

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RAFAEL HENRIQUE MALLMANN PERIUS

**DESEMPENHO DE UM CARNEIRO HIDRÁULICO DE 1” CONSTRUÍDO EM AÇO
GALVANIZADO ATUANDO COM UMA E DUAS VÁLVULAS DE IMPULSO**

**Alegrete
2023**

RAFAEL HENRIQUE MALLMANN PERIUS

**DESEMPENHO DE UM CARNEIRO HIDRÁULICO DE 1” CONSTRUÍDO EM AÇO
GALVANIZADO ATUANDO COM UMA E DUAS VÁLVULAS DE IMPULSO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: D.Sc. Marília Ferreira Tamiosso

Coorientador: Eng. Giulian Rubira Gautério

**Alegrete
2023**

RAFAEL HENRIQUE MALLMANN PERIUS

DESEMPENHO DE UM CARNEIRO HIDRÁULICO DE 1" CONSTRUÍDO EM AÇO GALVANIZADO ATUANDO COM UMA E DUAS VÁLVULAS DE IMPULSO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 23 de fevereiro de 2023.

Banca examinadora:

Profa. Dra. MARILIA FERREIRA TAMIOSSO - UNIPAMPA - Orientadora

Eng. GIULIAN RUBIRA GAUTÉRIO - UNIPAMPA

Prof. Dr. DIEGO ARTHUR HARTMANN - UNIPAMPA

Profa. Dra. AMANDA RITHIELI PEREIRA DOS SANTOS - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **DIEGO ARTHUR HARTMANN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/02/2023, às 15:10, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARILIA FERREIRA TAMIOSSO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/02/2023, às 18:22, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **GIULIAN RUBIRA GAUTERIO, ENGENHEIRO-AREA**, em 25/02/2023, às 22:02, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **AMANDA RITHIELI PEREIRA DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/02/2023, às 09:35, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1064549** e o código CRC **1A83064A**.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

P441d Perius, Rafael Henrique Mallmann

Desempenho de um carneiro hidráulico de 1" construído em
aço galvanizado atuando com uma e duas válvulas de impulso /
Rafael Henrique Mallmann Perius.

55 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA CIVIL, 2023.

"Orientação: Marília Ferreira Tamiosso".

1. Hidráulica. 2. Carneiro hidráulico. 3. Aço galvanizado.
I. Título.

AGRADECIMENTO

À profª e orientadora D.Sc. Marilia Ferreira Tamiosso, pelos conselhos, correções, dicas e incentivos;

Ao coorientador Eng. Giulian Rubira Gautério, por toda ajuda, apoio, disponibilidade e parceria;

À profª D.Sc. Amanda Rithieli Pereira dos Santos e ao prof. D.Sc. Diego Arthur Hartmann, por aceitarem o convite para composição da banca examinadora;

Aos meus pais, por estarem sempre dispostos a ouvir e ajudar, acreditando no meu potencial desde o início;

Ao meu irmão, Nathanael, por ser meu amigo e parceiro mais antigo;

Aos meus amigos, por terem facilitado e aliviado o percurso e por percorrerem, de uma forma ou de outra, essa jornada acadêmica comigo;

Às demais pessoas que fizeram parte desse período;

Agradeço a todos vocês.

RESUMO

O carneiro hidráulico é uma bomba de recalque de água que faz uso do fenômeno conhecido como golpe de aríete para elevar água em grandes distâncias verticais e horizontais, utilizando apenas a energia potencial e cinética do deslocamento de água por um desnível geométrico inicial, sem utilizar outra fonte de energia, tornando-se portanto uma alternativa sustentável e econômica para transporte de água em situações específicas. Neste trabalho, construiu-se uma bomba de aríete utilizando tubos e peças de aço galvanizado, com diâmetro de 1", tendo como objetivo a comparação de desempenho entre configurações, variando a vazão de entrada e a quantidade de válvulas de impulso utilizadas. Foram realizados ensaios de campo para a obtenção dos resultados, testando dois desníveis de adução (4,8 m e 4 m), além de 8 vazões de entrada. A maior altura manométrica obtida foi de 19,74 m, com vazão de recalque de 3,02 L/min, utilizando duas válvulas de impulso, desnível inicial de 4,8m, vazão de entrada máxima, frequência de batidas de 68/min e rendimento de 37,16%. Notou-se um visível decréscimo de altura manométrica gerada, a partir da diminuição da vazão de entrada. De maneira geral, o acréscimo de outra válvula de desperdício gerou um aumento de altura manométrica (1,55 m no caso mais expressivo, com média de 0,59 m para a altura de 4,8 m e média de 0,83 m para a altura de 4 m), acompanhado de um aumento no rendimento (3,81% no caso mais expressivo com média de 1,62% para a altura de 4,8 m e 5,27% no caso mais expressivo com média de 2,84% para a altura de 4 m). Em conclusão, o carneiro hidráulico confeccionado opera com êxito na maioria das configurações em que foi submetido, obtendo melhores resultados de altura de elevação nas situações de maior desnível inicial e vazão de entrada, além do modelo possuir grande potencial de recalque ainda não explorado.

Palavras-chave: Hidráulica; Carneiro Hidráulico; Aço Galvanizado.

ABSTRACT

The hydraulic ram is an equipment that makes use of the phenomenon known as water hammer to raise water to huge distances, both vertical and horizontal, using only the potential and kinetic energy from liquid displacement, of an initial geometrical slope, without use another source of energy. In this work, a ram pump was built using pipes and parts made of galvanized steel, with diameter of 1 in, aiming performance comparison between two configurations. Were done field trials to obtain the results, testing two addition slopes (4,8 m and 4 m), plus eight entry flow rates. The greatest manometric height obtained was 19,74 m, with discharge flow rate of 181,75 L/h, using two impulse valves, initial slope of 4,8 m, maximum entry flow rate, beat frequency of 68/min and efficiency of 37,16%. Was noted a visible decrease in generated manometric height, with the entry flow rate reduction. In general, the addition of another waste valve create an increase in the manometric height (1,55 m in the most expressive case, with 0,59 m average to a slope of 4,8 m and 0,83 m average to a slope of 4 m), followed by a increase in the efficiency (3,81% in the most expressive case with 1,62% average to a slope of 4,8 m and 5,27% in the most expressive case with 2,84% average to a slope of 4 m). In conclusion, the hydraulic ram that was made, function with success in most configuration that it was submitted, getting better results in situations with higher geometrical slope and entry flow rate, besides from having great potential of discharge heights still not explored.

Keywords: Hydraulics; Hydraulic Ram; Galvanized Steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Golpe de aríete em tubulação	15
Figura 2 – Modelo de bomba de aríete dos irmãos Montgolfier	16
Figura 3 – Elementos de um sistema de recalque padrão	17
Figura 4 – Fluxograma de processos a serem realizados	22
Figura 5 – Execução de rosca NPT na tubulação metálica	24
Figura 6 – Componentes da válvula de impulso	25
Figura 7 – Mola de compressão utilizada	25
Figura 8 – Carneiro hidráulico montado	26
Figura 9 – Reservatório elevado utilizado	27
Figura 10 – Sistema de recalque com elementos de medição	28
Figura 11 – Representação da linha piezométrica de um sistema de recalque . .	30
Figura 12 – Composição para cálculo da vazão de entrada - Q_e	32
Figura 13 – Sistema para obtenção das vazões padrões de entrada	32
Figura 14 – Relação vazão de recalque e altura manométrica - 4,8m - 1 válvula	40
Figura 15 – Relação vazão de entrada e altura manométrica - 4,8m - 1 válvula .	41
Figura 16 – Relação vazão de recalque e altura manométrica - 4,8m - 2 válvulas	41
Figura 17 – Relação vazão de entrada e altura manométrica - 4,8m - 2 válvulas	42
Figura 18 – Relação vazão de recalque e altura manométrica - 4m - 1 válvula .	42
Figura 19 – Relação vazão de entrada e altura manométrica - 4m - 1 válvula . .	43
Figura 20 – Relação vazão de recalque e altura manométrica - 4m - 2 válvulas .	43
Figura 21 – Relação vazão de entrada e altura manométrica - 4m - 2 válvulas .	44
Figura 22 – Sistema com coleta da vazão de desperdício	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de perda de carga	19
Tabela 2 – Quantitativo de itens	24
Tabela 3 – Vazões pré-definidas (L/min)	37
Tabela 4 – Parâmetros de apresentação - 4,8 m - 1 válvula	37
Tabela 5 – Parâmetros de apresentação - 4,8 m - 2 válvulas	38
Tabela 6 – Parâmetros de apresentação - 4 m - 1 válvula	38
Tabela 7 – Parâmetros de apresentação - 4 m - 2 válvulas	39
Tabela 8 – Comparativo de resultados com outros autores	45
Tabela 9 – Orçamento de materiais	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ONU – Organização das Nações Unidas

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

NPT – National Pipe Thread

PVC – Polyvinyl chloride

PET – Polyethylene terephthalate

LISTA DE SÍMBOLOS

J – Perda de carga contínua unitária

C – Coeficiente de perda de carga de Hazen-Williams

Q – Vazão

D – Diâmetro

z_n – Energia de posição no ponto n

p_n – Pressão no ponto n

γ – Peso específico

v_n – Velocidade no ponto n

g – Aceleração da gravidade

H_m – Altura manométrica

Δh – Perda de carga entre dois pontos

H – Desnível entre a bomba e a cota de recalque máximo

h – Desnível entre o reservatório inicial e a bomba

ϕ – Diâmetro de peças

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo geral	12
1.2	Objetivos específicos	13
1.3	Justificativa	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Golpe de aríete	14
2.2	Bomba de aríete	15
2.3	Aplicações práticas	19
2.4	Curva de operação	20
2.5	Recomendações e parâmetros de utilização	20
3	MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1	Montagem do carneiro hidráulico com tubulação de aço galvanizado	23
3.1.1	Considerações de projeto	23
3.1.2	Montagem da bomba	23
3.1.3	Instalação do sistema	26
3.2	Ensaio	29
3.2.1	Configuração do sistema	29
3.2.2	Ajustes de funcionamento	31
3.2.3	Procedimentos de campo	33
3.3	Curva característica da bomba desenvolvida	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	Realização dos ensaios	36
4.2	Apresentação dos dados de ensaio	36
4.3	Análise gráfica	39
4.4	Comparação com outros autores	44
4.5	Custo de confecção do carneiro hidráulico utilizado	45
4.6	Possível método de ensaio com coleta da vazão de desperdício	46
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
	REFERÊNCIAS	50
	ANEXO A – TABELA DE RESULTADOS - 4,8 M - 1 VÁLVULA	52
	ANEXO B – TABELA DE RESULTADOS - 4,8 M - 2 VÁLVULAS	53
	ANEXO C – TABELA DE RESULTADOS - 4 M - 1 VÁLVULA	54
	ANEXO D – TABELA DE RESULTADOS - 4 M - 2 VÁLVULAS	55

1 INTRODUÇÃO

Possuir acesso à água potável e de forma segura é considerado um direito humano fundamental e, nos últimos anos, diversas medidas vem sendo adotadas por países ao redor do mundo, de modo a gradualmente garantir tal condição para todos (ONUBR, 2010). Oito a cada dez pessoas que não possuem tal acesso, estão localizadas em áreas rurais de países em desenvolvimento, como o Brasil (ONUBR, 2011). Segundo dados da ONUBR (2022), há mais de 733 milhões de pessoas sem acesso a energia no mundo e, além disso, cerca de 77% estão localizadas na África Subsaariana, região que possui também notória escassez hídrica.

Ferramentas que auxiliem na solução de problemas enfrentados pela população mundial devem ser objetos contantes de estudos, sejam estes problemas de natureza crítica ou cotidiana, visando assim, o avanço tecnológico como meio de melhorar a qualidade de vida das pessoas.

O carneiro hidráulico foi uma invenção extraordinária do ponto de vista hidráulico, pois possibilitou a utilização de um fenômeno considerado prejudicial para a tubulação e transporte de água em geral, como o mecanismo central de funcionamento de uma bomba de recalque bastante efetiva em termos de altura manométrica gerada. A partir de uma pequena coluna de água no abastecimento, permite o transporte para grandes elevações, através da transferência de energia cinética, sem a utilização de energia elétrica. Tal fenômeno torna-a uma excelente opção para realizar o abastecimento de água em áreas pobres ou sem acesso à eletricidade, atuando a um custo zero, do ponto de vista econômico. Além disso, sua construção pode ser feita com materiais facilmente encontrados, com preços acessíveis, mantendo ainda efetividade suficiente para sua utilização em diversas situações.

A curva de operação de uma bomba de recalque é muito importante para que esta seja utilizada pela população em geral, pois fornece os parâmetros nos quais atuará. Para o carneiro hidráulico essa curva é igualmente importante, sua construção facilita a escolha da dimensão de seus elementos, tais como: diâmetro da tubulação a ser utilizada, volume da câmara de compressão de ar, altura manométrica de abastecimento e de recalque.

1.1 Objetivo geral

Construção da curva de operação de uma bomba de aríete com tubulação de aço galvanizado e diâmetro comercial de 1", utilizando configuração com uma e duas válvulas de desperdício.

1.2 Objetivos específicos

- Verificar se ocorre um aumento nas propriedades de recalque com a adição de outra válvula de desperdício;
- Comparar os resultados obtidos com outros sistemas similares, encontrados na literatura.

1.3 Justificativa

Recentemente, com o crescente interesse da população pela utilização de sistemas que sejam energeticamente limpos e eficientes, as bombas de aríete desenvolveram popularidade e um aumento em sua aplicação, neste contexto surgiu a necessidade da propagação de maiores experiências na construção destes equipamentos. Além disso, devido a sua confecção ser realizada de forma manual, faz-se necessária a realização de testes práticos, de modo a obter a faixa de operação para cada diferente sistema construído e disponibilizar uma quantidade suficiente de dados para que a identificação da configuração ideal, seja facilitada. Busca-se então um conjunto de itens e materiais que combinados, resultem em um carneiro hidráulico efetivo para os projetos de pequeno porte.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O carneiro hidráulico é uma bomba de recalque que opera sem a utilização de energia elétrica ou combustível. Para tanto, faz-se necessário possuir um desnível inicial, com bomba posicionada em cota inferior à do local de captação da água, de modo a iniciar seu funcionamento, que ocorre através de um fenômeno bastante conhecido e difundido, o golpe de aríete.

2.1 Golpe de aríete

O golpe de aríete é caracterizado por um choque acometido a uma tubulação devido ao encerramento abrupto do fluxo de líquido por ela transportado, como no caso do fechamento rápido de um registro ou comporta. Essa obstrução causa uma sobrepressão na tubulação, em virtude da transformação de energia cinética da água inicialmente em movimento, para energia potencial, através dos esforços de compressão do líquido. É descrito ainda que o fenômeno comumente se torna cíclico, pois no momento em que o fluxo é interrompido, a onda de sobrepressão é propagada à montante da tubulação, produzindo movimento no sentido inverso ao inicial, este por sua vez, gera uma depressão à jusante, onde a tubulação permanece fechada, a propagação da pressão negativa provoca novamente o movimento no sentido inicial, fazendo com que o fenômeno se repita, ainda que mais fraco devido ao atrito interno. (NETTO *et al.*, 1998)

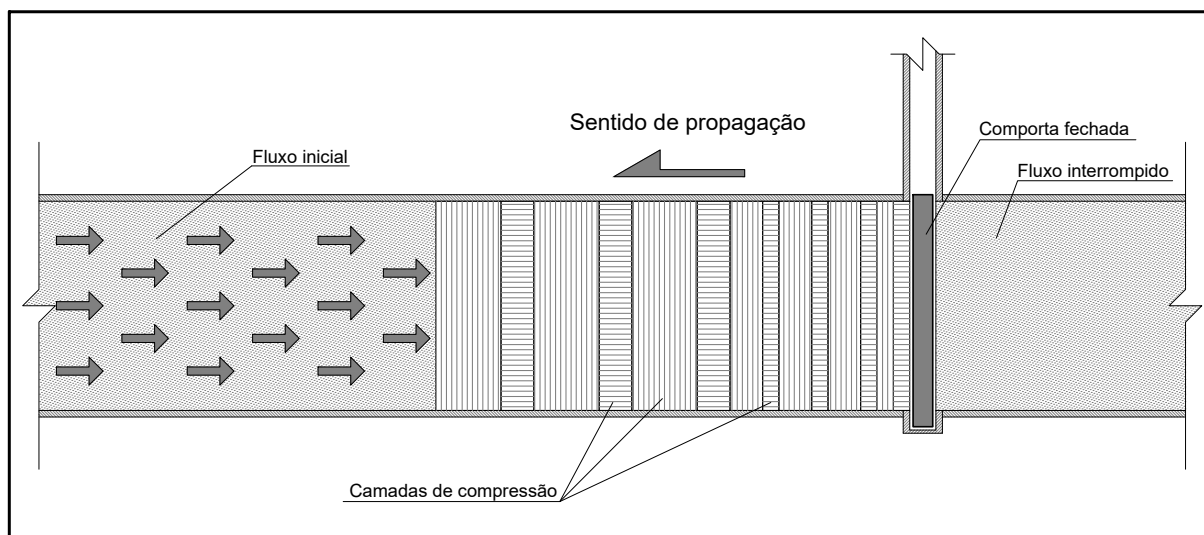
Em condições irreais, considerando a água como um líquido incompressível, o material da tubulação indeformável e o tempo de fechamento tendendo a zero, o golpe de aríete tem o potencial de gerar pressão infinita. Entretanto, como a interrupção de movimento não é instantânea, o material da tubulação sofre deformação e a compressibilidade da água é existente, a pressão gerada, ainda que elevada, é limitada e pode ser alterada pelas características aqui descritas, como o material da composição dos tubos e acessórios, o tempo entre o início do processo de interrupção e a completa obstrução da passagem, além das características do próprio líquido envolvido. (NETTO *et al.*, 1998)

Na Figura 1, é apresentada uma demonstração do golpe de aríete em uma tubulação, onde havia um fluxo contínuo de líquido, que foi interrompido pelo fechamento abrupto da comporta. Nesse caso, conforme descrito por Netto *et al.* (1998), podemos imaginar pequenas camadas de líquido sendo comprimidas pelo fluxo inicial, no processo de frenagem, gerando uma onda de sobrepressão que se propaga a montante da tubulação e posteriormente, a inversão de sentido do fluxo.

A etimologia dos termos entretanto, nos leva até o grego, no qual a palavra aríete, a mesma da ferramenta de cerco destinada a desobstruir passagens por meio de percussão, deriva de *aries* e significa literalmente carneiro (ARIES, 2022). O

emprego do termo parece ter iniciado assim que tornou-se notório o ruído causado pelo fenômeno, o qual foi associado ao som de marteladas dos característicos golpes realizados pelos aríetes. (BAPTISTA; COELHO, 2010)

Figura 1 – Golpe de aríete em tubulação



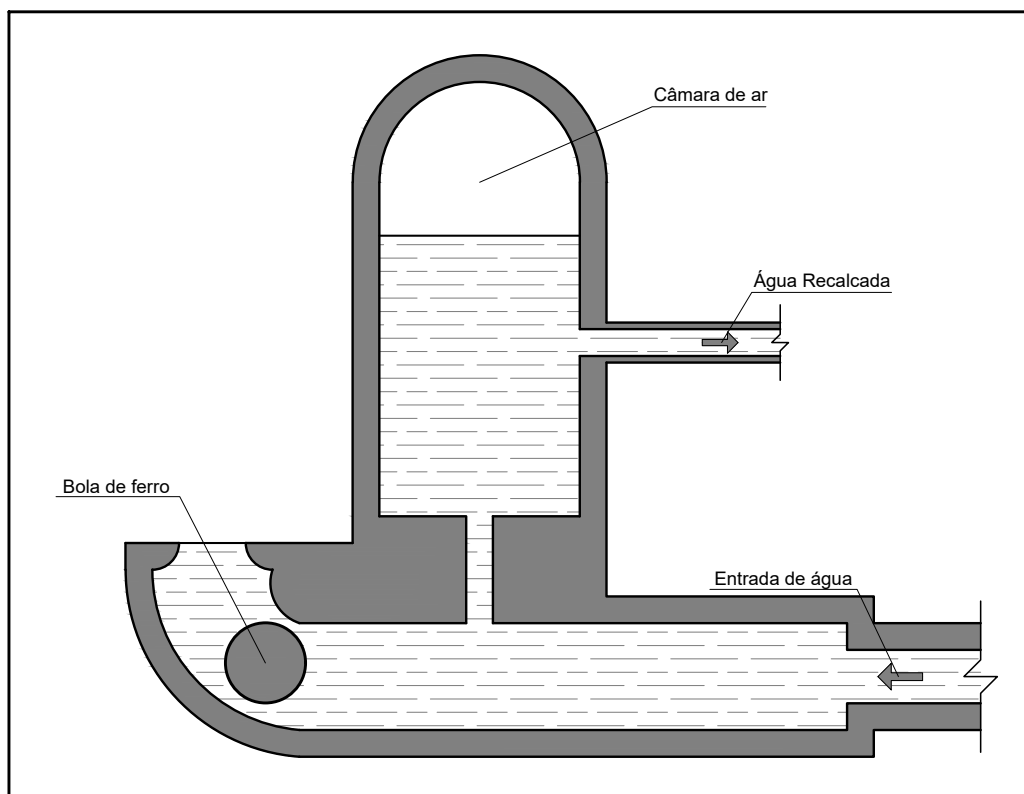
Fonte: Elaboração Própria

2.2 Bomba de aríete

Bomba de aríete é um dos termos utilizados para designar o carneiro hidráulico. Recebe esse nome pois é construída de maneira a aproveitar-se do transiente hidráulico para realizar o recalque de um volume de água. Isso torna-se possível uma vez que um dos resultados conhecidos do fenômeno é o aumento de pressão gerado no líquido e na tubulação, resultando em um acréscimo na energia potencial, que pode ser facilmente convertida para realizar a elevação de uma coluna de água até um reservatório localizado em um nível superior ao inicial, por exemplo.

Ainda que existam diversos modelos desenvolvidos, essencialmente os carneiros hidráulicos encontrados possuem funcionamento similar desde que foram automatizados por Joseph Michel Montgolfier e seu irmão em 1796, pois o primeiro modelo, desenvolvido por John Whitehurst necessitava de um operador para realizar o bombeamento, restrição que foi solucionada a partir da aplicação engenhosa de uma válvula de desperdício, permitindo que o mecanismo seja acionado automaticamente e continue a operar devido ao seu próprio movimento cíclico. O modelo desenvolvido pelos irmãos Montgolfier, utilizava uma esfera de metal para interromper o fluxo e pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 – Modelo de bomba de aríete dos irmãos Montgolfier



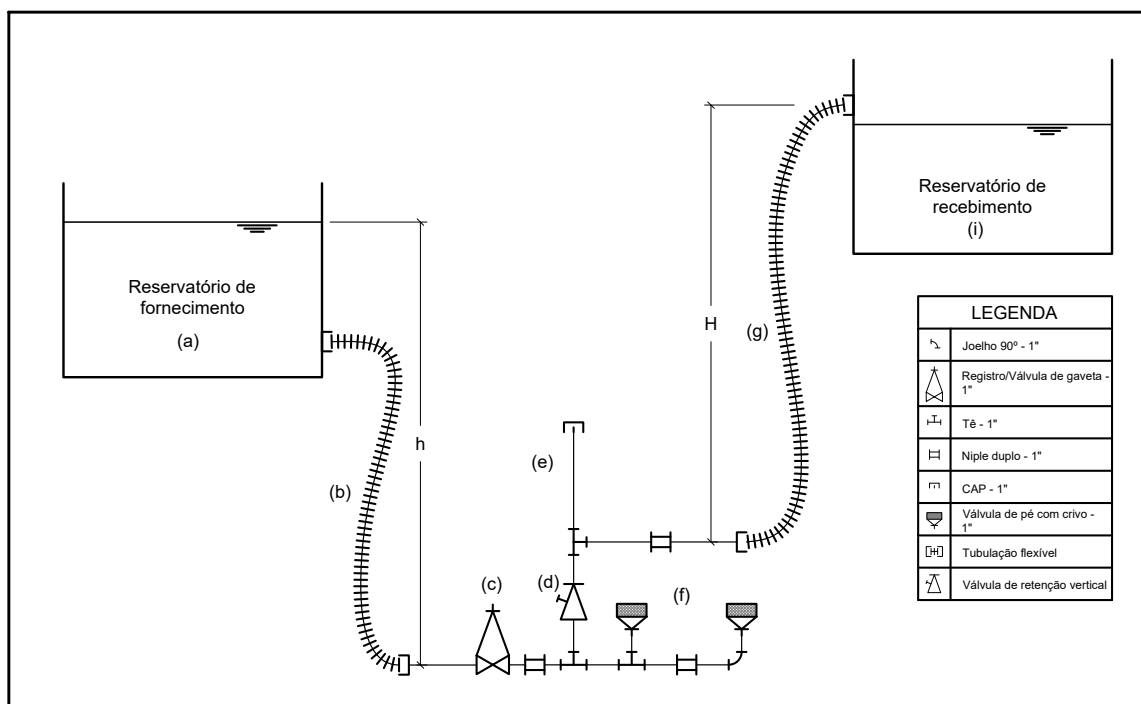
Fonte: Adaptado de Rojas (2002) p. 4

É de importante ressaltar que, existem diversos tipos de bombas de recalque baseadas em golpe de aríete, podendo no entanto, serem separadas em dois grupos: industrializadas e de confecção manual. Ambas são de fácil manejo e não necessitam de energia elétrica ou combustível fóssil para o seu funcionamento. (TIAGO FILHO, 2002)

A Figura 10 foi elaborada para facilitar a explicação de um sistema de recalque padrão utilizando bomba de aríete. Essencialmente, para o efetivo funcionamento da bomba, são necessários alguns elementos:

- reservatório ou fonte de água para o abastecimento (a);
- tubulação de sucção, responsável pela condução da água da fonte até a bomba, por ação simples da gravidade (b);
- registro simples, que será utilizado para colocar o sistema em funcionamento e também desligá-lo (c);
- uma válvula de retenção (ou passagem única), por onde o escoamento se dará, após a obstrução do fluxo inicial (d);

Figura 3 – Elementos de um sistema de recalque padrão



Fonte: Elaboração própria

- uma ou mais câmaras de compressão de ar que serão parcialmente preenchidas, de certa forma armazenando a energia potencial e em seguida impulsionando a água para montante (e);
- um conjunto (com uma ou mais), de válvulas de desperdício, que produzirá o transiente hidráulico através de seu fechamento repentino (f);
- tubulação de recalque, responsável por conduzir a água recalçada até seu destino (g).
- reservatório para o recebimento da água recalçada (i);

Inicialmente, assim que o registro de entrada da bomba é aberto, a água circula até a válvula de desperdício e é descartada, mas após atingir uma certa velocidade, o líquido força o fechamento do mecanismo, interrompendo bruscamente o fluxo de água, gerando um golpe de aríete, que se propaga em sentido montante, conseguindo então, com o auxílio da sobrepessão, vencer a resistência oferecida pela outra válvula (de passagem única), por onde o mesmo força seu caminho, comprimindo então o ar armazenado na campândula e aumentando a energia potencial do volume de água. Em seguida, devido à depressão gerada pelo movimento do líquido no sentido contrário, a

válvula de desperdício é aberta e a água passa a jorrar novamente, reiniciando o ciclo. (TIAGO FILHO, 2002)

A frequência de golpes por minuto pode ser ajustada através da regulagem da válvula de escape, pois essa possui um conjunto de porcas, parafuso e mola, permitindo um ajuste fino da pressão necessária para realizar o fechamento do mecanismo. Esta é extremamente importante para uma correta regulagem da bomba, interferindo diretamente na coluna de água gerada e na vazão recalçada. Uma frequência menor de batidas por minuto resulta em uma pressão maior transferida à tubulação, por batida, produzindo recalque mais elevado. (ABATE; BOTREL, 2002)

Um conceito importante para o dimensionamento de bombas de recalque e para o transporte de água em geral, é a perda de carga. Descrita como a transformação de energia cinética em calor, durante o transporte de um líquido, comumente água quente ou fria, podendo ser classificada em perda distribuída ou localizada. A perda de água localizada é aquela que ocorre devido a uma mudança de direção do escoamento, seja de maneira geral, em peças como joelhos e tês, ou mais específica, como no mecanismo de uma válvula, onde o líquido costuma sofrer leve desvio mesmo na situação em que se considera o sistema "aberto". Já a perda de carga distribuída é considerada nos trechos retilíneos, onde ocorre atrito do líquido em contato com as paredes internas da tubulação, esta sofre influência direta do tipo de material utilizado na condução, através do conhecido coeficiente de perda de carga, dependente da rugosidade do mesmo. (BAPTISTA; COELHO, 2010)

Como já mencionado anteriormente, existe uma correlação entre a perda de carga em função do atrito com as paredes da tubulação e o material empregado. Esta pode ser vista através da fórmula de Hazen-Williams para perda de carga distribuída, representada na equação (2.1), onde o coeficiente de perda de carga (C), é inversamente proporcional à perda de carga (J). Ao analisarmos os valores do coeficiente dos materiais em questão (PVC e Aço Galvanizado), encontrados na literatura (Tabela 1), percebemos que o material plástico possui um coeficiente de maior valor, resultando em uma perda de carga menor, em relação ao metálico, para uma situação de vazão e seção de tubulação idênticas.

$$J = \frac{10,64}{C^{1,85}} \cdot \frac{Q^{1,85}}{D^{4,87}} \quad (2.1)$$

Onde:

J : Perda de carga contínua unitária

C : Coeficiente de perda de carga de Hazen-Williams

Q : Vazão

D : Diâmetro da tubulação

Tabela 1 – Coeficientes de perda de carga

Material	C
Aço Galvanizado	125
Plástico	140

Fonte: Adaptado de Baptista e Coelho (2010).

Entretanto, apesar de causar uma maior perda de carga ao sistema, a tubulação metálica, principalmente se tratando de conexões, traz também uma expressiva vantagem em relação ao PVC, pois possui baixa deformação, melhorando assim a propagação do golpe de aríete, efeito indesejado para a distribuição de água convencional, mas muito bem-vindo na situação em que pretendemos utilizá-lo como mecanismo gerador de sobrepressão. (ABATE; BOTREL, 2002)

A válvula de desperdício é um elemento crucial para o funcionamento automatizado do carneiro hidráulico, ela torna possível que o fenômeno ocorra, através da interrupção do fluxo e após, utiliza sua flexibilidade para retornar à posição inicial e permitir que o processo se repita. Uma maneira simples de obter um elemento com tal funcionalidade, é através da alteração de outra peça existente, inserindo uma mola dentro de uma válvula de pé com crivo desmontada, gerando assim duas instâncias (aberta e fechada), permitindo o fluxo até o momento em que este atinge velocidade suficiente para comprimir a mola, fechando assim o canal e gerando na tubulação o golpe desejado.

2.3 Aplicações práticas

Devido às suas limitações de vazão e altura de recalque, este tipo de bomba é mais utilizada em situações onde há disponibilidade de um pequeno desnível, possibilitando que a bomba seja posicionada em cota mais baixa que a fonte de água, gerando assim a pressão inicial necessária para o funcionamento do carneiro hidráulico. Há também outro obstáculo encontrado em relação a outros sistemas de recalque, a vazão de saída, pois como já relatado, as bombas de aríete tem um rendimento baixo, 25-30% para alturas de recalque de 1-5 m segundo Oliveira e Souza (2015), chegando até 63%, valor encontrado por Rojas (2002), controlando eletronicamente o tempo de fechamento da válvula.

Além disso, os carneiros hidráulicos possuem uma vazão específica também baixa, tornando-se vantajosos para suprir uma grande quantidade ao longo de um grande tempo, mas não adequados para necessidades de consumo e vazão imediatos. (OLIVEIRA; SOUZA, 2015)

Dito isto, as situações onde o carneiro hidráulico pode ser utilizado com efetividade, variam desde projetos rurais até urbanos, como para abastecimento de um

sistema de irrigação ou desedentação animal, transporte de recursos hídricos para aproximá-los do local de utilização ou ainda para auxiliar na automatização de sistemas de coletas de águas pluviais residenciais, conforme abordado por Ponsoni *et al.* (2014).

2.4 Curva de operação

O projeto de uma bomba é feito visando um conjunto específico de alturas manométricas e vazões, de maneira a suprir determinada necessidade. Entretanto, devido à imprevisibilidade de diversos fatores, quando submetida a ensaios, normalmente verifica-se a existência de pontos de atuação externos aos previstos, a composição destes como um todo é chamada de faixa de operação da bomba. A obtenção desta é de vital importância, para que o consumidor ou projetista possa selecionar a bomba que melhor se adeque às características de seu sistema. (BAPTISTA; COELHO, 2010)

Usualmente, as curvas de operação das bombas são representadas por relação de altura manométrica (H_m) e vazão (Q), porém, na realização dos ensaios, procura-se obter também outros dados, como: a potência necessária para iniciar o funcionamento da bomba, em cada vazão de observação; o rendimento obtido (η); e a carga necessária para não ocorrer cavitação, durante o processo de sucção. (BAPTISTA; COELHO, 2010)

2.5 Recomendações e parâmetros de utilização

Recentemente, diversos trabalhos têm sido realizados na área, tendo como principal objetivo, avaliar as diversas características que influenciam no mecanismo do carneiro hidráulico. Essencialmente, escolhe-se um conjunto de características fixas, como diâmetro e material da tubulação e conexões, e varia-se um ou mais fatores durante os ensaios, de modo a determinar sua influência e configuração ideal.

Os ensaios realizados por BONETTI *et al.* (2016), buscaram verificar a influência de fatores como a posição da válvula de impulso (horizontal ou vertical) e a dimensão da câmara de ar, na eficiência de alguns modelos de bomba de aríete construídos. Foram montadas variações do mesmo sistema de carneiro hidráulico, tendo como padrão o diâmetro da tubulação de 25 mm e uma altura de sucção de 3 m. Alguns modelos adotados possuíam tubulação e conexões em PVC, outros possuíam conexões metálicas, variou-se a orientação da válvula de escape para as configurações. Depois, mantendo a válvula no melhor caso (horizontal), avaliaram a dimensão da câmara de compressão com tubulação de 32 mm, alterando seu comprimento e também, utilizando garrafas PET. A conclusão obtida foi de que, a válvula de desperdício na posição horizontal resultou em maior eficiência, bem como um comprimento de câmara de ar de 50 a 75 cm, a tubulação de PVC foi a que apresentou melhores resultados

nestas dimensões de sistema, apesar de que o rendimento encontrado estava abaixo do esperado.

Uma comparação de eficiência no recalque de colunas d'água utilizando carneiro hidráulico industrializado com tubulação de alimentação de PVC e Aço, foi realizada por Abate e Botrel (2002). Nesta, as curvas de rendimento geradas, parecem se encontrar na altura de desnível 4,2 metros, na qual a tubulação de aço galvanizado, que tinha menos eficiência, passa a ser mais vantajosa. A hipótese apresentada é a de que os fatores que predominam para determinar a eficiência são a rugosidade (menor na tubulação de PVC), que aumenta a perda de carga e a elasticidade do material, que atua absorvendo o golpe de aríete e dessa forma prejudicando o fenômeno (menor na tubulação de aço). Assim, quando estamos trabalhando com pequenos desníveis e menor intensidade do golpe o efeito da baixa rugosidade favorece a tubulação de PVC, mas quando aumentamos a diferença de nível acima do valor mencionado, temos o fator elasticidade prevalecendo e melhorando o desempenho da tubulação de aço galvanizado.

Oliveira *et al.* (2011) testaram a eficiência de carneiros hidráulicos montados utilizando diferentes volumes de câmaras de ar para um sistema com tubulação metálica de diâmetro de 1", onde notou-se uma variação na quantidade de golpes por minuto. O resultado obtido foi uma maior vazão de recalque utilizando câmara de ar de garrafa PET 0,6L (0,416 L/s), em comparação à garrafa PET de 2L (0,348 L/s), a vazão desperdiçada manteve-se proporcional.

De acordo com Cararo *et al.* (2007), que verificaram a eficiência de uma bomba de aríete produzida utilizando conexões de PVC e metálicas, variando o volume da câmara de ar, a abertura de ligação da mesma e a posição da válvula de desperdício, o melhor resultado encontrado foi utilizando garrafa PET de 0,6 L como câmara de ar, com abertura de 25 mm na tampa e uma válvula de desperdício na direção horizontal.

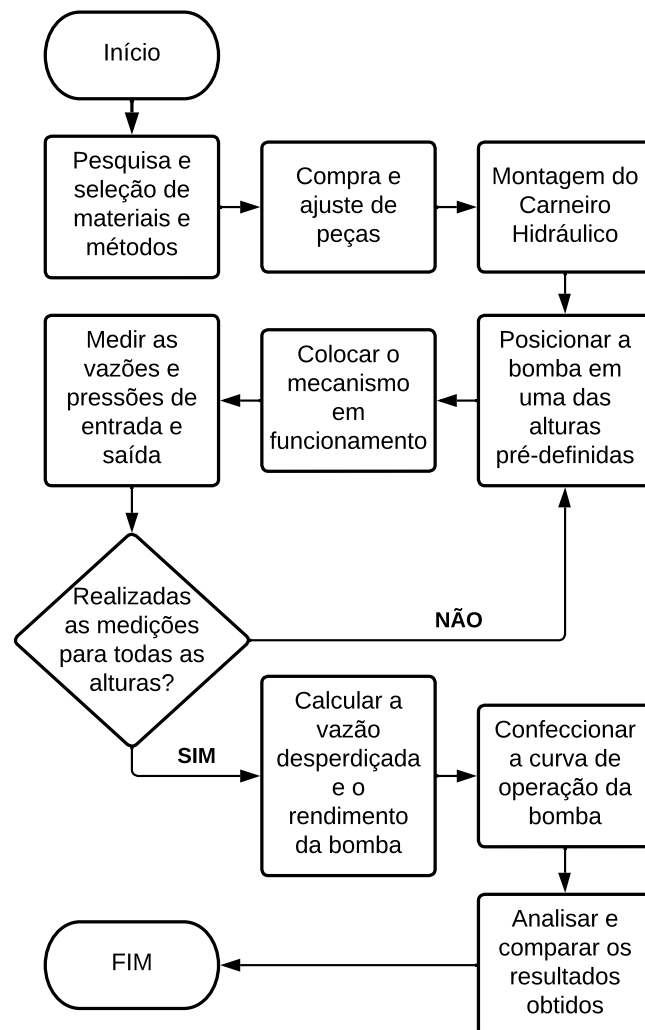
Rojas (2002) realizou diversos ensaios com um modelo de carneiro hidráulico construído com tubulação de PVC (25 mm) e aço (3/4"), utilizando alturas e comprimentos de sucção variados e um mecanismo que permitia o controle eletrônico do tempo de fechamento da válvula de impulso. Os melhores resultados de vazão (224 L/h) e rendimento (62%) obtidos, foram com configurações diferentes mas utilizando um mesmo tempo de fechamento de 0,2 s. Sendo a pressão da tubulação nesses dois resultados, respectivamente 54 kPa e 74 kPa. A altura de alimentação apresentada como satisfatória, foi de 2,23 m.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item, serão abordados os procedimentos realizados para efetuar a montagem da referida bomba de aríete, utilizando os materiais e métodos escolhidos com base nas referências teóricas já abordadas, além de apresentar como o sistema foi instalado, os ensaios realizados e o procedimento de cálculo da curva característica da bomba.

Um fluxograma foi elaborado e é apresentado na Figura 4, de modo a representar de uma maneira geral, os procedimentos a serem realizados neste trabalho, desde as etapas iniciais de recolhimento de informações e aquisição de materiais até as etapas de ensaios, cálculos e preparação de resultados.

Figura 4 – Fluxograma de processos a serem realizados



Fonte: Elaboração própria

3.1 Montagem do carneiro hidráulico com tubulação de aço galvanizado

A partir das considerações da bibliografia consultada, um modelo teórico de bomba de aríete foi idealizado. Sua construção e instalação, bem como as ponderações realizadas durante a elaboração da metodologia, estão descritas nos itens 3.1.1, 3.1.2 e 3.1.3.

3.1.1 Considerações de projeto

Em virtude dos conceitos apresentados anteriormente, acerca da propagação do golpe de aríete ser superior na tubulação metálica, por conta da menor deformação do material, a bomba foi reproduzida utilizando tubos e conexões de aço galvanizado.

Ademais, visando obter uma vazão de recalque de pequeno porte e, com a informação de que a tubulação de sucção deve possuir um ou dois diâmetros comerciais acima da tubulação de recalque, foram utilizados peças e tubos de 1" na construção da bomba, mangueira também de 1" na tubulação de adução e mangueira de 1/2" na tubulação de recalque.

Como tentativa de gerar uma maior coluna de água no recalque, o modelo da bomba foi testado usando configurações com uma e com duas válvulas de desperdício. Com a alteração podendo ser feita a partir da adição de nova parcela de tubulação contendo a válvula extra, através de rosqueamento.

3.1.2 Montagem da bomba

Estão expostas na Tabela 2 as peças que foram utilizadas na construção da bomba, as conexões que não possuem material especificado são de aço galvanizado.

Com os materiais e peças escolhidos, passou-se para a etapa de confecção da bomba. A tubulação de aço galvanizado foi dividida em trechos para efetuar a ligação dos elementos, em cada extremidade de tubulação precisou-se adicionar rosca do tipo NPT, esta foi produzida através de equipamento manual como mostrado na Figura 5. Dado o fato de que a ligação seria feita por meio de rosqueamento, "fita veda rosca" foi utilizada para prevenir vazamentos.

As válvulas de desperdício também precisaram ser produzidas, isto se deu através da modificação de válvulas de pé com crivo, descrita a seguir e ilustrada na Figura 6. Primeiramente, furou-se a extremidade plana da peça superior da válvula (6), realizando em sua parede alguns passos de rosca, onde foi introduzido um parafuso (1) com uma porca externa (2), com função de manter a regulagem, além de uma porca autotravante interna (3), com travamento para suportar a mola de trabalho. Apoiada na parte inferior da válvula e na porca interna, foi posicionada uma mola (4), escolhida para trabalhar sob uma determinada configuração de desnível e vazão. O procedimento foi repetido para obtenção de duas válvulas similares, produzidas com elementos de

Tabela 2 – Quantitativo de itens

Nº	Descrição	Qty.
1	Registro de gaveta em latão - 1"	1
2	Niple duplo - 1"	3
3	Tê - 1"	3
4	Joelho 90º - 1"	1
5	Válvula de pé com crivo em latão - 1"	2
6	Válvula de retenção vertical em latão - 1"	1
7	Tampão - CAP - 1"	1
8	Adaptador para mangueira em plástico - 1"	1
9	Adaptador para mangueira em plástico - 1/2"	1
10	Mangueira flexível aprox. 6 metros - 1"	1
11	Tubulação de aço galvanizado aprox. 1 metro - 1"	1
12	Mangueira flexível aprox. 18 metros - 1/2"	1
13	Garrafa metálica 1,2 litros	1

Fonte: Elaboração Própria

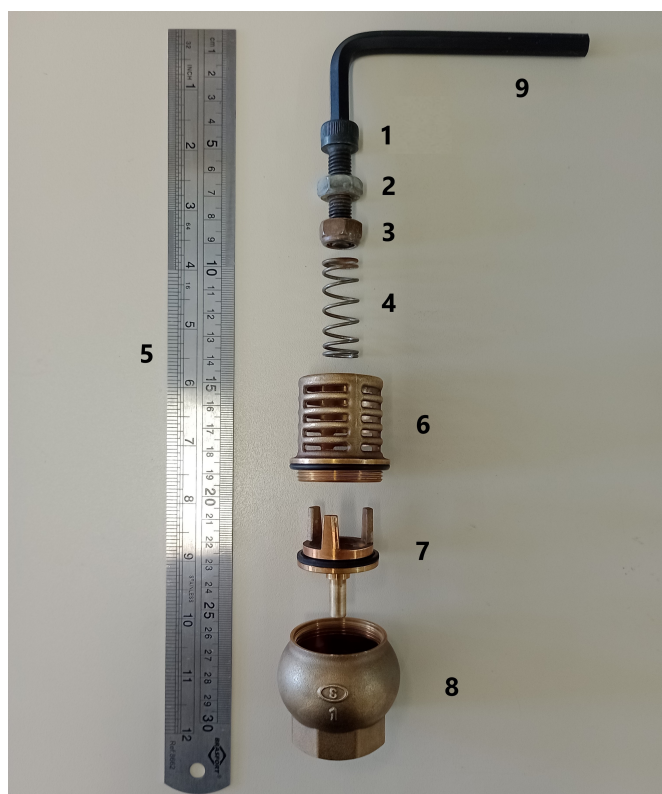
Figura 5 – Execução de rosca NPT na tubulação metálica



Fonte: Elaboração própria

mesmo modelo. Também estão representadas na mesma figura a parte interior da válvula (7), que é móvel; a peça inferior (8), que conecta-se ao carneiro; e uma chave utilizada para regulação (9).

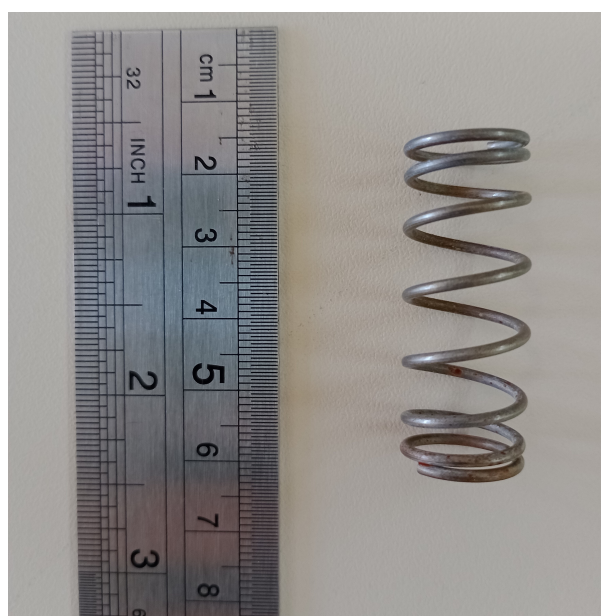
Figura 6 – Componentes da válvula de impulso



Fonte: Elaboração própria

A mola utilizada, representada na Figura 7, foi escolhida com base em suas dimensões (tanto de diâmetro quanto comprimento), além de seu valor de coeficiente elástico adequado, informação esta que foi obtida empiricamente através da comparação de alguns modelos.

Figura 7 – Mola de compressão utilizada



Fonte: Elaboração própria

Para a câmara de compressão de ar, estimou-se um volume necessário com base em outros trabalhos observados. Os primeiros testes foram feitos utilizando somente a garrafa metálica de um extintor de incêndio, com volume de aproximadamente 1,2 L. Este entretanto, mostrou-se pouco eficiente para os propósitos do trabalho, como medida corretiva então, adicionou-se um trecho de tubulação de 50 cm, complementando o volume inicial com aproximados 0,25 L.

Os elementos enumerados na Tabela 2, foram então unidos seguindo a configuração pré-estabelecida, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Carneiro hidráulico montado



Fonte: Elaboração própria

3.1.3 Instalação do sistema

Após a montagem, a bomba foi posicionada nas dependências da UNIPAMPA - Campus Alegrete, onde localiza-se um reservatório de 3000 litros, cedido pela universidade para a realização dos ensaios, apresentado na Figura 9. Este forneceu a alimentação de água para o sistema, de uma maneira que fosse possível medir o desnível inicial, essencial para a caracterização do equipamento. Outra vantagem do reservatório elevado, foi a possibilidade do manutenção constante do nível de água, de modo a assegurar a padronização e repetibilidade dos ensaios.

Figura 9 – Reservatório elevado utilizado



Fonte: Elaboração própria

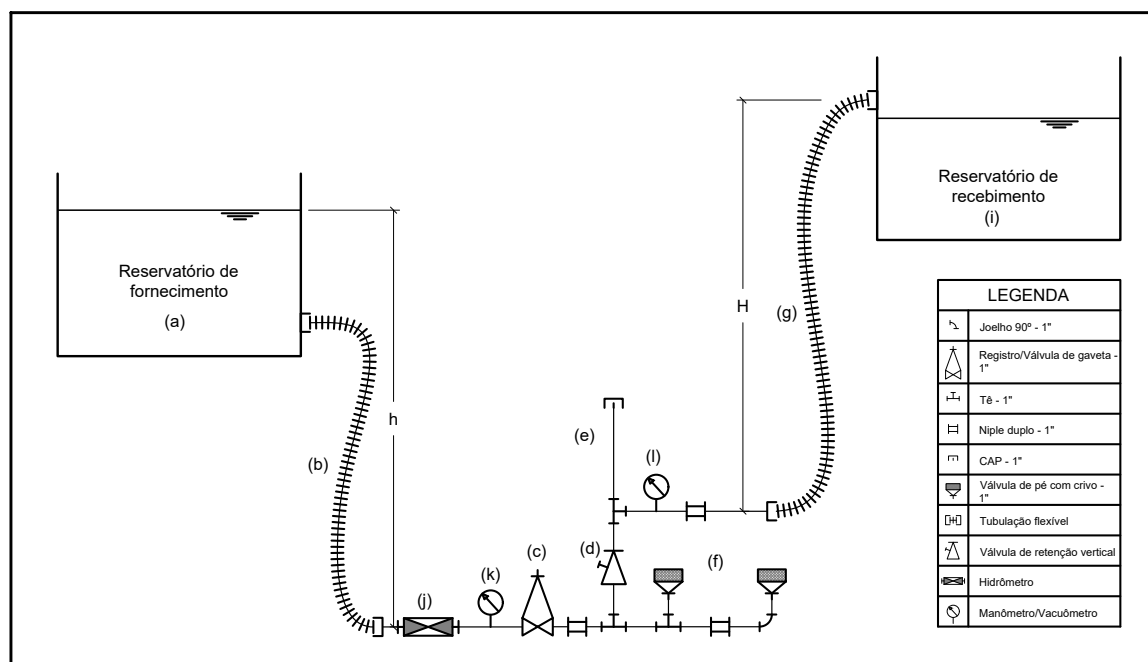
Para possibilitar os ensaios, foi necessário fazer o acréscimo de mais alguns itens ao sistema padrão da bomba de aríete, representado na Figura 3. Assim sendo, um novo sistema foi elaborado especificamente para os propósitos deste trabalho, apresentado na Figura 10.

Após o início da tubulação de aço galvanizado e antes do registro (c), foram anexados um manômetro (k) e um hidrômetro (j), cujos objetivos foram medir respectivamente, a pressão manométrica de entrada na bomba e a vazão de entrada (Q_e). Após a câmara de compressão de ar (e), antes de iniciar a tubulação de recalque (g), também foi adicionado um manômetro (l), responsável pela medição da pressão manométrica de saída da bomba.

Foram utilizadas duas diferentes cotas de posicionamento da bomba (4,8m e 4m). Foi considerada a diferença de nível gerada entre a cota de entrada da bomba e o nível de água do reservatório, medida por meio de manômetro localizado antes do registro de regulagem de vazão, com o sistema em repouso.

Além da medida de desnível, variou-se também a quantia de válvulas de escape, obtendo em teoria, duas bombas com curvas características de funcionamento diferentes.

Figura 10 – Sistema de recalque com elementos de medição



Fonte: Elaboração própria

Os elementos que compõem o sistema da bomba, desde o reservatório, passando pelas peças de medição e sistema de elevação em si, que efetivamente gera o golpe de aríete, representados na Figura 10, contemplam um esquema de funcionamento que pode ser descrito por:

1. A água sai do reservatório (a) e desce pela tubulação de adução (b) através da ação da gravidade;
2. Quando o registro (c) é aberto, o líquido preenche o interior da tubulação da bomba, tendo sua pressão e vazão registradas respectivamente pelo manômetro (k) e pelo hidrômetro (j), localizados a montante, até jorrar pela válvula de escape (f);
3. Assim que a velocidade da água é suficiente para fechar o mecanismo da válvula (f), a interrupção gera um golpe de aríete, fazendo o líquido passar pela válvula de passagem única (d);
4. O ar da câmara de compressão (e) é comprimido pela sobrepressão;
5. Na etapa de depressão, o retorno da água é barrado pela válvula de passagem única (d), tendo então como única rota a tubulação de recalque (g);

6. A água recalçada passa ainda por outro manômetro (I), que irá obter a pressão com que esta é expelida;
7. Saindo da tubulação de recalque, o volume é recolhido pelo reservatório (i) e contabilizado como vazão recalçada.

3.2 Ensaios

De modo a representar corretamente o equipamento produzido, alguns dados essenciais devem ser coletados e, para isso, elaborou-se um modelo de ensaio cujo objetivo foi a obtenção de tais parâmetros durante o efetivo funcionamento da bomba de aríete.

3.2.1 Configuração do sistema

Em uma situação real de uso, um carneiro hidráulico é provido por uma vazão e nível d'água praticamente constantes, como quando instalado em um riacho. Para simular isto durante os ensaios e também para padronizá-los, foi utilizado um reservatório elevado mantido à nível constante, fornecendo assim a vazão e desnível inicial necessários para o efetivo funcionamento.

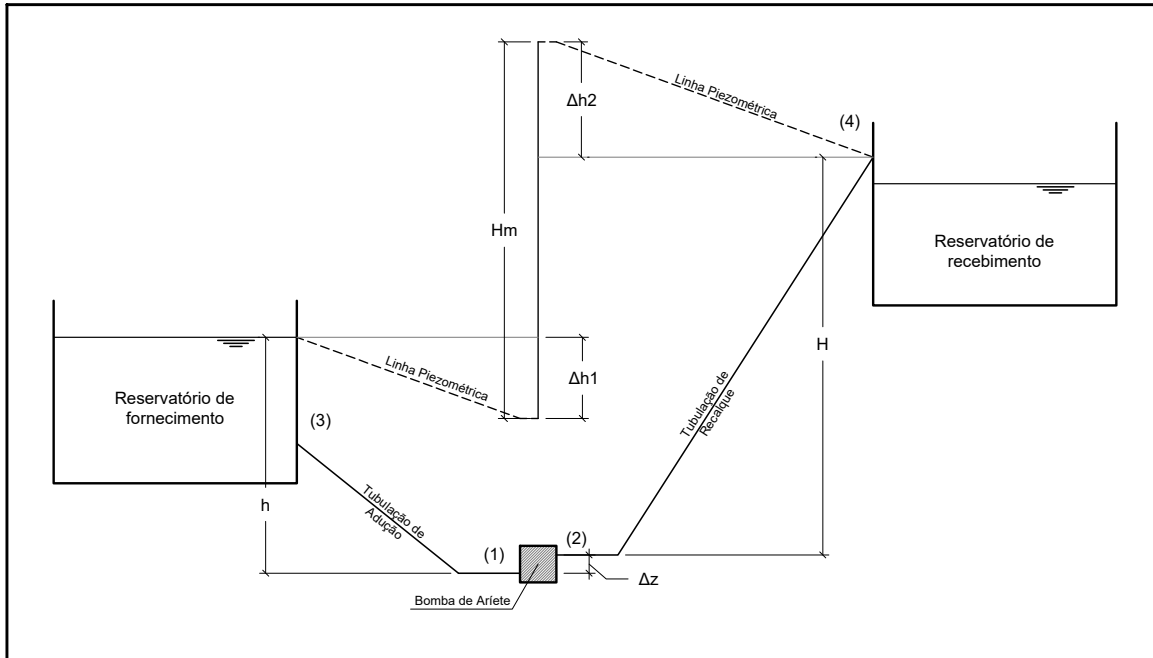
Outro fator importante é a existência de uma pressão mínima na tubulação de recalque, superior à pressão estática fornecida a montante, fazendo com que a válvula de passagem única se mantenha fechada até que ocorra o golpe. Assim, fez-se necessário que a mangueira de recalque fosse içada à uma altura superior ao nível de água do reservatório, neste caso utilizou-se um suporte com 6 metros de altura para realizar essa elevação. Este dado é muito importante, pois influencia diretamente na altura manométrica gerada pela bomba.

De maneira similar, para alcançar uma representação mais intensa, com uma pressão superior, próxima à uma situação real de uso, na extremidade final da tubulação de recalque foi instalada uma torneira, tornando possível diminuir a vazão de saída. O registro da torneira foi mantido levemente aberto, porém constante, durante os procedimentos de ensaio.

Para a obtenção da altura manométrica de recalque da bomba, isto é, quanta pressão, em metros de coluna d'água, o carneiro hidráulico em questão é capaz de gerar, foi utilizada a Equação da Energia (3.1). Esta relaciona a energia presente em dois pontos distintos de um mesmo sistema, representado na Figura 11, neste caso, um ponto (1) localizado antes do registro de abertura e o um segundo ponto (2) localizado após a saída da bomba, antes do início da tubulação de recalque.

- I. Aplicando então, a Equação da Energia nos pontos (1) e (2), temos a seguinte expressão:

Figura 11 – Representação da linha piezométrica de um sistema de recalque



Fonte: Elaboração própria

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + H_m = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h \quad (3.1)$$

Onde:

z_1 : Energia de posição antes da bomba

z_2 : Energia de posição depois da bomba

$\frac{p_1}{\gamma}$: Pressão interna antes da bomba

$\frac{p_2}{\gamma}$: Pressão interna depois da bomba

$\frac{v_1^2}{2g}$: Energia cinética antes da bomba

$\frac{v_2^2}{2g}$: Energia cinética depois da bomba

H_m : Altura manométrica gerada pelo sistema

Δh : Perda de carga do sistema

II. No cálculo desta equação, a velocidade de saída da bomba não será considerada igual à de entrada, por consequência, a energia cinética é variável:

$$\frac{v_1^2}{2g} \neq \frac{v_2^2}{2g} \quad (3.2)$$

III. A perda de carga do sistema pode ser considerada incluída na medição de diferença de pressão entre os dois manômetros, dessa forma:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + H_m = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (3.3)$$

IV. A altura manométrica de recalque da bomba, pode ser expressa então pela diferença de pressão manométrica nos dois pontos mais a diferença de carga cinética mais a diferença de nível entre eles:

$$H_m = \left(\frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} \right) + \left(\frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} \right) + \Delta z \quad (3.4)$$

3.2.2 Ajustes de funcionamento

Ao executar os primeiros testes com o sistema completo, verificou-se que a presença do hidrômetro no sistema causa grande perda de carga inicial, o que acaba inviabilizando o ensaio. Assim, optou-se por realizar os ensaios sem registrar o volume de entrada, com a medida de vazão de entrada sendo feita posteriormente, em um sistema contemplando apenas o reservatório, hidrômetro, manômetro e registro (fazendo uso das aberturas padrões utilizadas nos ensaios com a bomba), este sistema foi ilustrado na Figura 13 e pode ser visualizado na Figura 12, sendo descrito por:

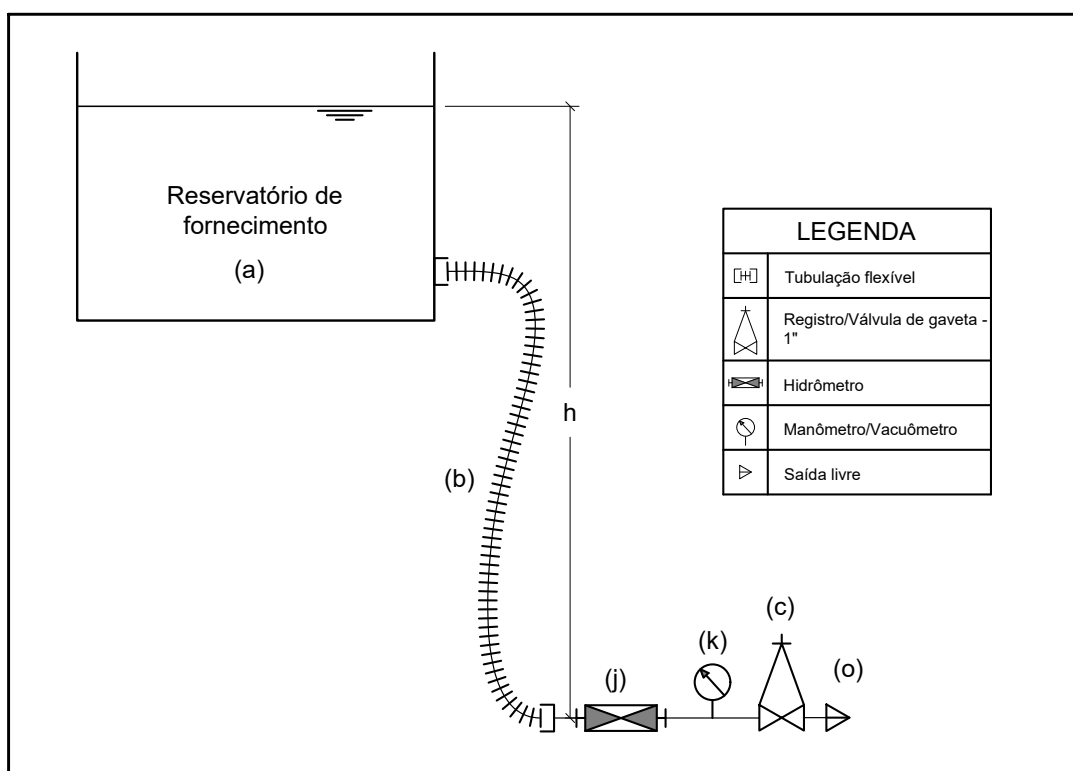
- De forma bastante similar ao sistema utilizando o carneiro hidráulico, uma mangueira de 1" (b), foi acoplada ao reservatório (a) até a altura (h), de utilização do equipamento.
- Sua extremidade foi então conectada à um trecho de tubulação contendo um manômetro (k), o registro (c) utilizado nos ensaios anteriores e um hidrômetro (d).
- A água desce pela tubulação de recalque (b), passa pelo trecho de tubulação e pode ser coletada para o cálculo da vazão por volumetria na saída livre (o).
- O registro (c) foi ajustado para cada uma das pré-configurações e realizaram-se leituras de vazão suficientes para obter-se confiabilidade dos resultados.

Figura 12 – Composição para cálculo da vazão de entrada - Q_e



Fonte: Elaboração própria

Figura 13 – Sistema para obtenção das vazões padrões de entrada



Fonte: Elaboração própria

Percebeu-se também, que o equipamento mostra-se bastante sensível à alterações, mudanças no sistema durante os ensaios (contato brusco com a tubulação, movimentação, interrompimento parcial da vazão de recalque ou adução etc.), podem provocar o interrompimento dos golpes ou ainda, a perda da configuração ideal de funcionamento.

Foi necessário um cuidado extra para que houvesse mínimo contato com o sistema enquanto realizavam-se as medições, para garantir a padronização dos resultados.

Outra informação importante, obtida durante a execução da configuração do equipamento, é de que estando a bomba em repouso por algum tempo, faz-se necessário iniciá-la, através da execução manual de alguns golpes. Para isso, utilizou-se uma configuração de mola próxima ao funcionamento ideal e então produziu-se alguns golpes iniciais com a ação de afrouxar e apertar ciclicamente o mecanismo da mola, até que o golpe gerado fosse capaz de manter seu funcionamento de forma autônoma e constante. Isto se deve principalmente por conta da necessidade de uma pressão contrária ao golpe, gerada por uma coluna de água na tubulação de recalque, a bomba de aríete trabalha de forma gradual, elevando aos poucos o nível da coluna d'água gerada, até conseguir vencer o desnível e extravasar na extremidade de recalque.

3.2.3 Procedimentos de campo

Com a realização dos ensaios, foram obtidos os valores utilizados posteriormente na construção das curvas de operação e apresentação dos resultados. Para cada posição a qual a bomba foi submetida, isto é, cada diferente altura de sucção, foram realizadas tentativas de medições com oito configurações de vazão, definidas através da abertura do registro de gaveta (1), representado na Figura 8.

A pressão no ponto (1) da Figura 11, isto é, imediatamente antes da bomba, foi medida pelo manômetro (k), presente na Figura 10. Em ensaio a parte, foi obtida também a vazão que chega na bomba, vinda do reservatório. Em virtude do fenômeno do golpe de aríete, o manômetro da saída da bomba (l), ilustrado pela Figura 10, está sujeito a pressões positivas e negativas, entretanto, o valor utilizado é sempre o positivo, pois busca-se a pressão de recalque. Também por conta do movimento cíclico, um hidrômetro comum encontra dificuldades para realizar a medição da vazão recalçada, por isso, esta foi calculada através de método volumétrico, coletando a água que sai da tubulação de recalque em um determinado intervalo de tempo.

A vazão de desperdício, isto é, aquela que é despejada pela válvula de escape durante o funcionamento, pôde ser calculada através da diferença entre a vazão de entrada medida no hidrômetro e a vazão recolhida após o recalque.

A frequência de batimentos por minuto (BPM), foi medida manualmente durante a execução dos ensaios, através da contagem de golpes em determinado intervalo, normalmente de um minuto. A técnica de medição desse parâmetro, também foi utilizada para verificar a estabilidade do funcionamento pois, enquanto instável, o carneiro hidráulico produz golpes inconstantes, aumentando ou diminuindo a frequência com o tempo.

Falando propriamente da execução dos ensaios, o carneiro hidráulico foi posicionado primeiramente na configuração de maior desnível, onde foram feitos os

testes e configuração inicial. Seu funcionamento foi então ajustado para cada vazão pré-determinada, procurando manter a frequência de golpes na configuração que fornecesse maior altura recalçada.

Antes de iniciar a volumetria, aguardou-se um tempo de estabilização da frequência e comportamento da bomba. Realizaram-se no mínimo três medições para cada configuração de vazão, de modo a aumentar a confiabilidade dos resultados.

As vazões padrões utilizadas foram obtidas mantendo o registro totalmente aberto e então fechando-o certa quantidade de meia-voltas. Esse método de regulação se tornou mais vantajoso pois não necessitou-se descobrir a primeira vazão de funcionamento para cada configuração, começando-se sempre em uma vazão possível de trabalho. Foram feitas três repetições de medição para cada vazão de trabalho, os resultados apresentados posteriormente são portanto, valores médios. Após realizadas as medições em todas as vazões disponíveis, o sistema foi convertido para outra configuração de funcionamento e assim seguiu-se até que todas as opções pretendidas fossem executadas.

3.3 Curva característica da bomba desenvolvida

A construção da curva da bomba foi realizada relacionando os resultados de altura manométrica gerada para cada diferente vazão testada em uma mesma configuração. Como abordado anteriormente, ao variar os parâmetros como pressão inicial (desnível geométrico) e quantidade de válvulas de impulso, podemos considerar a mesma bomba possuindo diversas curvas características, uma para cada configuração utilizada.

Foi verificado também, o rendimento obtido em cada configuração, utilizando duas das maneiras descritas por Das (1989, *apud* ABATE; BOTREL, 2002). O método volumétrico relaciona apenas as vazões de entrada e saída, conforme apresentado na Equação 3.5. E o método de D'Aubisson, que relaciona a vazão e altura de abastecimento, com a vazão e altura de recalque, descrito na Equação 3.6.

$$\eta_1 = \left(\frac{Q_r}{Q_e} \right) * 100 \quad (3.5)$$

Onde:

η_1 : Relação entre vazões de entrada e saída, em determinada configuração

Q_r : Vazão recalçada pela bomba

Q_e : Vazão de entrada da bomba

$$\eta_2 = \left(\frac{Q_r * H}{Q_e * h} \right) * 100 \quad (3.6)$$

Onde:

η_2 : Rendimento da bomba em determinada configuração

Q_r : Vazão recalçada pela bomba

Q_e : Vazão de entrada da bomba

h : Diferença de nível entre o topo do reservatório de abastecimento e a entrada do carneiro hidráulico

H : Altura de recalque gerada pelo carneiro hidráulico

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a realização dos ensaios, foram coletados dados pertinentes ao trabalho, sendo estes: pressão de saída, vazão de entrada, volume recalado em determinado período de tempo e número de batidas por minuto.

4.1 Realização dos ensaios

Cabe aqui ressaltar que, para obter um funcionamento efetivo e satisfatório variando os parâmetros mencionados, foi necessário realizar a regulação da bomba, através do mecanismo de configuração da válvula de impulso, para cada situação de ensaio.

Eventualmente, mesmo possuindo uma ampla região de funcionamento, a bomba de aríete submetida a determinadas condições, como vazão de entrada ou coluna de água na tubulação de recalque muito baixas, não apresentou regulação que possibilitasse sua utilização. A elevação mínima que deve ser aplicada à tubulação de recalque, foi encontrada como sendo próxima ao desnível fornecido à bomba no abastecimento, de modo a equiparar as pressões.

De acordo com os testes realizados, para os desníveis iniciais aplicados, a primeira altura de recalque, com funcionamento, foi 4,5 metros, valor que posteriormente foi elevado para 6 metros, visando um aumento de eficiência. A utilização desta elevação da tubulação de recalque é viável para a realização dos ensaios, mas não representa muito bem uma situação real de uso, onde a altura de elevação tende a ser superior a essa. A adoção deste parâmetro foi influenciada pela limitação física imposta pelas condições nas quais os ensaios foram realizados.

A solução utilizada para calcular a vazão de entrada (Q_e), certamente não é a ideal, visto que a medição não é feita com um carneiro hidráulico em efetivo funcionamento. Porém, dada a impossibilidade de realização de novos ensaios completos, alguns testes foram feitos para comparar as vazões obtidas pelo método aqui descrito e pelo método volumétrico (recolhimento da vazão de desperdício e de recalque), constatou-se que os resultados obtidos não possuem diferença significativa para implicar na não utilização dos dados.

4.2 Apresentação dos dados de ensaio

Conforme mencionado, a vazão de entrada (Q_e), foi mantida entre as vazões pré-estabelecidas, que foram medidas separadamente e estão expressas na Tabela 3, a cada configuração foi atribuída um número, com propósitos identificativos.

Tabela 3 – Vazões pré-definidas (L/min)

Nº	Configuração do registro	Qe
0	Totalmente aberto	33,42
1	Menos meia-volta	33,27
2	Menos duas meias-voltas	32,93
3	Menos três meias-voltas	32,76
4	Menos quatro meias-voltas	32,67
5	Menos cinco meias-voltas	32,59
6	Menos seis meias-voltas	32,31
7	Menos sete meias-voltas	32,22

Fonte: Elaboração própria

A partir dos dados coletados, foi possível realizar os cálculos para obtenção dos parâmetros de apresentação. A média da vazão de recalque (Q saída), a altura manométrica gerada (Hm) e o rendimento da bomba naquela configuração calculado de duas formas distintas (η_1 e η_2), conforme Equações 3.5 e 3.6, estão dispostos nas Tabelas 4, 5, 6 e 7. Os dados completos, coletados e também calculados, encontram-se em tabelas, apresentadas nos Anexos A, B, C e D.

Tabela 4 – Parâmetros de apresentação - 4,8 m - 1 válvula

Nº	BPM	Q saída (L/min)	Hm (m)	η_1 %	η_2 %
0	71	3,08	18,190	9,22	34,95
1	70	2,94	17,674	8,85	32,58
2	67	2,90	17,158	8,81	31,50
3	70	2,99	17,159	9,12	32,60
4	73	2,73	16,643	8,34	28,93
5	75	2,68	15,610	8,21	26,70
6	72	2,60	15,094	8,04	25,27
7	70	2,31	14,578	7,16	21,74

Fonte: Elaboração própria

Pode-se observar que a bomba obtém melhor funcionamento com vazões elevadas, sendo que de todas, a vazão nº 0 possui os maiores valores de altura manométrica (Hm). Pela maneira como o sistema funciona, há indicações de que Hm aumentaria continuamente, acompanhando o aumento da vazão.

Tabela 5 – Parâmetros de apresentação - 4,8 m - 2 válvulas

Nº	BPM	Q saída (L/min)	Hm (m)	η_1 %	η_2 %
0	68	3,02	19,740	9,03	37,16
1	72	2,92	17,674	8,78	32,32
2	74	2,94	17,158	8,92	31,90
3	74	2,90	17,159	8,85	31,63
4	67	2,87	17,159	8,78	31,39
5	70	2,87	16,643	8,80	30,51
6	73	2,78	16,127	8,61	28,94
7	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6 – Parâmetros de apresentação - 4 m - 1 válvula

Nº	BPM	Q saída (L/min)	Hm (m)	η_1 %	η_2 %
0	65	2,49	14,573	7,45	22,63
1	68	2,53	14,574	7,61	23,10
2	70	2,54	14,059	7,70	22,56
3	66	2,48	13,543	7,57	21,35
4	66	2,62	13,543	8,03	22,67
5	67	2,63	13,027	8,08	21,92
6	66	2,57	12,511	7,96	20,75
7	65	2,54	12,511	7,89	20,58

Fonte: Elaboração própria

Ocorrem grandes alterações nos valores de rendimento entre as vazões de uma mesma configuração. A maior diferença encontra-se na configuração 4,8 m - 1 válvula (Tabela 4), onde nota-se uma visível queda do rendimento para menores vazões. Entre configurações no entanto, nota-se que a adição de outra válvula de desperdício gera um aumento no rendimento, principalmente na altura de 4 m (Tabelas 6 e 7).

Enquanto isso, a relação entre vazões (η_1), também segue uma tendência de aumento com a adição de outra válvula, ainda que menor. Esse método de cálculo parece não representar o completo funcionamento da bomba de aríete, uma vez que não leva em conta o aumento de energia potencial gerada.

Em relação à frequência de batidas por minuto (BPM), não parece haver amos-

Tabela 7 – Parâmetros de apresentação - 4 m - 2 válvulas

Nº	BPM	Q saída (L/min)	Hm (m)	η_1 %	η_2 %
0	66	2,78	16,123	8,31	27,90
1	68	2,70	15,607	8,10	26,35
2	66	2,68	14,575	8,13	24,69
3	65	2,71	14,576	8,26	25,10
4	66	2,60	13,543	7,96	22,45
5	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

tragem suficiente para definir um padrão comportamental, pela análise dos dados. Durante a configuração da bomba, buscou-se ajustá-la para o melhor funcionamento e, embora ocorram alterações, os valores mantiveram-se significativamente próximos. Ainda assim, é possível notar que utilizando um desnível de 4,8 m (Tabelas 4 e 5), a bomba atinge seu ápice de funcionamento à um ritmo mais rápido, com valores de BPM maiores. Além disso, durante a execução dos ensaios e mais precisamente, configuração do mecanismo, percebeu-se que o aumento da vazão para uma mesma posição da mola, causa um aumento no ritmo de batidas, embora não necessariamente melhores resultados nos parâmetros de recalque.

A influência da válvula extra, limitando o funcionamento da bomba, pode ser visualizada nas Tabelas 5 e 7. Na altura de 4,8 m, ocorre a impossibilidade de funcionamento com a menor vazão (nº 7), enquanto que na altura mais crítica, de 4 m, não foi encontrada regulagem a partir da vazão nº 5. Salienta-se que foi possível executar o golpe de aríete nas configurações mencionadas, entretanto, o ciclo não conseguia manter-se constante e acabava por cessar.

4.3 Análise gráfica

Utilizando os dados obtidos e apresentados anteriormente, foi possível construir gráficos que relacionam esses parâmetros.

Primeiramente, a relação entre vazão recalçada (Qr) e altura manométrica gerada (Hm), conhecida como curva de operação da bomba de aríete, está representada nas Figuras 14, 16, 18 e 20. Foi incluída também uma linha de tendência linear, que aproxima-se do comportamento da bomba naquela configuração e intervalos de medição, mas não deve ser utilizada para prever o funcionamento para outros espec-

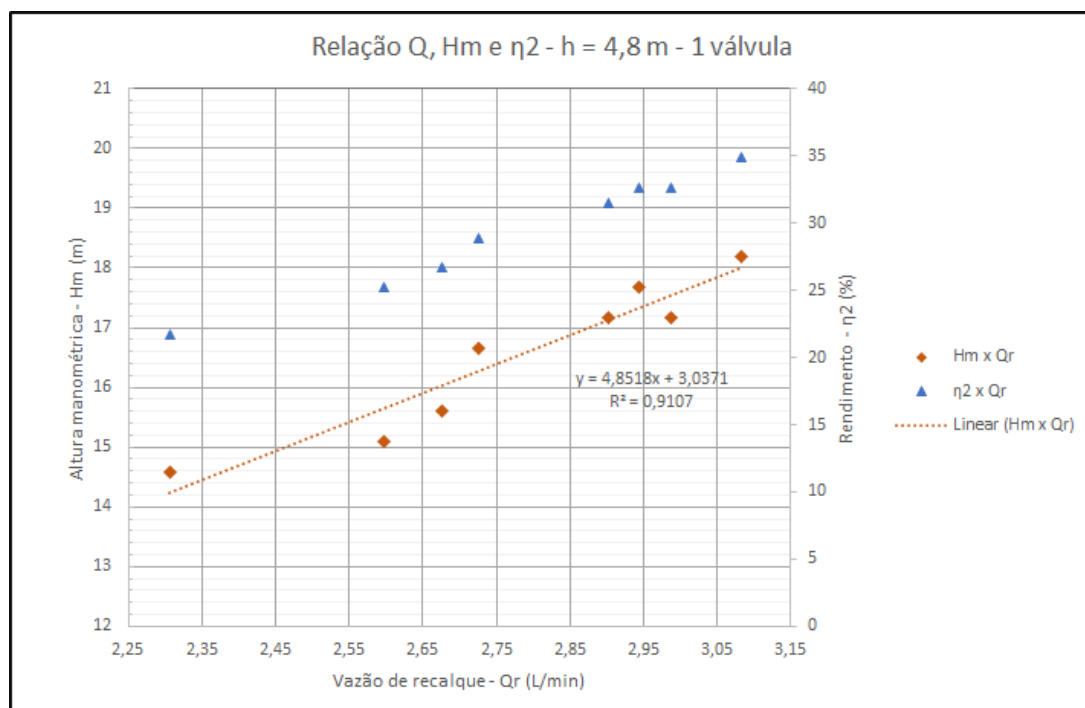
tros de vazão e altura manométrica. Ainda que esta apresente resultados reais, sua visualização está um pouco comprometida, pois como mencionado durante a metodologia, a vazão de saída foi limitada com uma torneira, para simular um desnível maior, aumentando assim a altura manométrica, o que gerou um intervalo de vazões bastante reduzido.

Como tentativa de facilitar a compreensão do funcionamento da bomba, foram confeccionados também, gráficos com a relação entre vazão de entrada na bomba (Q_e) e a altura manométrica gerada (H_m), representados nas Figuras 15, 17, 19 e 21, dessa forma o crescimento de H_m é acompanhado pelo aumento da vazão utilizada.

Ao observarmos os gráficos, podemos notar que a região de atuação da bomba testada, isso é, o espectro de vazão de entrada e saída medido, parece não contemplar uma grande parte do funcionamento, visto que a altura de recalque (H_m) mantém-se aumentando em conjunto com o aumento de vazão (Q_e e Q_r), o comportamento diferente visualizado na Figura 18, pode ser reflexo da pequena amplitude de vazão obtida nos ensaios.

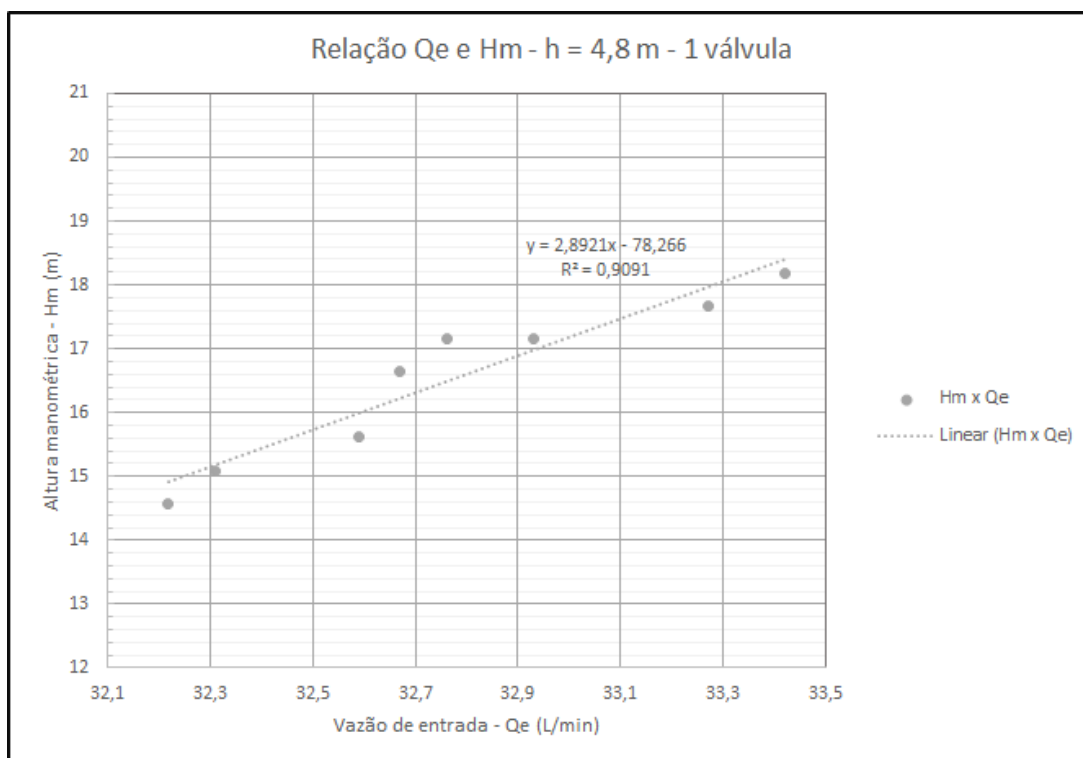
Alguns resultados possuem poucos pontos para análise, em função da impossibilidade de realização dos ensaios naquela região, como observado nas Figuras 20 e 21.

Figura 14 – Relação vazão de recalque e altura manométrica - 4,8m - 1 válvula



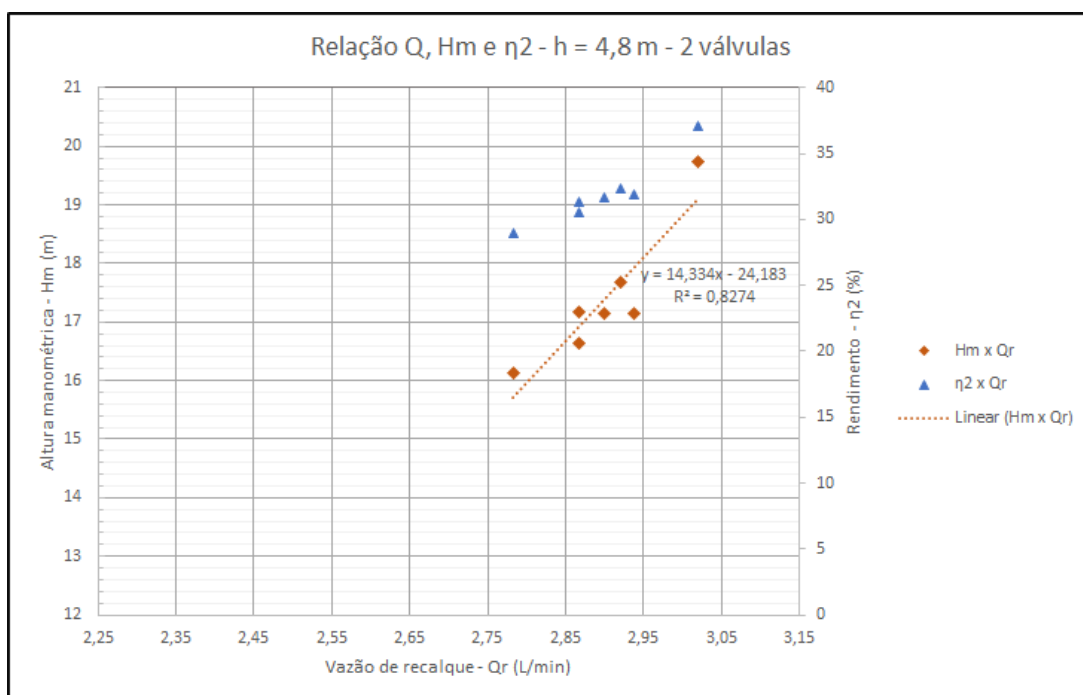
Fonte: Elaboração própria

Figura 15 – Relação vazão de entrada e altura manométrica - 4,8m - 1 válvula



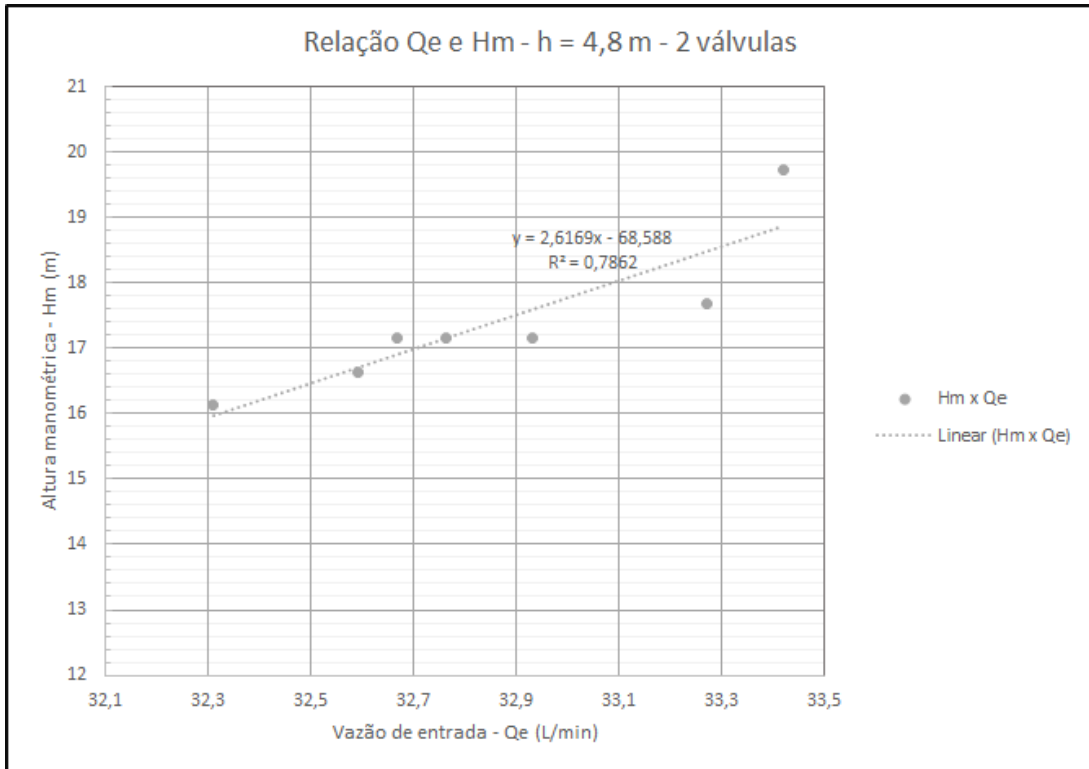
Fonte: Elaboração própria

Figura 16 – Relação vazão de recalque e altura manométrica - 4,8m - 2 válvulas



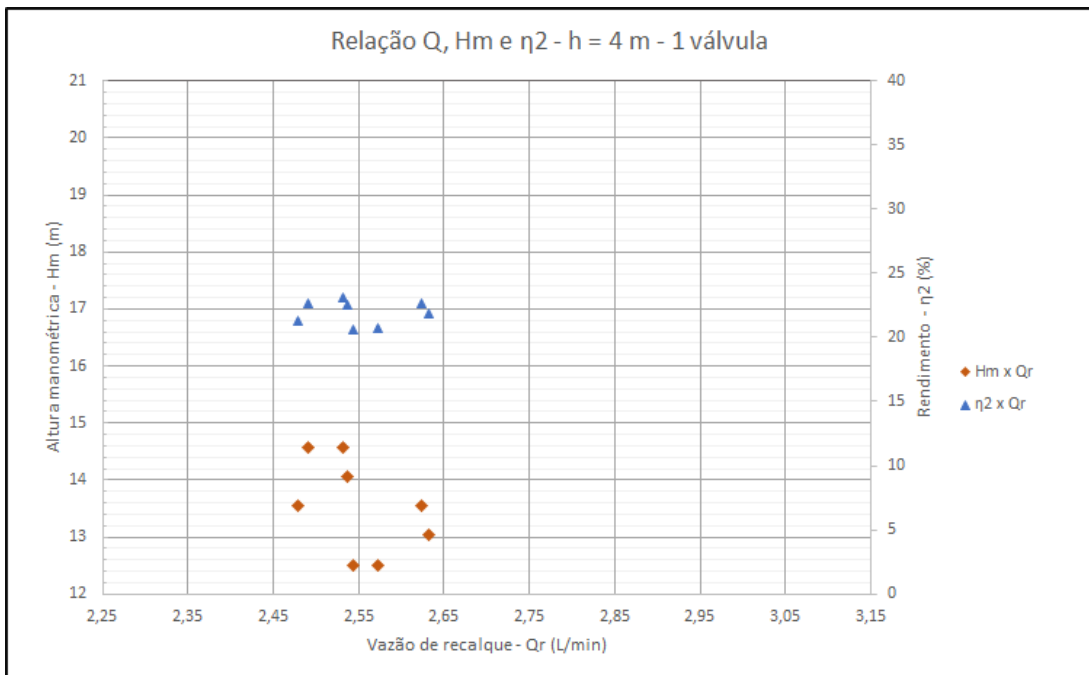
Fonte: Elaboração própria

Figura 17 – Relação vazão de entrada e altura manométrica - 4,8m - 2 válvulas



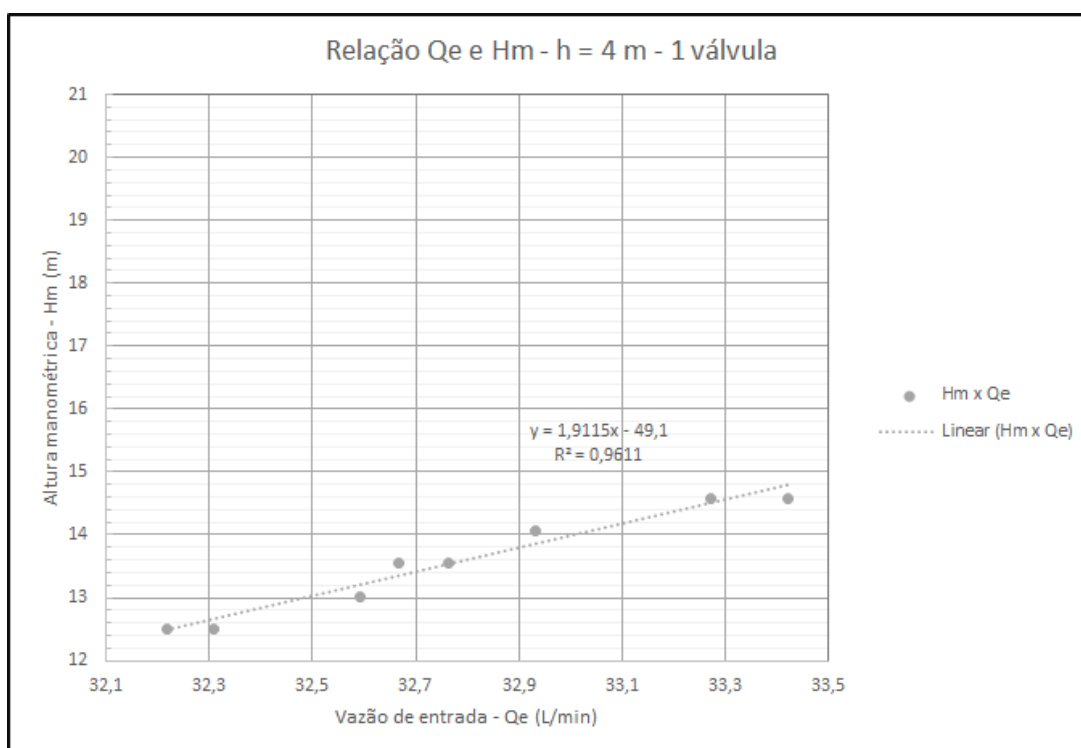
Fonte: Elaboração própria

Figura 18 – Relação vazão de recalque e altura manométrica - 4m - 1 válvula



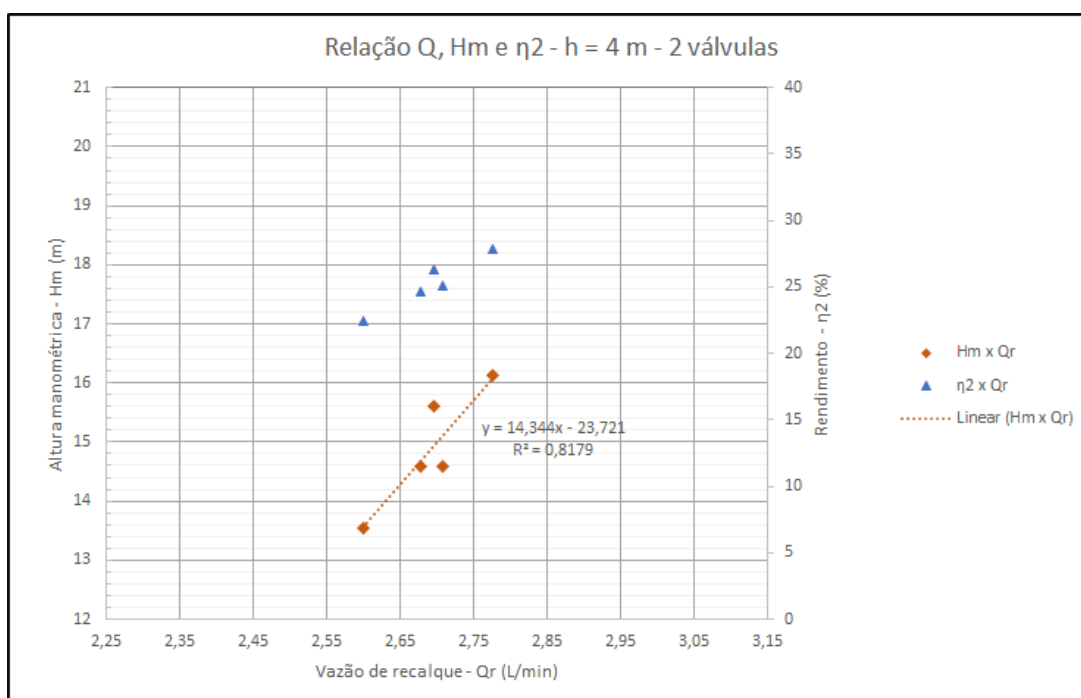
Fonte: Elaboração própria

Figura 19 – Relação vazão de entrada e altura manométrica - 4m - 1 válvula



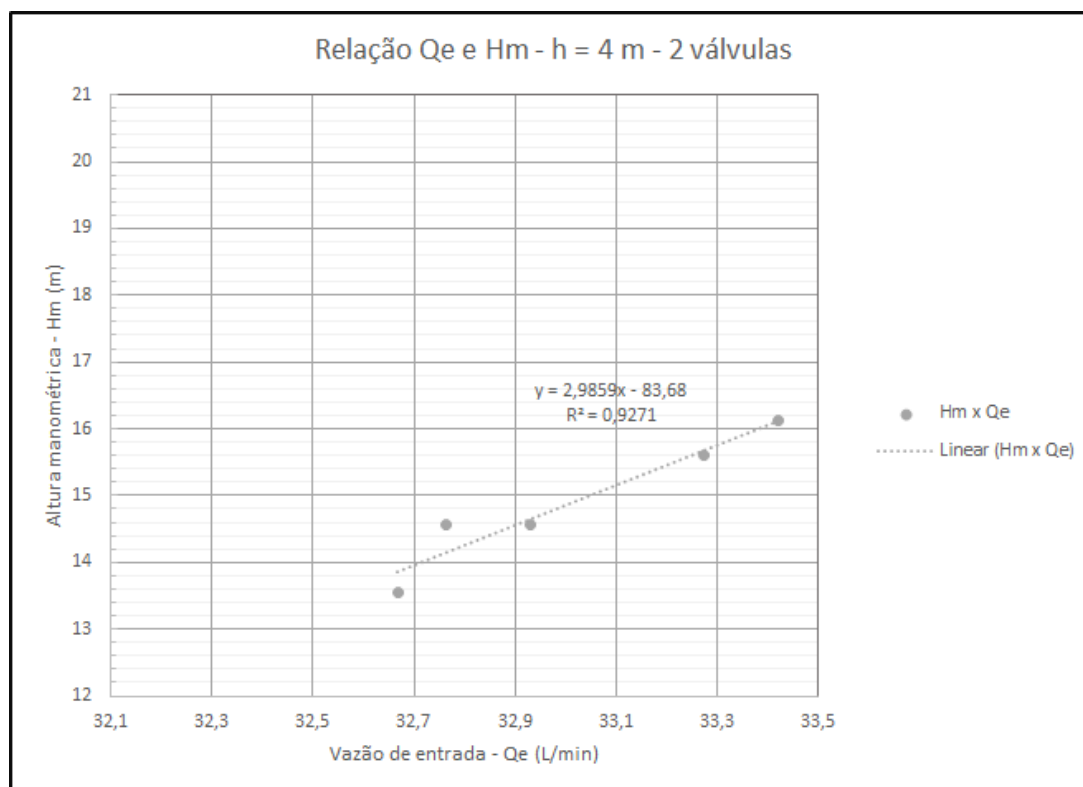
Fonte: Elaboração própria

Figura 20 – Relação vazão de recalque e altura manométrica - 4m - 2 válvulas



Fonte: Elaboração própria

Figura 21 – Relação vazão de entrada e altura manométrica - 4m - 2 válvulas



Fonte: Elaboração própria

4.4 Comparação com outros autores

A comparação com trabalhos anteriores é uma ferramenta de análise importante, dessa forma é possível visualizar os resultados obtidos com relação às situações semelhantes. Quando tratam-se de bombas de aríete, normalmente temos grandes variações de características construtivas, sejam de material, diâmetro ou configuração de sistema. Portanto, ainda que seja possível realizar a comparação, esta deve ser ponderada pelo manutenção das proporções.

Para este trabalho, buscou-se na medida do possível, relacionar equipamentos e configurações próximos dos utilizados. Foram selecionados alguns resultados apresentados por Ziliel (2017), uma vez que os ensaios dos dois trabalhos foram realizados na mesma locação, aos quais acrescentou-se também resultados obtidos pela literatura já mencionada no Capítulo 2, denotado na Tabela 8.

Não são expressas nessa tabela, as diferenças de material, volume de câmara de ar, quantidade de válvulas de impulso, características cruciais que trazem grande influência aos resultados, sendo este um dos principais motivos da dificuldade em relacionar resultados entre autores. Entretanto, podemos mesmo assim observar que os resultados obtidos no presente trabalho, foram bastante satisfatórios, em termos de vazão recalçada e altura manométrica gerada, quando observamos diâmetros próximos de tubulação de sucção (s) e recalque (r).

Ainda sobre a Tabela 8, podemos sustentar o argumento de que o carneiro hidráulico produzido possui ainda grande potencial a ser explorado, visto que alguns resultados utilizando configurações próximas, alcançaram uma altura manométrica bastante superior à gerada aqui.

Tabela 8 – Comparativo de resultados com outros autores

Autor	ϕ (mm)	Q sucção (L/min)	Q recalque (L/min)	h (m)	Hm (m)
Globo Rural	25	-	1 a 2	-	10h
	32	-	2 a 4,2	-	10h
	50	-	6,7 a 10	-	10h
Abate e Botrel	40s; 20r	-	3,49	2,1	15,54
	40s; 20r	-	6,68	3,8	31,51
	40s; 20r	-	6,12	4,7	35,06
Adão Evangelista	32s; 25r	7 a 15	2,4	3,5	h + Δ h
	32s; 25r	7 a 15	2,18	2,9	h + Δ h
	32s; 25r	7 a 15	1,76	2	h + Δ h
Barojas e Xotlanihua	40s; 32r	-	6	9	60
	40s; 20r	-	4,5	4	10
Ziliel	32s; 20r	5,96	1,7	2	4,6
	32s; 20r	8,7	1,95	2,9	5,8
	32s; 20r	8,9	2,05	3,5	6,3
Cararo et. al.	50s; 12,7r	21,28 e 46,81	0,58 a 11,76	4,6	5 a 50
Oliveira et. al.	(in)	(L/min)	(L/min)	(m)	(m)
	1s; 1/2r	59,4	25,2	2,5	1,7
Perius	1s; 1/2r	52	20,4	2,5	1,5
	1s; 1/2r	33,42	3,08	4,8	17,46
	1s; 1/2r	33,42	3,02	4,8	18,96
	1s; 1/2r	33,42	2,49	4	13,96
	1s; 1/2r	33,42	2,78	4	15,46

Fonte: Adaptado de Ziliel (2017)

4.5 Custo de confecção do carneiro hidráulico utilizado

As peças finais utilizadas na montagem da bomba de aríete estão dispostas na Tabela 9. Foram excluídos os valores referentes às peças utilizadas na medição e

realização dos ensaios, com hidrômetros e manômetros, de modo a apresentar um valor próximo ao real custo de confecção da bomba em si. Não estão incluídos serviços de entrega, instalação ou ajustes (como a execução de roscas nas tubulações e a modificação das válvulas de impulso).

Tabela 9 – Orçamento de materiais

Descrição	Qnt.	Preço Unitário
Registro de gaveta bruto - 1"	1	R\$ 56,39
Niple duplo galvanizado - 1"	2	R\$ 7,60
Tee galvanizado - 1"	3	R\$ 13,95
Joelho galvanizado 90º - 1"	1	R\$ 10,87
Válvula de pé com crivo - 1"	2	R\$ 51,89
Válvula de retenção vertical em latão - 1"	1	R\$ 75,51
Tampão galvanizado - 1"	1	R\$ 6,52
Adaptador para mangueira	2	R\$ 7,50
Mola de compressão	2	R\$ 16,00
Conjunto de parafuso e porcas	2	R\$ 15,00
	Total	R\$ 387,12

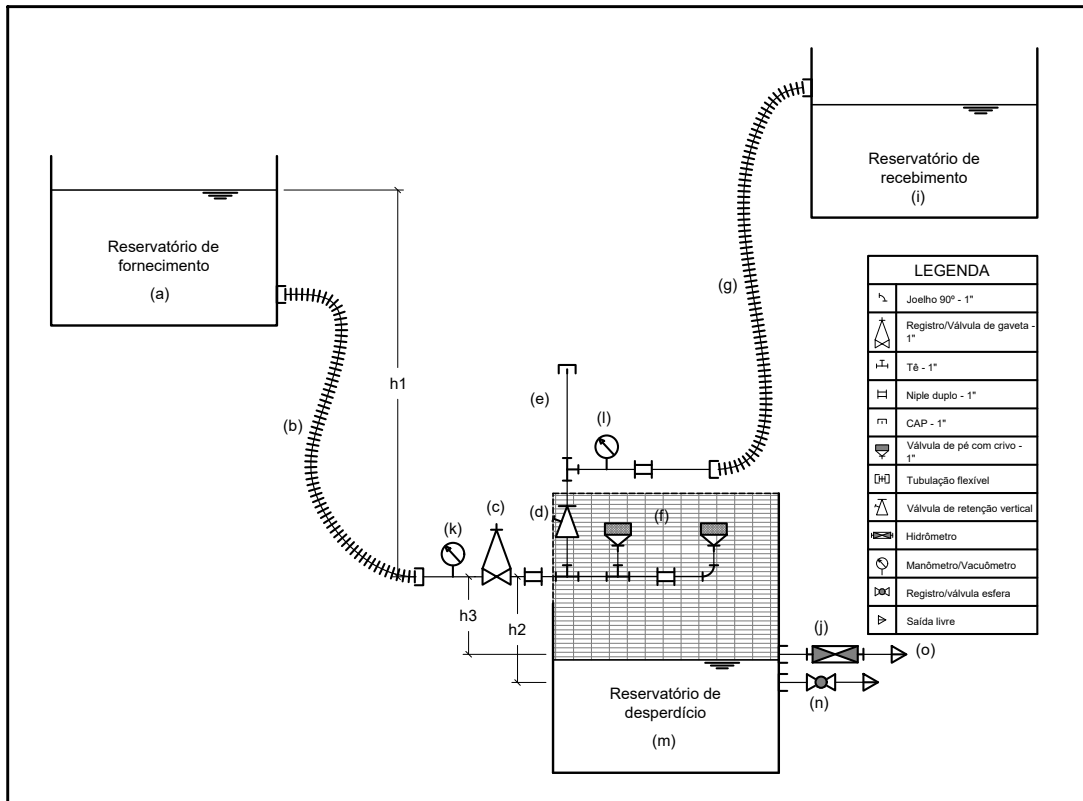
Fonte - Elaboração própria

4.6 Possível método de ensaio com coleta da vazão de desperdício

Buscando aprimorar o sistema de ensaio e considerando que coletar a vazão de desperdício parece apresentar-se como uma solução mais exata para a obtenção da vazão de entrada (Q_e), haja visto as observações apresentadas anteriormente, um esquema foi elaborado, adaptando o sistema utilizado neste trabalho, que poderá mostrar-se adequado a esse propósito para futuros trabalhos com foco nessa área, ele é apresentado na Figura 22.

A ideia base é de que o carneiro hidráulico seja posicionado imóvel sobre um terceiro reservatório (m), de modo que a água liberada pelas válvulas de impulso seja coletada por ele. Esse volume de água preenche e aumenta o nível do reservatório que, ao atingir a altura (h_2), irá extravasar pela tubulação inferior, cujo registro (n) deve estar aberto, possibilitando a regulagem e estabilização da bomba. Ao iniciar o ensaio, o registro (n) deve ser fechado, para que o nível de água suba até a altura (h_3), sendo então medida pelo hidrômetro (j) em caso de altas vazões, ou recolhida para execução de volumetria, pela saída livre (o) em casos de baixa vazão.

Figura 22 – Sistema com coleta da vazão de desperdício



Fonte: Elaboração própria

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A bomba de aríete desenvolvida neste trabalho, mostrou-se bastante eficiente nas configurações utilizadas. Além de demonstrar possuir potencial para ampliar em muito a altura manométrica gerada, através do aumento da tubulação de recalque (em desnível e também distância). Como esperado, a configuração que gerou mais altura manométrica foi a de 4,8 metros de desnível, utilizando duas válvulas de desperdício, com quase 19 metros de coluna d'água gerados (Hm).

Ao observar os resultados dos ensaios e principalmente a ausência de alguns valores por impossibilidade de regulagem, pode-se constatar que a configuração mínima de funcionamento foi alcançada para a bomba com duas válvulas de impulso, sendo esta vazão de menos 5 meia-voltas no registro (conforme padrão adotado), ou aproximadamente 0,543 L/s em um desnível de 4 metros.

A variação das batidas por segundo (pulso), parece ser insuficiente para admitir relação direta com aumento de altura manométrica enquanto é induzida uma alteração de vazão de entrada. A frequência ideal para a bomba em questão, parece se encontrar próxima a 66 batidas por minuto, ainda que para algumas configurações, a maior altura manométrica foi encontrada em valores ligeiramente maiores ou menores.

A adição de uma segunda válvula de impulso causou, de maneira geral, um aumento na altura manométrica gerada (Hm), ao custo de diminuição na vazão de recalque. Isto pode ser sustentado, além dos resultados gráficos, pela análise visual durante os ensaios, onde era possível observar um aumento na vazão de desperdício e também pelo fato de que a vazão fornecida à bomba tornou-se insuficiente nas configurações mais escassas, com duas válvulas.

O rendimento da bomba, em termos de porcentagem de vazão recalçada, seguiu uma tendência geral de redução conforme diminuição da vazão de entrada. Ademais, manteve-se entre 19% e 36%, valor relativamente baixo em comparação a outros trabalhos. Esse rendimento inferior pode ter sido gerado também pela simulação de elevação no nível de recalque, uma vez que ambos estão relacionados diretamente com a vazão recalçada.

De forma similar, como já mencionado, o método utilizado para obtenção da vazão de entrada (Q_e), não é o ideal e certamente causou alterações nos resultados, principalmente de rendimento. Portanto, espera-se que o rendimento real de uma bomba de aríete com as configurações utilizadas, seja na verdade superior ao descrito neste trabalho, pois a vazão de entrada real, obtida com o carneiro hidráulico em funcionamento, é menor que a calculada.

Por fim, como sugestões para futuros trabalhos, destaca-se:

- Coleta da vazão de desperdício utilizando o sistema proposto no item 4.6;

- Ensaio utilizando bomba similar, mas com incremento da tubulação de recalque (em diferença de nível e comprimento);
- Estudo da influência da dimensão da câmara de ar nas propriedades de recalque, a partir de qual valor o movimento cíclico se torna possível e qual o volume ideal a ser utilizado;
- Utilização do sistema de geração de golpe com pesos no lugar de mola. Pois esse sistema traz a vantagem da regulação facilitada, não havendo necessidade de encontrar uma mola compatível com as configurações definidas. Além da durabilidade maior, ocorrendo pouco desgaste do mecanismo;
- Elevar efetivamente a tubulação de recalque à altura manométrica gerada, obtendo a real capacidade da bomba, visto que a mesma melhora seu desempenho conforme o aumento da coluna de água do recalque.

REFERÊNCIAS

ABATE, C.; BOTREL, T. A. Carneiro hidráulico com tubulação de alimentação em aço galvanizado e em pvc. **Scientia Agricola**, SciELO Brasil, v. 59, p. 197–203, 2002.

ARIES. 2022. *In*: **Glosbe, Dicionário Online**. Disponível em: <<https://pt.glosbe.com/la/pt/aries>>.

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

BONETTI, T. *et al.* Alternativas visando potencializar o uso do carneiro hidráulico no bombeamento de água das chuvas. **MOSTRA NACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA INTERDISCIPLINAR (MICTI)**, IX, p. 1–5, 2016.

CARARO, D. C. *et al.* Características construtivas de um carneiro hidráulico com materiais alternativos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 11, p. 349–354, 2007.

NETTO, A. *et al.* **Manual de Hidráulica**. São Paulo: Editora Blücher, 1998.

OLIVEIRA, J. *et al.* Construção e avaliação de equipamento para bombeamento de água tipo “carneiro hidráulico alternativo”. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 13, 2011.

OLIVEIRA, T. J. C. d.; SOUZA, T. M. d. Eficiência do carneiro hidráulico para bombeamento de água. *In*: UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP). **Congresso de extensão universitária da UNESP**. [S.l.], 2015. p. 1–4.

ONUBR. **Água potável: direito humano fundamental**. 2010. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/55564-agua-potavel-direito-humano-fundamental>>. Acesso em: 15 de julho 2022.

_____. **ONU: 1 em cada 3 pessoas no mundo não tem acesso à água potável**. 2011. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/83447-onu-1-em-cada-3-pessoas-no-mundo-nao-tem-acesso-agua-potavel>>. Acesso em: 16 de julho 2022.

_____. **Relatório estima que 8% da população não terá acesso à energia em 2030**. 2022. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/184580-relatorio-estima-que-8-da-populacao-nao-tera-acesso-energia-em-2030>>. Acesso em: 16 de julho 2022.

PONSONI, J. A. *et al.* Aplicabilidade do carneiro hidráulico na construção civil. **Artigo apresentado no 3º SNCS – Seminário Nacional de Construções Sustentáveis**, Núcleo de Estudo e Pesquisa em Edificações Sustentáveis (IMED), Passo Fundo, p. 10, nov. 2014.

ROJAS, R. N. Z. **Modelagem, otimização, construção e avaliação de um protótipo de carneiro hidráulico**. 2002. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2002.

TIAGO FILHO, G. L. Carneiro hidráulico: o que é e como construí-lo. **Itajubá: CERPCH–Centro Nacional de Referência em Pequenos Aproveitamentos Hidroenergéticos**, 2002.

ZILIEL, F. K. **Montagem e funcionamento de uma bomba de aríete.** 2017.

ANEXO B – TABELA DE RESULTADOS - 4,8 M - 2 VÁLVULAS

BPS	BPM	Registro	Vazão saída (volumétrico)			Vazão de entrada Qe	Vazão desperdício		v entrada m/s	v saída m/s	E cinética entrada m	E cinética saída m	P entrada m	P saída m	Hm	Pontos da curva			n1 %	n3 %	n2 %	ΔHm m	ΔQ L/min	Δη2 %	
			V	t	Q		L/s	L/s								Q	Hm	Q							Hm
1,133	68	Totalmente aberto	3	59,12	0,0507	0,557	0,5063	1,099	0,100	0,06159	0,00051	19,740	3,02	19,740	19,740	19,740	33,42	9,04	30,92	37,16	1,55	-0,062	2,21		
			3	60,45	0,0496		0,5074	1,099	0,098	0,06159	0,00049	24,281	19,740	19,740											
			3	59,28	0,0506		0,5064	1,099	0,100	0,06159	0,00051	4,8	19,740	19,740											
1,200	72	Menos 1 meia volta	3	61,71	0,0486	0,555	0,5059	1,094	0,096	0,06104	0,00047	17,674	2,92	17,674	17,674	17,674	33,27	8,78	25,81	32,32	0,00	-0,024	-0,26		
			3	60,68	0,0494		0,5051	1,094	0,098	0,06104	0,00049	22,214	17,674	17,674											
			3	62,53	0,0480		0,5066	1,094	0,095	0,06104	0,00046	4,8	17,674	17,674											
1,233	74	Menos 2 meia voltas	3	61,14	0,0491	0,549	0,4998	1,083	0,097	0,05980	0,00048	17,158	2,94	17,158	17,158	17,158	32,93	8,92	25,22	31,90	0,00	0,036	0,39		
			3	62,02	0,0484		0,5005	1,083	0,095	0,05980	0,00046	21,698	17,158	17,158											
			3	60,63	0,0495		0,4994	1,083	0,098	0,05980	0,00049	4,8	17,158	17,158											
1,233	74	Menos 3 meia voltas	3	61,77	0,0486	0,546	0,4975	1,078	0,096	0,05919	0,00047	17,159	2,90	17,159	17,159	17,159	32,76	8,85	25,00	31,63	0,00	-0,088	-0,96		
			3	61,6	0,0487		0,4973	1,078	0,096	0,05919	0,00045	21,698	17,159	17,159											
			3	62,91	0,0477		0,4984	1,078	0,094	0,05919	0,00045	4,8	17,159	17,159											
1,117	67	Menos 4 meia voltas	3	63,52	0,0472	0,544	0,4972	1,075	0,093	0,05885	0,00044	17,159	2,87	17,159	17,159	17,159	32,67	8,78	24,78	31,39	0,52	0,142	2,46		
			3	62,06	0,0483		0,4961	1,075	0,095	0,05885	0,00046	21,698	17,159	17,159											
			3	62,71	0,0478		0,4966	1,075	0,094	0,05885	0,00045	4,8	17,159	17,159											
1,167	70	Menos 5 meia voltas	3	61,8	0,0485	0,543	0,4946	1,072	0,096	0,05857	0,00047	16,643	2,87	16,643	16,643	16,643	32,59	8,80	23,81	30,51	1,03	0,192	3,81		
			3	63,14	0,0475		0,4957	1,072	0,094	0,05857	0,00045	21,181	16,643	16,643											
			3	63,37	0,0473		0,4958	1,072	0,093	0,05857	0,00044	4,8	16,643	16,643											
1,217	73	Menos 6 meia voltas	3	64,37	0,0466	0,539	0,4919	1,063	0,092	0,05757	0,00043	16,127	2,78	16,127	16,127	16,127	32,31	8,61	22,24	28,94	1,03	0,187	3,67		
			3	63,85	0,0470		0,4915	1,063	0,093	0,05757	0,00044	20,665	16,127	16,127											
			3	65,83	0,0456		0,4929	1,063	0,090	0,05757	0,00041	4,8	16,127	16,127											
															Médias		0,59	0,055	1,62						

ANEXO C – TABELA DE RESULTADOS - 4 M - 1 VÁLVULA

BPS	BPM	Registro	Vazão saída (volumétrico)			Vazão de entrada Qe L/s	Vazão desperdício L/s	v entrada m/s	v saída m/s	E cinética entrada m	E cinética saída m	P entrada m	P saída m	Hm m	Pontos da curva		n1 %	n3 %	n2 %		
			V	t	Q										Q	L/min				Hm	Qe
1,083	65	Totalmente aberto	3	73,09	0,0410	0,557	0,516	1,0993	0,0610	0,06159	0,00033	4,8	19,115	14,57	2,49	14,573	7,45	16,40	22,63		
			3	70,99	0,0423		0,515	1,0993	0,0834	0,06159	0,00035									14,57	33,42
			3	72,73	0,0412		0,516	1,0993	0,0814	0,06159	0,00034									14,57	
1,133	68	Menos 1 meia volta	3	71,92	0,0417	0,555	0,513	1,0944	0,0823	0,06104	0,00035	4,8	19,115	14,57	2,53	14,574	7,61	16,77	23,10		
			3	69,97	0,0429		0,512	1,0944	0,0846	0,06104	0,00036									14,57	33,27
			3	71,47	0,0420		0,513	1,0944	0,0828	0,06104	0,00035									14,57	
1,167	70	Menos 2 meia voltas	3	73,44	0,0408	0,549	0,508	1,0832	0,0806	0,05980	0,00033	4,8	18,598	14,06	2,54	14,059	7,70	16,09	22,56		
			3	67,86	0,0442		0,505	1,0832	0,0872	0,05980	0,00039									14,06	32,93
			3	71,86	0,0417		0,507	1,0832	0,0824	0,05980	0,00035									14,06	
1,100	66	Menos 3 meia voltas	3	73,24	0,0410	0,546	0,505	1,0776	0,0808	0,05919	0,00033	4,8	18,081	13,54	2,48	13,543	7,57	14,91	21,35		
			3	72,2	0,0416		0,504	1,0776	0,0820	0,05919	0,00034									13,54	32,76
			3	72,37	0,0415		0,505	1,0776	0,0818	0,05919	0,00034									13,54	
1,100	66	Menos 4 meia voltas	3	69,09	0,0434	0,544	0,501	1,0745	0,0857	0,05885	0,00037	4,8	18,081	13,54	2,62	13,543	8,03	15,91	22,67		
			3	69,49	0,0432		0,501	1,0745	0,0852	0,05885	0,00037									13,54	32,67
			3	67,22	0,0446		0,500	1,0745	0,0881	0,05885	0,00040									13,54	
1,117	67	Menos 5 meia voltas	3	69,33	0,0433	0,543	0,500	1,0720	0,0854	0,05857	0,00037	4,8	17,565	13,03	2,63	13,027	8,08	15,06	21,92		
			3	67,69	0,0443		0,499	1,0720	0,0875	0,05857	0,00039									13,03	32,59
			3	68,17	0,0440		0,499	1,0720	0,0869	0,05857	0,00038									13,03	
1,100	66	Menos 6 meia voltas	3	70,15	0,0428	0,539	0,496	1,0627	0,0844	0,05757	0,00036	4,8	17,048	12,51	2,57	12,511	7,96	13,90	20,75		
			3	69,92	0,0429		0,496	1,0627	0,0847	0,05757	0,00037									12,51	32,31
			3	69,84	0,0430		0,496	1,0627	0,0848	0,05757	0,00037									12,51	
1,083	65	Menos 7 meia voltas	3	70,88	0,0423	0,537	0,495	1,0597	0,0835	0,05724	0,00036	4,8	17,048	12,51	2,54	12,511	7,89	13,77	20,58		
			3	71,35	0,0420		0,495	1,0597	0,0830	0,05724	0,00035									12,51	32,22
			3	70,1	0,0428		0,494	1,0597	0,0845	0,05724	0,00036									12,51	

ANEXO D – TABELA DE RESULTADOS - 4 M - 2 VÁLVULAS

BPS	BPM	Registro	Vazão saída (volumétrico)			Vazão de entrada Qe	Vazão desperdício	v entrada m/s	v saída m/s	E cinética entrada	E cinética saída	P entrada m	P saída m	Hm	Pontos da curva		η1	η3	η2	ΔHm	ΔQ	Δη2	
			V	t	s										Q	L/s							Q
1,100	66	Totalmente aberto	3	64,89	0,0462	0,557	0,5108	1,0993	0,09124	0,06159	0,00042	4,8	20,665	16,12	2,78	16,123	8,31	21,37	27,90	1,55	0,285	5,27	
			3	65,03	0,0461		0,5109	1,0993	0,09104	0,06159	0,00042												16,12
			3	64,61	0,0464		0,5106	1,0993	0,09164	0,06159	0,00043												16,12
1,133	68	Menos 1 meia volta	3	67,5	0,0444	0,555	0,5101	1,0944	0,0877	0,06104	0,00039	4,8	20,148	15,61	2,70	15,607	8,10	19,86	26,35	1,03	0,165	3,25	
			3	66,43	0,0452		0,5094	1,0944	0,0891	0,06104	0,00040												15,61
			3	66,35	0,0452		0,5093	1,0944	0,0892	0,06104	0,00041												15,61
1,100	66	Menos 2 meia voltas	3	68,58	0,0437	0,549	0,5051	1,0832	0,0863	0,05980	0,00038	4,8	19,115	14,58	2,68	14,575	8,13	18,03	24,69	0,52	0,142	2,14	
			3	66,59	0,0451		0,5038	1,0832	0,0889	0,05980	0,00040												14,58
			3	66,53	0,0451		0,5038	1,0832	0,0890	0,05980	0,00040												14,58
1,083	65	Menos 3 meia voltas	3	66,22	0,0453	0,546	0,5007	1,0776	0,0894	0,05919	0,00041	4,8	19,115	14,58	2,71	14,576	8,27	18,35	25,10	1,03	0,229	3,75	
			3	66,52	0,0451		0,5010	1,0776	0,0890	0,05919	0,00040												14,58
			3	66,67	0,0450		0,5011	1,0776	0,0888	0,05919	0,00040												14,58
1,100	66	Menos 4 meia voltas	3	67,9	0,0442	0,544	0,5003	1,0745	0,0872	0,05885	0,00039	4,8	18,081	13,54	2,60	13,543	7,96	15,75	22,45	0,00	-0,025	-0,22	
			3	69,65	0,0431		0,5014	1,0745	0,0850	0,05885	0,00037												13,54
			3	70,23	0,0427		0,5017	1,0745	0,0843	0,05885	0,00036												13,54
														Médias		0,83	0,159	2,84					