	22,0	3,0	56
9	14:50	55	14,0	110	1,2	22,0	22,0	3,0	57
10	15:00	55	14,0	110	1,2	22,0	22,0	3,0	57
11	15:10	55	14,0	110	1,2	21,0	22,0	3,0	56
12	15:20	55	14,0	110	1,2	21,0	22,0	3,0	58
13	15:30	55	14,0	110	1,2	21,0	22,0	3,0	58
14	15:40	55	14,0	110	1,2	21,0	22,0	3,0	58
15	15:50	55	14,0	110	1,2	21,0	22,0	3,0	56
16	16:00	55	14,0	110	1,2	21,0	22,0	3,0	58
17	16:10	55	14,0	110	1,2	21,0	22,0	3,0	58
18	16:20	55	14,0	110	1,2	21,0	22,0	3,0	57
19	16:30	55	14,0	110	1,2	21,0	22,0	3,0	57
20	16:40	55	14,0	110	1,2	21,0	22,0	3,0	58
Média		55	14,125	110	1,2	21,5	22,0	3,0	57,3

Tabela A1.3 - Dados experimentais obtidos com a bomba de pistão

Testes	Hora	H mm	N rpm	P <sub>b</sub>		T		q	
				Ent	Saída	Amb.	Água	V	t
				mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	14:00	70	25	110	1,2	21,0	22,0	3,0	29
2	14:10	70	25	110	1,2	21,0	22,0	3,0	29
3	14:20	70	25	110	1,2	21,0	22,0	3,0	30
4	14:30	70	25	110	1,2	21,0	22,0	3,0	30
5	14:40	70	25	110	1,2	21,0	22,0	3,0	29
6	14:50	70	25	110	1,2	21,0	22,0	3,0	30
7	15:00	70	25	110	1,2	21,0	22,0	3,0	29
8	15:10	70	25	110	1,2	21,0	22,0	3,0	30
9	15:20	70	25	110	1,2	21,0	22,0	3,0	30
10	15:30	70	25	110	1,2	21,0	22,0	3,0	29
11	15:40	70	25	110	1,2	21,0	22,0	3,0	30
12	15:50	70	25	110	1,2	21,0	22,5	3,0	29
13	16:00	70	25	110	1,2	21,0	22,5	3,0	30
14	16:10	70	25	110	1,2	21,0	22,5	3,0	29
15	16:20	70	25	110	1,2	21,0	22,5	3,0	29
16	16:30	70	25	110	1,2	21,0	22,5	3,0	29
17	16:40	70	25	110	1,2	21,0	23,0	3,0	30
18	16:50	70	25	110	1,2	21,0	23,0	3,0	30
19	17:00	70	25	110	1,2	21,0	23,0	3,0	29
20	17:10	70	25	110	1,2	21,0	23,0	3,0	30
Média		70	25	110	1,2	21,0	22,3	3,0	29,5

**ANEXO B - Dados experimentais obtidos com a bomba de diafragma**

Tabela B1.1- Dados experimentais obtidos com a bomba de difragma.

Testes	Hora	H	N	P <sub>b</sub>		T		q	
				Ent	Saida	Amb.	Água	V	t
				mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	9:00	40	9	40	1,33	24,0	22,0	3,0	277
2		50	16,5	40	1,33	23,0	22,0	3,0	146
3		50	16,5	40	1,33	23,0	22,0	3,0	148
4		50	16,5	40	1,33	23,0	22,0	3,0	147
5		50	16,5	40	1,33	23,0	22,0	3,0	145
6		50	16,5	40	1,33	24,0	23,0	3,0	146
7	9:20	50	16,5	40	1,33	24,0	23,0	3,0	150
8		50	16,5	40	1,33	24,0	23,0	3,0	153
9		50	16,5	40	1,33	24,0	23,0	3,0	146
10		50	16,5	40	1,33	24,0	23,0	3,0	148
11		50	16,5	40	1,33	24,0	23,0	3,0	150
12		50	16,5	40	1,33	24,0	23,0	3,0	150
13		50	16,5	40	1,33	24,0	23,0	3,0	152
14	9:40	50	16,5	40	1,33	22,0	23,0	3,0	150
15		50	16,5	40	1,33	22,0	23,0	3,0	150
16		50	16,5	40	1,33	22,0	23,0	3,0	150
17		50	16,5	40	1,33	22,0	23,0	3,0	150
18		50	16,5	40	1,33	22,0	23,0	3,0	156
19		50	16,5	40	1,33	22,0	23,0	3,0	155
20	10:00	50	16,5	40	1,33	22,0	23,0	3,0	155
Média		50	16,5	40	1,33	23,1	22,75	3,0	149,8

Tabela B1.2 - Dados experimentais obtidos com a bomba de diafragma.

Testes	Hora	H	N	P <sub>b</sub>		T		q	
				Ent	Saída	Amb.	Água	V	t
				mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	10:00	55	21,5	40	1,33	24,0	23,0	3,0	135
2		55	21,5	40	1,33	24,0	23,0	3,0	136
3		55	21,5	40	1,33	24,0	23,0	3,0	135
4		55	21,5	40	1,33	24,0	23,0	3,0	138
5		55	21,5	40	1,33	24,0	23,0	3,0	136
6		55	21,5	40	1,33	24,0	23,0	3,0	135
7	10:20	55	21,5	40	1,33	25,0	23,0	3,0	135
8		55	21,5	40	1,33	25,0	23,0	3,0	135
9		55	21,5	40	1,33	25,0	23,0	3,0	135
10		55	21,5	40	1,33	25,0	23,0	3,0	135
11		55	21,5	40	1,33	25,0	23,0	3,0	135
12		55	21,5	40	1,33	25,0	23,0	3,0	137
13		55	21,5	40	1,33	25,0	23,0	3,0	136
14	10:40	55	21,5	40	1,33	25,0	23,0	3,0	135
15		55	21,5	40	1,33	25,0	23,0	3,0	138
16		55	21,5	40	1,33	25,0	23,0	3,0	136
17		55	21,5	40	1,33	27,0	25,0	3,0	145
18		55	21,5	40	1,33	27,0	25,0	3,0	145
19		55	21,5	40	1,33	27,0	25,0	3,0	144
20	12:00	55	21,5	40	1,33	27,0	25,0	3,0	142
Média		55	21,5	40	1,33	25,1	23,4	3,0	137,4



Tabela B1.3 - Dados experimentais obtidos com a bomba de diafragma.

Testes	Hora	H mm	N rpm	P		T		q	
				Ent	Saída	Amb.	Água	V	t
				mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	14:00	60	24,5	40	1,33	25,0	24,0	3,0	95
2		60	24,5	40	1,33	25,0	24,0	3,0	96
3		60	24,5	40	1,33	25,0	24,0	3,0	102
4		60	24,5	40	1,33	25,0	24,0	3,0	102
5		60	24,5	40	1,33	25,0	24,0	3,0	106
6		60	24,5	40	1,33	25,0	25,0	3,0	106
7	14:20	60	24,5	40	1,33	25,5	25,0	3,0	106
8		60	24,5	40	1,33	25,5	25,0	3,0	109
9		60	24,5	40	1,33	25,5	25,0	3,0	109
10		60	24,5	40	1,33	25,5	25,0	3,0	109
11		60	27,0	40	1,33	26,0	25,0	3,0	115
12		60	27,0	40	1,33	26,0	25,0	3,0	112
13		60	27,0	40	1,33	26,0	25,0	3,0	114
14	14:40	60	27,0	40	1,33	26,0	25,0	3,0	114
15		60	27,0	40	1,33	26,0	25,0	3,0	114
16		60	27,0	40	1,33	26,0	25,0	3,0	117
17		60	27,5	40	1,33	26,0	26,0	3,0	118
18		60	27,5	40	1,33	26,0	26,0	3,0	117
19		60	27,5	40	1,33	26,0	26,0	3,0	119
20	15:10	60	27,5	40	1,33	26,0	26,0	3,0	116
Média		60	25,85	40	1,33	25,6	24,95	3,0	109,8

Tabela B1.4 - Dados experimentais obtidos com a bomba de diafragma.

Testes	Hora	H	N	P <sub>b</sub>		T		q	
				Ent	Saída	Amb.	Água	V	t
				mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	15:10	65	30,5	40	1,33	26,0	25,0	3,0	114
2		65	30,5	40	1,33	26,0	25,0	3,0	112
3		65	30,5	40	1,33	26,0	25,0	3,0	110
4		65	30,5	40	1,33	26,0	25,0	3,0	113
5		65	30,5	40	1,33	26,0	25,0	3,0	111
6		65	30,5	40	1,33	26,0	25,0	3,0	114
7	15:30	65	30,5	40	1,33	26,0	25,0	3,0	115
8		65	31,5	40	1,33	25,5	25,0	3,0	112
9		65	31,5	40	1,33	25,5	25,0	3,0	112
10		65	31,5	40	1,33	25,5	25,0	3,0	112
11		65	31,5	40	1,33	25,5	25,0	3,0	111
12		65	31,5	40	1,33	25,5	25,0	3,0	112
13		65	31,5	40	1,33	25,5	25,0	3,0	111
14	15:50	65	31,5	40	1,33	25,5	25,0	3,0	110
15		65	31,0	40	1,33	25,5	25,0	3,0	109
16		65	31,0	40	1,33	25,5	25,0	3,0	112
17		65	31,0	40	1,33	25,5	25,0	3,0	110
18		65	31,0	40	1,33	25,5	25,0	3,0	111
19		65	31,0	40	1,33	25,5	25,0	3,0	114
20	16:05	65	31,0	40	1,33	25,5	25,0	3,0	111
Média		65	31,0	40	1,33	25,67	25,0	3,0	111,8

Tabela B1.5 - Dados experimentais obtidos com a bomba de diafragma.

Testes	Hora	H	N	P <sub>b</sub>		T		q	
				Ent	Saída	Amb.	Água	V	t
				mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	16:05	70	33,0	40	1,33	25,5	24,0	3,0	110
2		70	33,0	40	1,33	25,5	24,0	3,0	110
3		70	33,0	40	1,33	25,5	24,0	3,0	111
4		70	33,0	40	1,33	25,5	24,0	3,0	110
5		70	33,0	40	1,33	25,5	24,0	3,0	109
6		70	33,0	40	1,33	25,5	24,0	3,0	110
7	17:20	70	33,0	40	1,33	25,5	24,0	3,0	112
8		70	33,5	40	1,33	25,0	25,0	3,0	113
9		70	33,5	40	1,33	25,0	25,0	3,0	114
10		70	33,5	40	1,33	25,0	25,0	3,0	114
11		70	33,5	40	1,33	25,0	25,0	3,0	117
12		70	33,5	40	1,33	25,0	25,0	3,0	115
13		70	33,5	40	1,33	25,0	25,0	3,0	114
14	17:35	70	33,5	40	1,33	25,0	25,0	3,0	113
15		70	34,0	40	1,33	25,0	24,0	3,0	115
16		70	34,0	40	1,33	25,0	24,0	3,0	116
17		70	34,0	40	1,33	25,0	24,0	3,0	113
18		70	34,0	40	1,33	25,0	24,0	3,0	116
19		70	34,0	40	1,33	25,0	24,0	3,0	119
20	17:50	70	34,0	40	1,33	25,0	24,0	3,0	115
Média		70	33,475	40	1,33	25,175	24,35	3,0	113,3

Tabela B1.6 - Dados experimentais obtidos com a bomba de diafragma. Altura =5m

Testes	H	H	N	P <sub>b</sub>		T		q		
	h:m	mm		rpm	Ent	Saída	Amb.	Água	V	t
					mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	8:00	35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	69	
2		35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	67	
3		35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	65	
4		35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	68	
5		35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	68	
6		35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	72	
7	8:15	35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	71	
8		35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	70	
9		35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	67	
10		35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	72	
11		35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	72	
12		35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	71	
13		35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	71	
14	8:30	35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	70	
15		35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	72	
16		35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	69	
17		35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	72	
18		35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	71	
19		35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	72	
20	8:50	35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	72	
Média		35	9,5	50	0,5	23,0	23,0	1,0	70,0	

Tabela B1.7 - Dados experimentais obtidos com a bomba de diafragma.

Testes	Hora	H mm	N rpm	P <sub>b</sub>		T		q	
				Ent	Saída	Amb.	Água	V	t
				mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	9:00	40	13	50	0,5	24,0	23,5	1,0	46
2		40	13	50	0,5	24,0	23,5	1,0	45
3		40	13	50	0,5	24,0	23,5	1,0	43
4		40	13	50	0,5	24,0	23,5	1,0	44
5		40	13	50	0,5	24,0	23,5	1,0	44
6		40	13	50	0,5	24,0	23,5	1,0	44
7	9:10	40	13	50	0,5	24,0	23,5	1,0	44
8		40	13,5	50	0,5	24,0	23,0	1,0	44
9		40	13,5	50	0,5	24,0	23,0	1,0	43
10		40	13,5	50	0,5	24,0	23,0	1,0	43
11		40	13,5	50	0,5	24,0	23,0	1,0	44
12		40	13,5	50	0,5	24,0	23,0	1,0	44
13		40	13,5	50	0,5	24,0	23,0	1,0	46
14	9:20	40	13,5	50	0,5	24,0	23,0	1,0	44
15		40	13	50	0,5	25,0	24,0	1,0	46
16		40	13	50	0,5	25,0	24,0	1,0	45
17		40	13	50	0,5	25,0	24,0	1,0	46
18		40	13	50	0,5	25,0	24,0	1,0	44
19		40	13	50	0,5	25,0	24,0	1,0	44
20	10:00	40	13	50	0,5	25,0	24,0	1,0	47
Média		40	13,175	50	0,5	24,3	23,475	1,0	44,5

Tabela B1.8 - Dados experimentais obtidos com a bomba de diafragma.

Testes	Hora	H mm	N rpm	P <sub>b</sub>		T		q	
				Ent	Saída	Amb.	Água	V	t
				mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	10:20	45	17,5	50	0,5	25,0	25,0	1,0	31
2		45	17,5	50	0,5	25,0	25,0	1,0	30
3		45	17,5	50	0,5	25,0	25,0	1,0	29
4		45	17,5	50	0,5	25,0	25,0	1,0	30
5		45	17,5	50	0,5	25,0	25,0	1,0	31
6		45	17,5	50	0,5	25,0	25,0	1,0	31
7	10:25	45	17,5	50	0,5	25,0	25,0	1,0	29
8		45	18	50	0,5	25,0	24,0	1,0	30
9		45	18	50	0,5	25,0	24,0	1,0	30
10		45	18	50	0,5	25,0	24,0	1,0	31
11		45	18	50	0,5	25,0	24,0	1,0	31
12		45	18	50	0,5	25,0	24,0	1,0	31
13	10:35	45	18	50	0,5	25,0	24,0	1,0	30
14		45	18	50	0,5	25,0	24,0	1,0	29
15		45	18	50	0,5	25,0	24,5	1,0	31
16		45	18	50	0,5	25,0	24,5	1,0	30
17		45	18	50	0,5	25,0	24,5	1,0	30
18		45	18	50	0,5	25,0	24,5	1,0	31
19		45	18	50	0,5	25,0	24,5	1,0	31
20	10:45	45	18	50	0,5	25,0	24,5	1,0	30
Média		45	17,825	50	0,5	25,0	24,5	1,0	30,3

Tabela B1.9 - Dados experimentais obtidos com a bomba de diafragma

Testes	Hora	H mm	N rpm	P <sub>b</sub>		T		q	
				Ent	Saída	Amb.	Água	V	t
				mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	11:00	50	25,5	50	0,5	26,0	25,0	1,0	27
2		50	25,5	50	0,5	26,0	25,0	1,0	26
3		50	25,5	50	0,5	26,0	25,0	1,0	27
4		50	25,5	50	0,5	26,0	25,0	1,0	26
5		50	25,5	50	0,5	26,0	25,0	1,0	26
6		50	25,5	50	0,5	26,0	25,0	1,0	27
7	11:05	50	25,5	50	0,5	26,0	25,0	1,0	26
8		50	25,5	50	0,5	26,0	25,0	1,0	26
9		50	25,5	50	0,5	26,0	25,0	1,0	26
10		50	25,5	50	0,5	26,0	25,0	1,0	26
11		50	25,5	50	0,5	26,0	25,0	1,0	27
12		50	25,5	50	0,5	26,0	25,0	1,0	27
13		50	25,5	50	0,5	26,0	25,0	1,0	26
14	11:10	50	25,5	50	0,5	26,0	25,0	1,0	26
15		50	25,5	50	0,5	26,0	24,0	1,0	27
16		50	25,5	50	0,5	26,0	24,0	1,0	27
17		50	25,5	50	0,5	26,0	24,0	1,0	27
18		50	25,5	50	0,5	26,0	24,0	1,0	26
19		50	25,5	50	0,5	26,0	24,0	1,0	26
20	11:15	50	25,5	50	0,5	26,0	24,0	1,0	26
Média		50	25,5	50	0,5	26,0	24,7	1,0	26,4

Tabela B1.10 - Dados experimentais obtidos com a bomba de diafragma.

Teste	Hora	H mm	N rpm	P <sub>b</sub>		T		q	
				Ent	Saída	Amb.	Água	V	t
				mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	13:50	55	26,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
2		55	26,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
3		55	26,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	23
4		55	26,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	21
5		55	26,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
6		55	26,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	21
7	13:55	55	26,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	21
8		55	26,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	21
9		55	26,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
10		55	26,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
11		55	26,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
12		55	26,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
13		55	26,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
14	14:00	55	26,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
15		55	27,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
16		55	27,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	23
17		55	27,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	23
18		55	27,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	24
19		55	27,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
20	14:07	55	27,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
Média		55	26,8	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22,0



Tabela B1.11- Dados experimentais obtidos com a bomba de diafragma

Testes	H	H	N	P <sub>b</sub>		T		q		
	h:m	mm		rpm	Ent	Saída	Amb.	Água	V	t
					mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	14:15	60	32,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	25	
2		60	32,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	25	
3		60	32,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	24	
4		60	32,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	23	
5		60	32,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	23	
6		60	32,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	24	
7	14:20	60	32,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	23	
8		60	32,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22	
9		60	32,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	23	
10		60	32,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	24	
11		60	32,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	24	
12		60	32,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	23	
13		60	32,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	24	
14	14:25	60	32,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	23	
15		60	33,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	23	
16		60	33,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	23	
17		60	33,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22	
18		60	33,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	23	
19		60	33,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	23	
20	14:30	60	33,5	50	0,5	25,0	24,0	1,0	23	
Média		60	32,8	50	0,5	25,0	24,0	1,0	23,3	

Tabela B1.12 - Dados experimentais obtidos com a bomba de diafragma.

Testes	Hora	H mm	N rpm	P <sub>b</sub>		T		q	
				Ent	Saída	Amb.	Água	V	t
				mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	14:40	65	36	50	0,5	25,0	24,0	1,0	25
2		65	36	50	0,5	25,0	24,0	1,0	24
3		65	36	50	0,5	25,0	24,0	1,0	23
4		65	36	50	0,5	25,0	24,0	1,0	24
5		65	36	50	0,5	25,0	24,0	1,0	24
6		65	36	50	0,5	25,0	24,0	1,0	23
7	14:45	65	36	50	0,5	25,0	24,0	1,0	23
8		65	36	50	0,5	25,0	24,5	1,0	24
9		65	36	50	0,5	25,0	24,5	1,0	24
10		65	36	50	0,5	25,0	24,5	1,0	24
11		65	36	50	0,5	25,0	24,5	1,0	23
12		65	36	50	0,5	25,0	24,5	1,0	24
13		65	36	50	0,5	25,0	24,5	1,0	24
14	14:50	65	36	50	0,5	25,0	24,5	1,0	23
15		65	36	50	0,5	25,0	25,0	1,0	24
16		65	36	50	0,5	25,0	25,0	1,0	24
17		65	36	50	0,5	25,0	25,0	1,0	24
18		65	36	50	0,5	25,0	25,0	1,0	24
19		65	36	50	0,5	25,0	25,0	1,0	25
20	15:00	65	36	50	0,5	25,0	25,0	1,0	24
Média		65	36	50	0,5	25,0	24,475	1,0	23,8

Tabela B1.13 - Dados experimentais obtidos com a bomba de diafragma.

Testes	Hora	H mm	N rpm	P <sub>b</sub>		T		q	
				Ent	Saída	Amb.	Água	V	t
				mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	15:05	70	38	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
2		70	38	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
3		70	38	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
4		70	38	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
5		70	38	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
6		70	38	50	0,5	25,0	25,0	1,0	24
7	15:10	70	38	50	0,5	25,0	25,0	1,0	24
8		70	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
9		70	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	22
10		70	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
11		70	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
12		70	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
13		70	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
14	15:15	70	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
15		70	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
16		70	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
17		70	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	22
18		70	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
19		70	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
20	15:20	70	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	22
Média		70	38,65	50	0,5	25,0	25,0	1,0	22,9

Tabela B1.14 - Dados experimentais obtidos com a bomba de diafragma.

Testes	Hora	H mm	N rpm	P <sub>b</sub>		T		q	
				Ent	Saída	Amb.	Água	V	t
				mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	15:25	75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
2		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	22
3		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	22
4		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	22
5		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	22
6		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
7		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	21
8		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	21
9		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	22
10		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
11		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	22
12		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	23
13		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	22
14		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	22
15		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	22
16		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	22
17		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	22
18		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	22
19		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	22
20	15:30	75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	21
Média		75	39	50	0,5	25,0	25,0	1,0	22,0

Tabela B1.15 - Dados experimentais obtidos com a bomba de diafragma.

Testes	Hora	H mm	N rpm	P <sub>b</sub>		T		q	
				Ent	Saída	Amb.	Água	V	t
				mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	15:40	80	41	50	0,5	25,0	24,5	1,0	23
2		80	41	50	0,5	25,0	24,5	1,0	20
3		80	41	50	0,5	25,0	24,5	1,0	21
4		80	41	50	0,5	25,0	24,5	1,0	23
5		80	41	50	0,5	25,0	24,5	1,0	22
6		80	41	50	0,5	25,0	24,5	1,0	21
7		80	41	50	0,5	25,0	24,5	1,0	22
8		80	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	21
9		80	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	21
10		80	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	21
11		80	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	21
12		80	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
13		80	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
14		80	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
15		80	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	21
16		80	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	20
17		80	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	21
18		80	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	21
19		80	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	20
20	15:50	80	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	21
Média		80	41	50	0,5	25,0	24,175	1,0	21,3

Tabela B1.16 - Dados experimentais obtidos com a bomba de diafragma.

Testes	Hora	H mm	N rpm	P <sub>b</sub>		T		q	
				Ent	Saida	Amb.	Água	V	t
				mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	15:55	85	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
2		85	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	21
3		85	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
4		85	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
5		85	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
6		85	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	22
7		85	41	50	0,5	25,0	24,0	1,0	21
8		85	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	21
9		85	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
10		85	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	21
11		85	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	21
12		85	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
13		85	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
14		85	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
15		85	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
16		85	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
17		85	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	21
18		85	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
19		85	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
20	16:05	85	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
Média		85	41,325	50	0,5	24,35	24,0	1,0	21,7

Tabela B1.18 - Dados experimentais obtidos com a bomba de diafragma.

Teste	Hora	H	N	P <sub>b</sub>		T		q	
				Ent	Saída	Amb.	Água	V	t
	h:m	mm	rpm	mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	°C	l	s
1	16:25	95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
2		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
3		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	23
4		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	23
5		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
6		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
7		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
8		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
9		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
10		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
11		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	23
12		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
13		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
14		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
15		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
16		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
17		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
18		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
19		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	23
20	16:35	95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22
Média		95	41,5	50	0,5	24,0	24,0	1,0	22,2