

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LENON COSTA DIAS

**AValiação DO EFEITO DO VOLUME DA CÂMARA DE AR COMBINADO COM A FREQUÊNCIA
DE BOMBEAMENTO EM UM CARNEIRO HIDRÁULICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2020

LENON COSTA DIAS

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DO VOLUME DA CÂMARA DE AR COMBINADO COM
A FREQUÊNCIA DE BOMBEAMENTO EM UM CARNEIRO HIDRÁULICO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. MsC. Roberto Nunes da Costa

PATO BRANCO

2020

FOLHA DE APROVAÇÃO

Avaliação do efeito do volume da câmara de ar combinado com a frequência de bombeamento em um carneiro hidráulico

Lenon Costa Dias

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 25/11/2020 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Fabio Rodrigo Mandello Rodrigues
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Me. Joviano Janjar Casarin
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Me. Roberto Nunes da Costa
(UTFPR – Departamento de Mecânica)
Orientador

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Valdenir de Souza Dias e Ivani da Glória Costa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter chegado até aqui, aos meus pais pelo apoio incondicional, aos meus irmãos queridos, aos grandes amigos que fiz ao longo deste curso, aos professores que puderam partilhar do seu conhecimento e contribuir para minha formação, ao Baja pela experiência extra acadêmica incrível, aos servidores da UTFPR Pato Branco que sempre me atenderam muito bem, agradeço de coração a todos que contribuíram e me ajudaram a chegar até aqui.

EPÍGRAFE

Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.
(NEWTON, Sir Isaac).

RESUMO

DIAS, Lenon Costa. Avaliação do efeito do volume da câmara de ar combinado com a frequência de bombeamento em um carneiro hidráulico. 2020. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020.

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da variação de volume da câmara de ar combinado com a frequência de bombeamento em um carneiro hidráulico, construído de PVC, com diâmetro de 1” na entrada e ½” na saída da bomba em uma situação de instalação real na zona rural. Foram utilizados cinco volumes diferentes de câmara de ar e avaliada a performance da bomba quanto à eficiência e vazão máxima combinadas com diferentes faixas de operação. A regulagem da válvula de impulso determinou a frequência de bombeamento do carneiro hidráulico e pôde-se encontrar para cada volume de câmara de ar uma frequência ideal, que resultou em melhor desempenho da bomba. Os testes mostraram que há influência direta da frequência de operação tanto na vazão recalçada quanto na eficiência do carneiro hidráulico (CH), porém não houve influência significativa do volume da câmara de ar na eficiência do CH. Para volumes da câmara menores que 140mL houve uma diferença significativa de vazão em relação a câmaras de ar maiores, sendo que a partir da câmara 3 (380mL) houve pequena variação de parâmetros de desempenho concordando com outros trabalhos na área. Pôde-se então considerar haver um volume mínimo para construção de cada carneiro hidráulico, sendo acima disso deve-se considerar critérios econômicos e de margem de segurança. A maior vazão encontrada foi de 0,938L/min para uma frequência de 60 batidas por minuto da válvula de impulso utilizando a câmara 3 (380mL) e a maior eficiência foi encontrada para as câmaras 1 e 3 com 57% para uma frequência de 90 batidas por minuto.

Palavras-chave: Carneiro hidráulico. Bomba aríete. Golpe de aríete. Bomba d’água. Bomba hidráulica alternativa.

ABSTRACT

DIAS, Lenon Costa. Evaluation of the effect of the volume of the air chamber combined with the frequency of pumping in a ram pump. 2020. 65 f. Course Conclusion Paper - Mechanical Engineering Course Federal Technological University of Paraná, Pato Branco, 2020.

This work aimed to evaluate the effect of the volume variation of the air chamber combined with pumping frequency in a hydraulic ram, made of PVC, with a diameter of 1 " at the inlet and $\frac{1}{2}$ " at the pump outlet in a situation of real installation in the countryside. Five different chamber volumes were used and a pump performance was evaluated for efficiency and maximum flow combined with different operating ranges. The adjustment of the impulse valve determined a frequency of pumping of the hydraulic ram and it was possible to find an ideal frequency for each air chamber, which resulted in the best performance of the pump. The tests showed that influence the frequency of operation both in the repressed flow and in the efficiency of the hydraulic ram (CH), however there was no reduction in the volume of the air chamber in the CH efficiency. For chamber volumes less than 140mL there was a significant difference of flow rate in relation to larger air chambers, and from chamber 3 (380mL) there was little variation in performance parameters in agreement with other works in the area. It can then be considered that there is a minimum volume for construction of each hydraulic ram, being above that it should consider economic categories and margin of safety. The highest flow rate found was 0.938L / min for a frequency of 60 beats per minute from the impulse valve using chamber 3 (380mL) and the highest efficiency was found for chambers 1 and 3 with 57% for a frequency of 90 beats per minute. minute.

Keywords: Ram pump. Hydram. Water hammer. Water pump. Alternative hydraulic pump.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração de carneiro hidráulico	15
Figura 2 – Carneiro hidráulico manual de John Whitehurst.....	16
Figura 3 – Carneiro hidráulico original dos irmãos Montgolfier.....	16
Figura 4 – Instrumento de guerra antigo chamado "aríete"	17
Figura 5 – Exemplo esquematizado de instalação de um carneiro hidráulico	18
Figura 6 – Esquema de instalação simplificado	19
Figura 7 – Ilustração válvulas.....	22
Figura 8 – Fechamento brusco – golpe de aríete.....	24
Figura 9 – Detalhe da deformação elástica das lâminas de fluido	25
Figura 10 – Fases da onda de sobrepressão e depressão	26
Figura 11 – Exemplo de válvula de impulso com mola ajustável	30
Figura 12 – Esquemas de válvulas de impulso com regulagem utilizando diferentes massas.....	30
Figura 13 – Fases do bombeamento.....	31
Figura 14 – Diagrama esquemático de um CH	32
Figura 15 – Exemplos de velocidade de bloqueio real e analítica para duas alturas de alimentação	34
Figura 16 – Exemplo de curvas de vazão e eficiência de um CH em uma simulação	36
Figura 17 – Local de captação e entrega	40
Figura 18 – Detalhe local da fonte, mina d'água (esquerda), início da tubulação de alimentação (centro), CH instalado (direita).....	41
Figura 19 – Caminho da tubulação de recalque a partir do CH.....	41
Figura 20 – Detalhe do caminho da tubulação de recalque até o reservatório.....	42
Figura 21 – Esquema simplificado da instalação local	42
Figura 22 – CH desmontado e suas partes.....	43
Figura 23 – Foto do carneiro hidráulico montado utilizado no experimento	45
Figura 24 – Desenho esquemático de montagem da válvula de impulso modificada	45
Figura 25 – Detalhe da válvula de impulso adaptada e suas partes	46
Figura 26 – Detalhe da regulagem da válvula de impulso.....	46

Figura 27 – Câmaras fabricadas com diferentes volumes: câmara 1(0,070L), câmara 2 (0,140L), câmara 3 (0,380L), câmara 4 (1,220L), câmara 5 (9,000L)	47
Figura 28 – Dispositivo de coleta da vazão q_4 (à esquerda) e coleta da vazão q_4 em andamento (à direita)	49
Figura 29 – Dimensões da válvula utilizada como válvula de impulso antes da adaptação.....	64
Figura 30 – Dimensões da válvula utilizada como válvula de recalque.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diâmetros de entrada e de saída.	19
Tabela 2 – Especificações carneiro hidráulico comercial.	20
Tabela 3 – Porcentagem de água aproveitada.....	20
Tabela 4 – Lista de materiais utilizados para montagem do CH	44
Tabela 5 – Comparativo de preço carneiro PVC versus comercial.	44
Tabela 6 – Relação das câmaras de ar e seus respectivos volumes após fabricação.	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comportamento Câmara 1 (70mL)	51
Gráfico 2 – Comportamento Câmara 2 (140mL)	51
Gráfico 3 – Comportamento Câmara 3 (380mL)	52
Gráfico 4 – Comportamento Câmara 4 (1220mL)	52
Gráfico 5 – Comportamento Câmara 5 (9000mL)	52
Gráfico 6 – Vazão q_7 para diferentes volumes de câmara	53
Gráfico 7 – Eficiência para diferentes volumes de câmara	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivo geral	13
1.2 Objetivos específicos	13
1.3 justificativa	13
1.4 Estrutura do trabalho	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 CARNEIRO HIDRÁULICO	15
2.2 REQUISITOS LOCAIS, COMPONENTES E RENDIMENTO	17
2.2.1 Princípio de funcionamento	18
2.2.2 Principais vantagens e desvantagens	20
2.2.3 Vazão recalçada estimada	20
2.2.4 Rigidez da tubulação	21
2.2.5 Válvula de impulso e válvula de entrega	21
2.2.6 Válvula Snifter	22
2.3 GOLPE DE ARÍETE	23
2.3.1 Conceito	23
2.3.2 Mecanismo do fenômeno	25
2.3.3 Celeridade da onda	26
2.3.4 Classificação e duração das manobras de fechamento	27
2.3.5 Tipos de golpe de aríete	28
2.4 OPERAÇÃO	29
2.4.1 Frequência de funcionamento	29
2.4.2 Esquema de funcionamento por fases	31
2.4.3 Velocidade de bloqueio	33
2.4.4 Desempenho na fase 1	34
2.4.5 Rendimento	35

2.4.6 Influência da elasticidade do tubo	36
2.4.7 Volume da câmara de ar e frequência de operação.....	36
2.4.8 Ressonância na fase 3.....	37
3 METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS).....	40
3.1 VÁLVULA DE IMPULSO	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
4.1 GRÁFICOS.....	51
5 CONCLUSÕES.....	56
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
REFERÊNCIAS.....	57
APÊNDICE A – Dados coletados.....	61
APÊNDICE B – Raios de frequência de ressonância r de referência.....	63
ANEXO A – Válvulas comerciais utilizadas.....	64

1 INTRODUÇÃO

O carneiro hidráulico é um equipamento para bombeamento de água muito simples e robusto. Utilizando apenas a energia potencial da própria água em uma fonte com certo desnível e da sobrepressão causada pelo golpe de aríete, pode-se elevar parte dessa água para um local mais elevado de maneira intermitente.

Esse tipo de bomba hidráulica não necessita de mão-de-obra especializada para instalação ou operação, porém o correto ajuste de variáveis e de regulação podem ajudar a obter maior aproveitamento dessa bomba, principalmente na zona rural onde a disponibilidade de água é fundamental para o uso pessoal e nas atividades do dia a dia.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência do volume da câmara de ar combinado com a frequência de bombeamento no rendimento e eficiência de um carneiro hidráulico por meio de um estudo de caso real de aproveitamento desta bomba na zona rural.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Montar um sistema experimental numa situação real para recalque de água numa propriedade rural utilizando um carneiro hidráulico de PVC.

Obter o volume mínimo da câmara de ar necessário para conseguir máximo rendimento do carneiro hidráulico no caso estudado.

Determinar uma faixa de frequência de operação ideal da válvula de impulso.

Plotar curvas de desempenho de eficiência e vazão do carneiro hidráulico analisado sob as condições locais especificadas.

1.3 JUSTIFICATIVA

Apesar de ser uma tecnologia antiga, houve poucas modificações significativas no design ou aprimoramento dessa bomba foram feitos utilizando conhecimento técnico-científico. Seus parâmetros de funcionamento muitas vezes

são determinados unicamente de maneira experimental. Uma abordagem teórica do funcionamento e dos parâmetros de desempenho faz-se necessária, concentrando-se em detalhes como o volume da câmara combinado com a frequência de operação. Assim, é possível avaliar a influência desses parâmetros sobre a eficiência e vazão dessa bomba.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O segundo capítulo é apresentado uma abordagem teórica sobre o carneiro hidráulico, suas partes, seu funcionamento principal, a definição do fenômeno golpe de aríete e a descrição detalhada das fases de bombeamento e sua operação. Além das fórmulas de rendimento e hipótese de ressonância.

O terceiro capítulo descreve o estudo experimental feito, os passos tomados, as peças do carneiro hidráulico, além de uma descrição detalhada dos materiais utilizados e dos dados coletados.

No quarto capítulo são mostrados os gráficos gerados a partir do experimento com análises do comportamento e resultados para vazão de recalque e eficiência. No quinto capítulo são expostas as conclusões do estudo e também as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

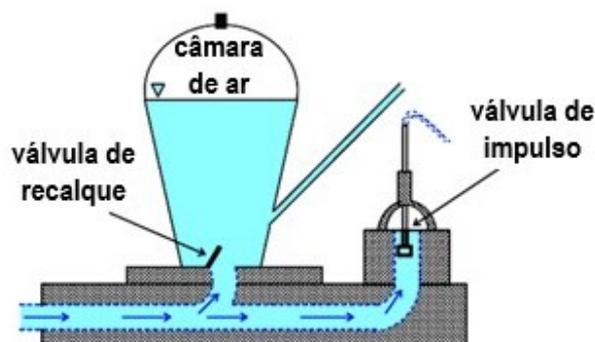
Nesta seção é apresentado o panorama sobre o carneiro hidráulico e seus componentes assim como sua operação, rendimento, instalação e funcionamento, além da abordagem sobre o efeito golpe de aríete, as figuras de mérito e o estado da arte.

2.1 CARNEIRO HIDRÁULICO

O carneiro hidráulico (CH) é uma máquina hidráulica cujo princípio de funcionamento é baseado na mudança de pressão que ocorre em um escoamento quando o fluido no seu interior é bruscamente desacelerado. Devido ao fato de não possuir partes móveis, exceto pelas válvulas ilustradas pela Figura 1, o CH é um equipamento muito robusto, barato para se manter, e não exige mão de obra qualificada para instalá-lo ou operá-lo (YOUNG, 1996). Já Tiago Filho (2002) define carneiro hidráulico como uma máquina automática capaz de aproveitar o efeito do golpe de aríete para bombear água.

O carneiro hidráulico também é considerado uma máquina mista, com características geratriz e operatriz, que funciona pelo movimento da água por meio de válvulas, de modo que as únicas fontes de energia são a própria descarga e a altura da água disponível na captação. Este tipo de bomba funciona em decorrência do surgimento do transiente hidráulico, conhecido como golpe de aríete, permitindo elevar uma parcela da água que adentra o CH a uma altura superior àquela de onde a água proveio, sem necessitar do auxílio de qualquer motor externo (MACINTYRE, 1997).

Figura 1 – Ilustração de carneiro hidráulico

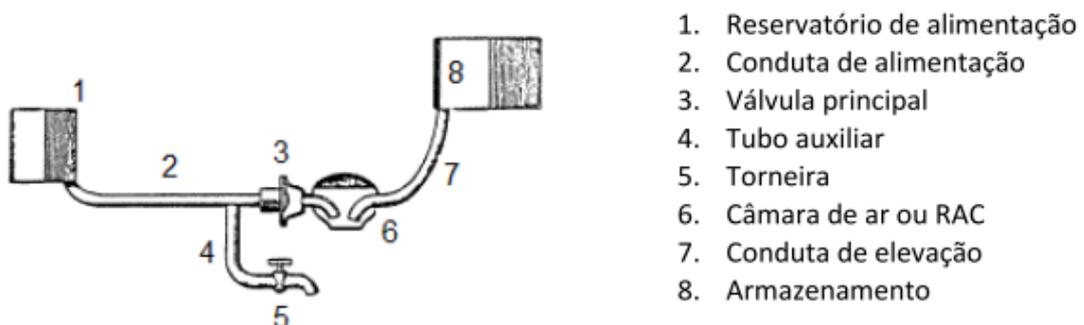


Fonte: Adaptado de Pereira e Mello (2020).

Tradicionalmente, o carneiro hidráulico tem sido usado na zona rural para bombear água sendo um equipamento que representa uma opção alternativa para pequenos produtores em regiões onde a energia elétrica é escassa ou de difícil acesso (COSTA; SILVA; SILVA, 2011). Ainda hoje, sua configuração é determinada de maneira basicamente experimental, além disso há uma grande quantidade de recomendações, diretrizes, normas e regras para o projeto, instalação e operação de carneiro hidráulico, demonstrando um alto nível de incerteza que muitas vezes ignora até mesmo parâmetros fundamentais no design e operação do CH, como por exemplo, o volume da câmara de expansão (CARVALHO; DINIZ; NEVES, 2011).

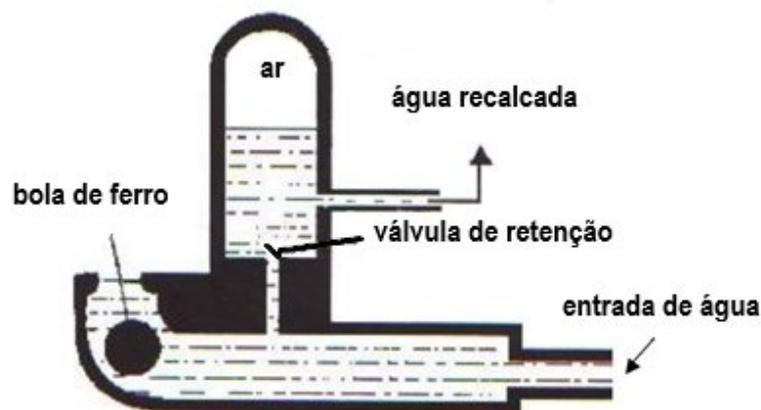
Segundo Girardi e Giordani (2008) a bomba carneiro hidráulico foi inventada por John Whitehurst em 1772, porém necessitava de um operador para funcionar conforme mostrado na Figura 2. Somente mais tarde os irmãos franceses Montgolfier fizeram o aparelho automático mostrado na Figura 3.

Figura 2 – Carneiro hidráulico manual de John Whitehurst



Fonte: Take (1988 apud Ferreira, 2016).

Figura 3 – Carneiro hidráulico original dos irmãos Montgolfier



Fonte: Rojas (2002).

O nome aríete provém da Idade Média quando havia um instrumento de guerra de mesmo nome constituído por uma tora de madeira com uma cabeça de carneiro de metal na ponta como pode ser observado através da Figura 4.

Figura 4 – Instrumento de guerra antigo chamado "aríete"



Fonte: Girardi e Giordani (2008).

Segundo Girardi e Giordani (2008):

Essa arma era utilizada por soldados para golpear e derrubar portões e muros de fortalezas. O nome carneiro hidráulico vem da relação entre o instinto do carneiro (animal) de dar golpes com a cabeça no que ou em quem ele vê a sua frente e o fato de o aparelho em funcionamento emitir um som característico, semelhante ao golpe do animal (GIRARDI; GIORDANI, 2008, p15-16).

A relação entre a arma aríete e o aríete hidráulico vem da semelhança que a arma era usada para dar golpes e no caso do CH quando a água escoar devido à ação da gravidade por uma tubulação e sofre uma desaceleração brusca do escoamento, também surge um golpe, o fenômeno físico conhecido como golpe de aríete (GIRARDI; GIORDANI, 2008).

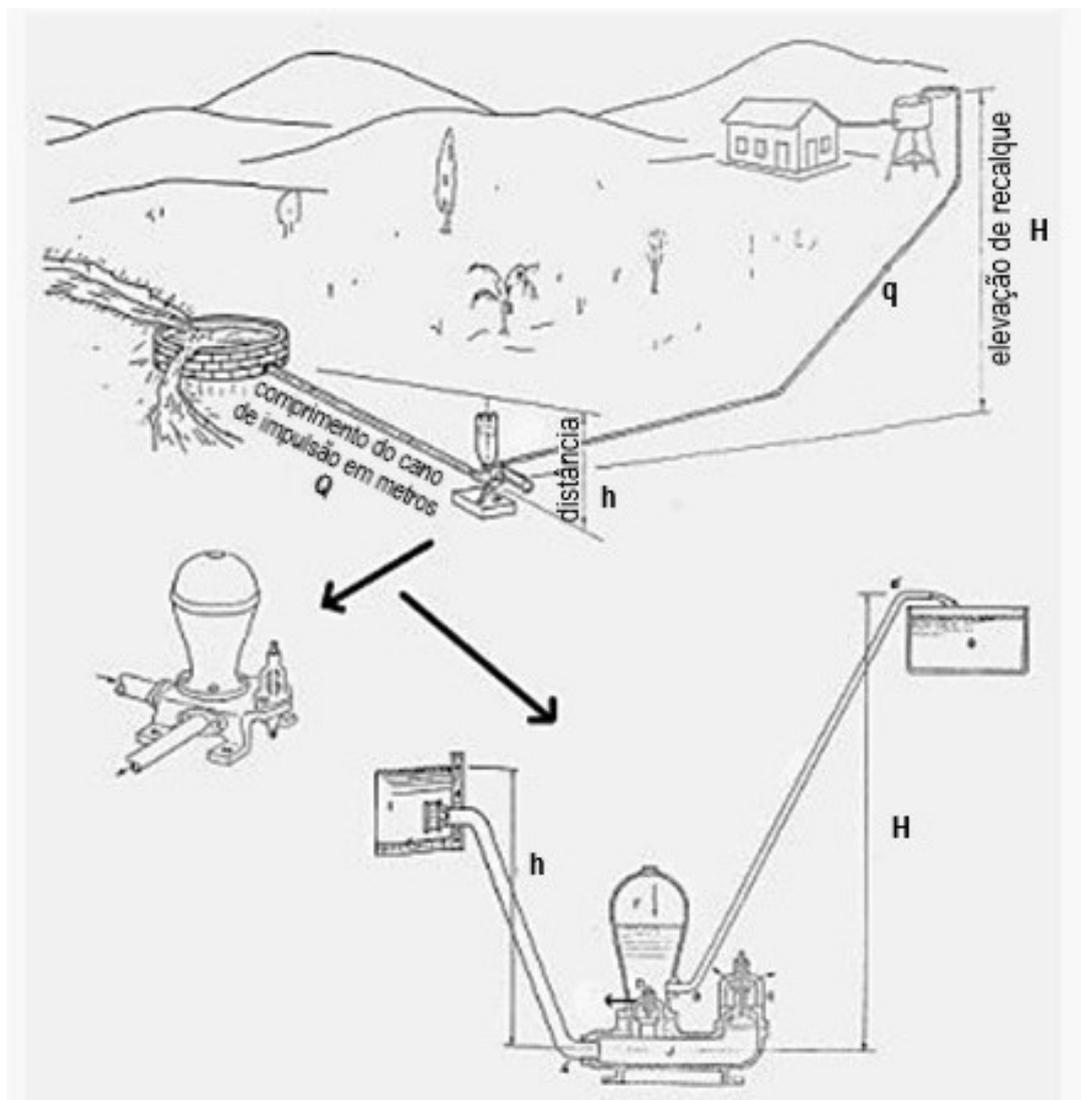
2.2 REQUISITOS LOCAIS, COMPONENTES E RENDIMENTO

Nesta seção são descritos os requisitos do local de instalação para o correto funcionamento do carneiro hidráulico, vazão estimada e componentes com suas características e funções.

2.2.1 Princípio de funcionamento

No carneiro hidráulico o bombeamento é possível pelo aproveitamento da energia potencial proveniente da altura de uma queda d'água geralmente produzida artificialmente por meio de uma pequena barragem conforme ilustrado pela Figura 5 (AZEVEDO NETTO, 1969).

Figura 5 – Exemplo esquematizado de instalação de um carneiro hidráulico

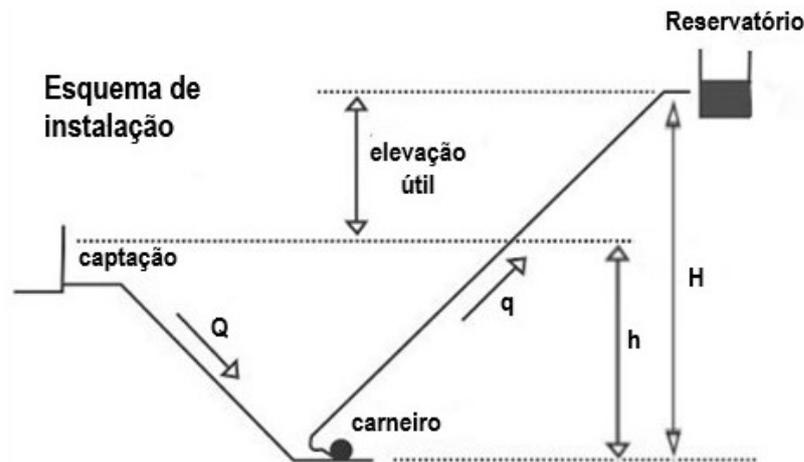


Fonte: Adaptado de Tiago Filho (2002).

A situação mais frequente de instalação de um CH diz respeito ao dimensionamento para determinada topografia e recursos hídricos. Assim, deve-se determinar conforme Figura 6 a:

- Vazão de alimentação (Q);
- Altura de recalque (H);
- Altura de alimentação (h).

Figura 6 – Esquema de instalação simplificado



Fonte: Adaptado de Agrobombas (2020).

Sarturi (2019) afirma que o desempenho de um carneiro pode variar muito dependendo das condições locais, por isso é importante obter uma queda d'água suficiente para poder elevar a água até o ponto desejado.

Segundo Tiago Filho (2002):

A escolha do tamanho do carneiro está relacionada com a queda (h) e quantidade de água (Q) disponíveis. A quantidade de água aproveitada (q) será função do tamanho do carneiro e da relação entre a queda disponível e a altura de recalque (h/H). A Tabela 1 fornece diâmetros de alimentação e de recalque necessários em função da quantidade de água (Q) disponível. A Tabela 3 fornece a porcentagem de água (R) a ser aproveitada em função da relação entre a queda disponível e a altura de recalque (h/H) (TIAGO FILHO, 2002, p2).

A vazão da fonte e diâmetros são bem próximos a modelos comerciais conforme Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Diâmetros de entrada e de saída

Quantidade de água disponível [L/min]		Ø Tubo de entrada	Ø Tubo de saída
$Q_{\text{mín}}$	$Q_{\text{máx}}$		
7	9	1"	1/2"
11	26	1.1/4"	1/2"
22	45	2"	3/4"
70	120	3"	1.1/4"

Fonte: Tiago Filho (2002).

Tabela 2 – Especificações carneiro hidráulico comercial

Nº	Vazão necessária para alimentação [L/min]		Ø Tubo de entrada	Ø Tubo de saída	Peso [Kg]
	Qmín	Qmáx			
3	7	15	1"	1/2"	19
4	11	25	1.1/4"	1/2"	24
5	22	45	2"	3/4"	31
6	70	120	3"	1. 1/4"	65

Fonte: Marumby (2020).

Tabela 3 – Porcentagem de água aproveitada

Proporção (h/H)	Aproveitamento "R"
1/2	0,60
1/3	0,55
1/4	0,50
1/5	0,45
1/6	0,40
1/7	0,35

Fonte: Tiago Filho (2002).

2.2.2 Principais vantagens e desvantagens

Pode-se destacar como vantagens do carneiro hidráulico a não utilização de energia elétrica ou combustíveis fósseis para seu funcionamento, requer pouca manutenção, fácil instalação, não necessita de lubrificantes e não há custos envolvidos na operação (DARDOT, 2012). Como desvantagens pode-se destacar o rendimento limitado pelas condições locais e ruído intermitente da válvula de impulso (ABATE, 2000).

2.2.3 Vazão recalçada estimada

A vazão de água recalçada q é dada pela equação (1):

$$q = Q \cdot \left(\frac{h}{H}\right) \cdot R \quad (1)$$

Sendo:

- q – vazão recalçada;
- Q – vazão de alimentação;
- h – altura da fonte;
- H – altura de recalque;
- R – porcentagem de aproveitamento.

2.2.4 Rigidez da tubulação

Há muitas vezes debate sobre a importância da rigidez da parede da tubulação de alimentação. Abate (2000) faz a indicação da rigidez do tubo de abastecimento na elevação da pressão decorrente do golpe de aríete no desempenho da bomba e no escoamento de recalque, porém sem avaliar sua relevância comparada com a interferência de outros fatores.

De acordo com Azevedo Netto e Alvarez (1988 apud ROJAS, 2002) pode-se determinar a velocidade do jato e a vazão utilizando o método das coordenadas. A velocidade teórica (V_t) de um jato é descrita como o movimento da veia líquida descomposto segundo os eixos horizontal (x) e vertical (y). O primeiro movimento é uniforme e o segundo acelerado devido à ação da gravidade (g). As expressões que determinam esses movimentos são dadas pelas equações (2) e (3):

$$x = V_t \cdot t \quad (2)$$

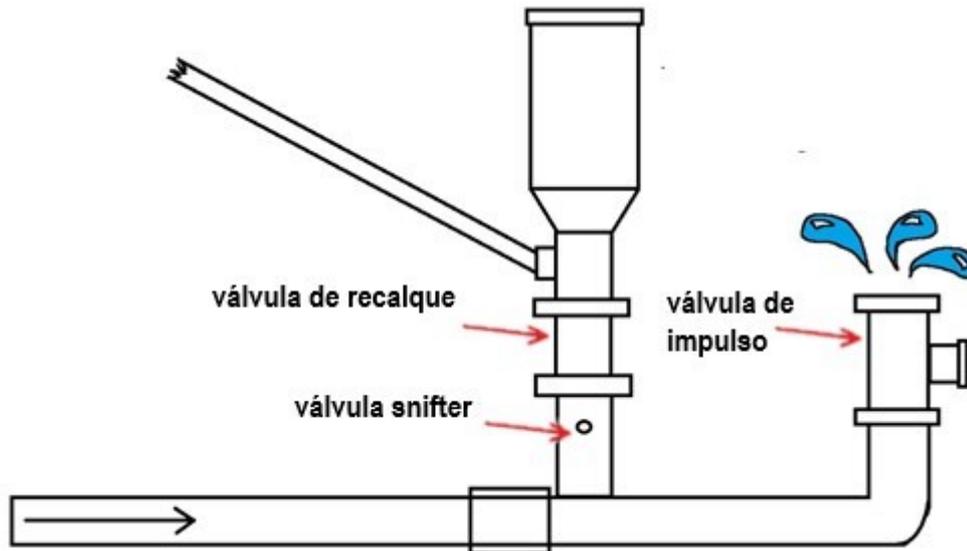
$$y = \frac{1}{2} g t^2 \quad (3)$$

2.2.5 Válvula de impulso e válvula de entrega

A válvula de impulso é uma válvula simples mostrada na Figura 7 que é fechada pela força de arrasto induzida por uma elevada velocidade do fluido. A geometria da válvula faz com que essa força de arrasto aumente rapidamente à medida que a válvula se move em direção à sua posição fechada, induzindo então o rápido fechamento, produzindo uma desaceleração brusca do fluido, denominado golpe de aríete. Além disso, esse fenômeno induz o aumento de pressão no conduto

de alimentação proporcional à velocidade do fluido imediatamente antes do fechamento da válvula.

Figura 7 – Ilustração válvulas



Fonte: Adaptado de Wikiversity (2019).

Essa pressão se mantém enquanto as ondas de pressão propagam-se ao longo da tubulação de alimentação. Durante esse período, uma pequena descarga ocorre por meio da válvula de recalque, parcela na qual efetivamente é bombeada na câmara que contém ar a uma pressão próxima da pressão de entrega da bomba. Essa descarga continua até o momento em que a pressão na tubulação de recalque diminui, fase em que a válvula de recalque se fecha e a descarga cessa (YOUNG, 1997).

As características da válvula de impulso são afetadas por parâmetros como o diâmetro do orifício da válvula, o diâmetro do êmbolo da válvula, o comprimento do curso da válvula, massa da válvula, altura de recalque e altura da fonte de alimentação do CH (SUARDA; SUCIPTA; DWIJANA, 2019).

2.2.6 Válvula Snifter

Na operação do carneiro hidráulico, após certo período de tempo, o volume de ar na câmara de ar diminui gradualmente sendo absorvido com a água bombeada, sendo necessário repor o suprimento de ar para a câmara por meio de uma válvula snifter mostrada na Figura 7. Em sua implementação, essa válvula snifter é

geralmente apenas um orifício com 1 a 2 mm de diâmetro a uma distância de aproximadamente 2 cm abaixo da válvula de entrega do corpo da bomba hidráulica (SUCIPTA; SUARDA, 2019).

A inclusão desta válvula resultará em uma diminuição da pressão do golpe de aríete devido a um vazamento de escoamento por meio do orifício, em contrapartida irá reduzir o desempenho do CH. O conceito de funcionamento da válvula snifter trata-se de uma válvula antivácuo automática que se fecha durante a fase de compressão e abre quando a contrapressão ocorre no tubo de transmissão na fase de recuo, portanto, o conceito dessa válvula deve ser o de uma válvula unidirecional (SUCIPTA; SUARDA, 2019).

2.3 GOLPE DE ARÍETE

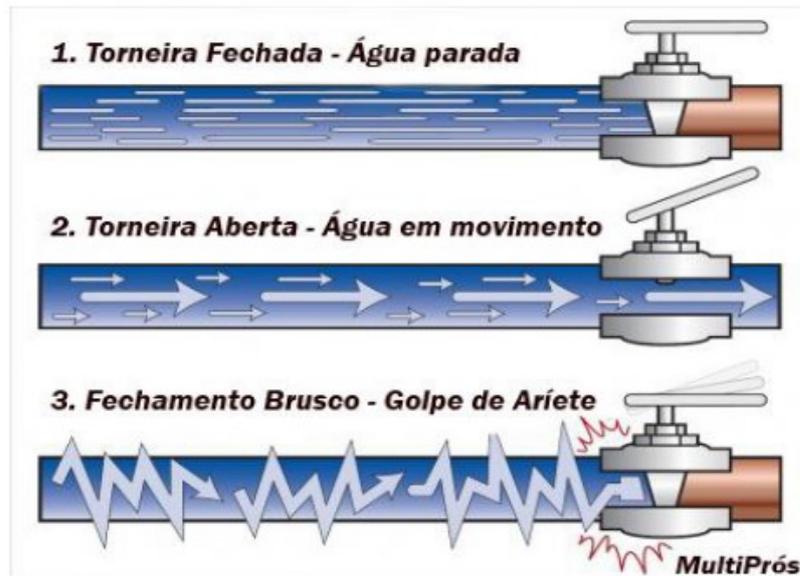
Nesta seção será vista a descrição do golpe de aríete, classificação, mecânica, celeridade da onda, tipos de golpe e as equações que regem o fenômeno físico.

2.3.1 Conceito

Denomina-se golpe de aríete o choque violento que se produz sobre as paredes de uma tubulação quando o escoamento do líquido é desacelerado bruscamente. Em outras palavras, é a sobrepressão que as canalizações recebem quando, por exemplo, fecha-se um registro, interrompendo-se o escoamento (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998).

O golpe de aríete é o efeito da interrupção abrupta de um escoamento contínuo de água que resulta em um aumento momentâneo de pressão; esse efeito pode ser observado na Figura 8, ocorre ao se bloquear bruscamente a saída de água em uma tubulação, o que causa um movimento independente da inércia e consequente sobrepressão no local (YKEDA; BARBOSA; DEL PINO, 2019).

Figura 8 – Fechamento brusco – golpe de aríete



Fonte: Zillow [201-?] apud Ferreira (2016).

Quando há um fechamento repentino de um registro, a inércia do movimento da água poderá converter-se em trabalho, determinando nas paredes da tubulação através da equação (4) pressões superiores à pressão durante o escoamento anterior ao golpe de aríete.

$$mv = Ft \quad (4)$$

Onde m é a massa da porção de água, v a velocidade, F a força de inércia e t o tempo de desaceleração da velocidade.

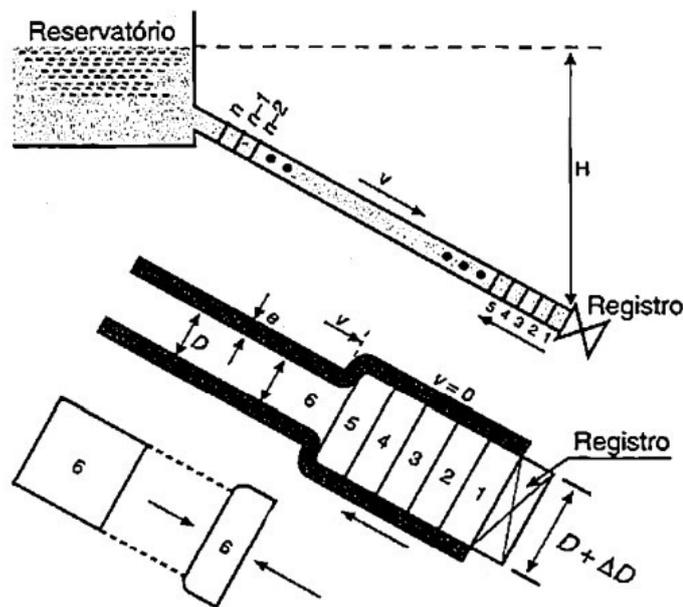
Azevedo Netto (1998) explica que:

Se $t=0$, tem-se fechamento instantâneo, e ainda, se a água fosse incompressível e a canalização inelástica, a sobrepressão teria um valor infinito. Na prática, o fechamento sempre leva algum tempo, por pequeno que seja, e a energia absorvida transforma-se em esforços de compressão da água e deformação das paredes da tubulação (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998, p325).

2.3.2 Mecanismo do fenômeno

O fechamento rápido do registro R ilustrado na Figura 9, faz a lâmina 1 comprimir-se e a sua energia cinética é convertida em energia de pressão, ocorrendo, simultaneamente, a distensão do tubo e esforços internos na lâmina (deformação elástica). O mesmo acontecerá em seguida com as lâminas 2, 3, 4 etc., propagando-se uma onda de pressão até a lâmina n junto ao reservatório (COSTA, 201-?).

Figura 9 – Detalhe da deformação elástica das lâminas de fluido



Fonte: Azevedo Netto et al. (1998).

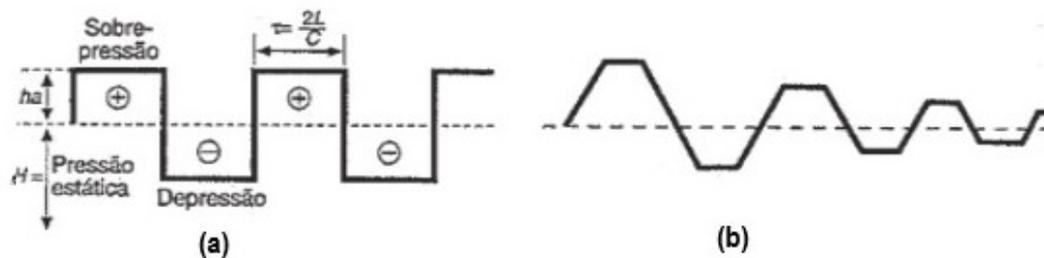
A lâmina n, em seguida, devido aos esforços internos e à elasticidade do tubo, tem a tendência a sair da canalização em direção ao reservatório, com velocidade v contrária, o mesmo acontece sucessivamente com as lâminas n-1, n-2, ..., 4, 3, 2, 1.

Enquanto isso, a lâmina 1 havia ficado com sobrepressão durante o tempo descrito pela equação (5):

$$\tau = \frac{2L}{c} \quad (5)$$

Onde τ é a fase ou período da canalização e c a velocidade de propagação da onda, chamada de celeridade. Há, então, essa tendência de a água sair da tubulação, pela extremidade superior. Como a extremidade inferior do tubo está fechada, haverá uma depressão interna. Nessas condições, a velocidade v no sentido contrário é convertida em uma onda de depressão conforme Figura 10a. Devido à depressão na canalização, a água tende a ocupá-la novamente, voltando as lâminas de encontro ao registro, dessa vez com a velocidade v , e assim por diante (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998).

Figura 10 – Fases da onda de sobrepressão e depressão



Fonte: Azevedo Netto *et al.* (1998).

Nas considerações feitas, desprezou-se o atrito ao longo da tubulação, que na prática contribui para o amortecimento dos golpes sucessivos como pode ser visto na Figura 10b (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998).

2.3.3 Celeridade da onda

De acordo com Denículi (1992 *apud* ROJAS, 2002), através da equação (6) pode-se obter a celeridade de propagação da onda de pressão c , na água, por meio de tubos dada pela equação (6):

$$c = \frac{9900}{\sqrt{\left(48,3 + k \frac{D}{e}\right)}} \quad (6)$$

Em que:

- c – celeridade;

- D – diâmetro interno do tubo;
- e – espessura do tubo;
- k – coeficiente dado pela equação (7) que leva em conta os módulos de elasticidade (E):

$$k = \frac{10^{10}}{E} \quad (7)$$

- Para tubos de aço, k=0,5;
- Para tubos de ferro fundido, k=1;
- Para tubos de concreto, k=5;
- Para tubos de cimento amianto, k=4,4;
- Para tubos plásticos, k=18.

2.3.4 Classificação e duração das manobras de fechamento

O tempo de fechamento da válvula ou registro é um importante fator. Pela equação (8) se o fechamento for muito rápido, o registro ficará completamente fechado antes da atuação da onda de depressão. Por outro lado, pela equação (9) tem-se que se o registro for fechado lentamente, haverá tempo para atuar a onda de depressão antes da obturação completa. Daí a classificação das manobras de fechamento, denominando t como tempo de fechamento do registro ou válvula.

Se:

$$t < \frac{2L}{c} \quad (8)$$

Tem-se manobra rápida.

Se:

$$t > \frac{2L}{c} \quad (9)$$

Tem-se manobra lenta.

A sobrepressão máxima dada pela equação (10) ocorre quando a manobra é rápida, isto é, quando:

$$t < \frac{2L}{c} \quad (10)$$

Onde ainda não atuou a onda de depressão (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998).

2.3.5 Tipos de golpe de aríete

Dependendo da relação entre o tempo de fechamento da válvula e o período de propagação da onda, os tipos são distinguidos em golpe de aríete simples e complexo. Golpe de aríete simples ocorre quando o tempo de fechamento da válvula determinado pela equação (11) é igual ou menor que a duração da onda (SOBIESKI; GRYGO; LIPÍŃSKI, 2016):

$$T = \frac{2 \cdot L}{u} \quad (11)$$

Onde T é o período da onda de pressão, L é o comprimento do tubo e u é a velocidade de propagação da pressão da onda.

A equação (12) mostra que pode-se determinar a velocidade da onda de golpe de aríete no sistema de abastecimento, também conhecida por fórmula de Zhukovsky:

$$u = \frac{\sqrt{\frac{1}{B \cdot \rho}}}{1 + \frac{d}{B \cdot E \cdot \delta}} \quad (12)$$

Onde u é a velocidade de propagação da onda de pressão, B é a compressibilidade do fluido, ρ é a densidade do fluido, d é o diâmetro do tubo, δ é a espessura da parede do tubo e E é o módulo de elasticidade do material do tubo.

A propagação das ondas de pressão na tubulação de alimentação, aqui descritas dimensionalmente por Verspuy (1993 *apud* ROJAS, 2002), é governada pela equação (13) da continuidade e equação (14) do momento, juntas conhecidas como as equações de golpe de aríete.

$$\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{g}{c^2} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{f}{2D} V[V] \quad (14)$$

Em que:

- V – Velocidade da água na tubulação de alimentação;
- x – Distância ao longo da tubulação de alimentação;
- g – Aceleração devida à gravidade;
- H – Altura da fonte;
- t – Tempo;
- f – Fator de atrito de Darcy-Weisbach;
- c – Velocidade da onda de pressão.

Segundo Azevedo Netto *et al.* (1998) o fenômeno do golpe de aríete é complexo e envolve no seu estudo muitas condições e inúmeras variáveis que fogem do escopo desta pesquisa. Em razão disso esse trabalho será focado basicamente no resultado do experimento proposto e nas variáveis de controle propostas.

2.4 OPERAÇÃO

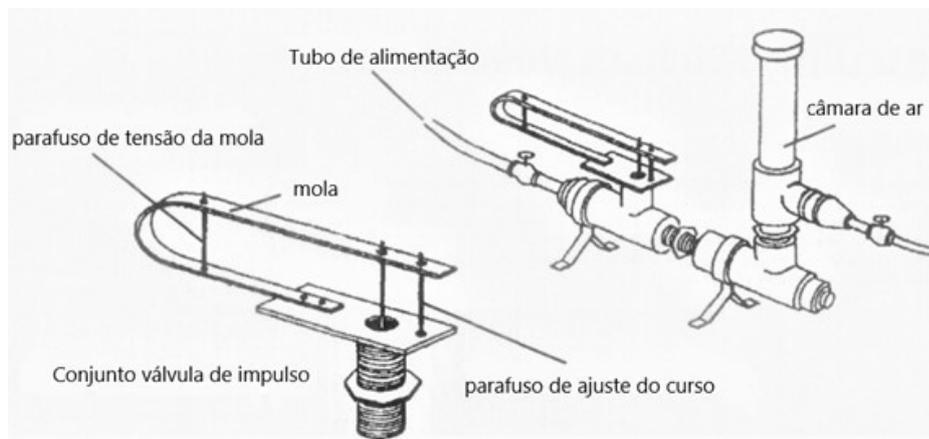
Nesta seção será mostrada como é a operação de um carneiro hidráulico, suas fases de funcionamento e influência no rendimento.

2.4.1 Frequência de funcionamento

“Batidas” ou frequência de funcionamento refere-se ao som emitido quando a válvula de escape se fecha, depois de completar um ciclo de operação. Essa frequência (ω) varia em função das condições de operação e regulagem feita na válvula A. O ajuste pode ser feito alterando a perda de pressão que arrasta a parte

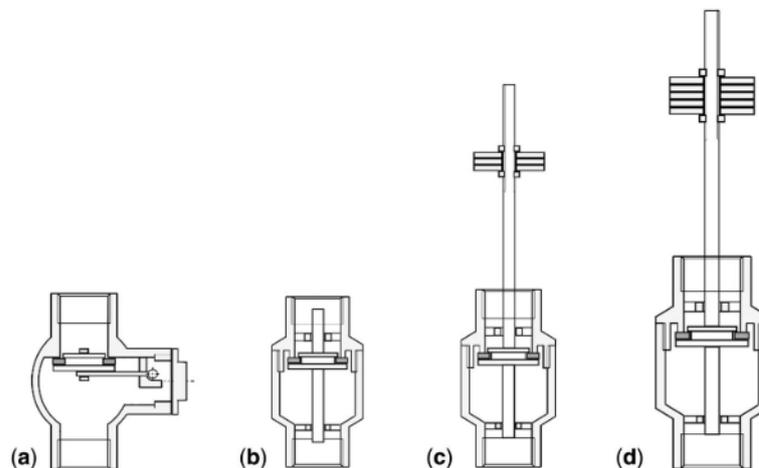
móvel da válvula (BHOI *et al.*, 1994 *apud* ABATE 2000), ajustando a pressão da mola como mostrado na Figura 11, ou pode-se também modificar a massa da válvula (JAFRI, 2019) como mostrado na Figura 12. Dependendo da configuração da válvula. Ykeda, Barbosa e Del pino (2019) propõe que “a regulagem no número de batidas por minuto deve ser específica para cada condição local para obtenção do melhor rendimento”. Buscando-se assim uma regulagem adequada para que cada equipamento trabalhe dentro da sua faixa de máxima eficiência.

Figura 11 – Exemplo de válvula de impulso com mola ajustável



Fonte: Jennings (2002).

Figura 12 – Esquemas de válvulas de impulso com regulagem utilizando diferentes massas



- (a) válvula de retenção de flap
- (b) válvula de retenção de gatilho
- (c) válvula de retenção com massa variável
- (d) válvula de retenção com incremento de massa

Fonte: Sobieski, Grygo e Lipinski (2016).

2.4.2 Esquema de funcionamento por fases

Conforme ilustrado na Figura 13, o ciclo completo pode ser dividido em 3 fases distintas:

FASE 1: Abastecimento;

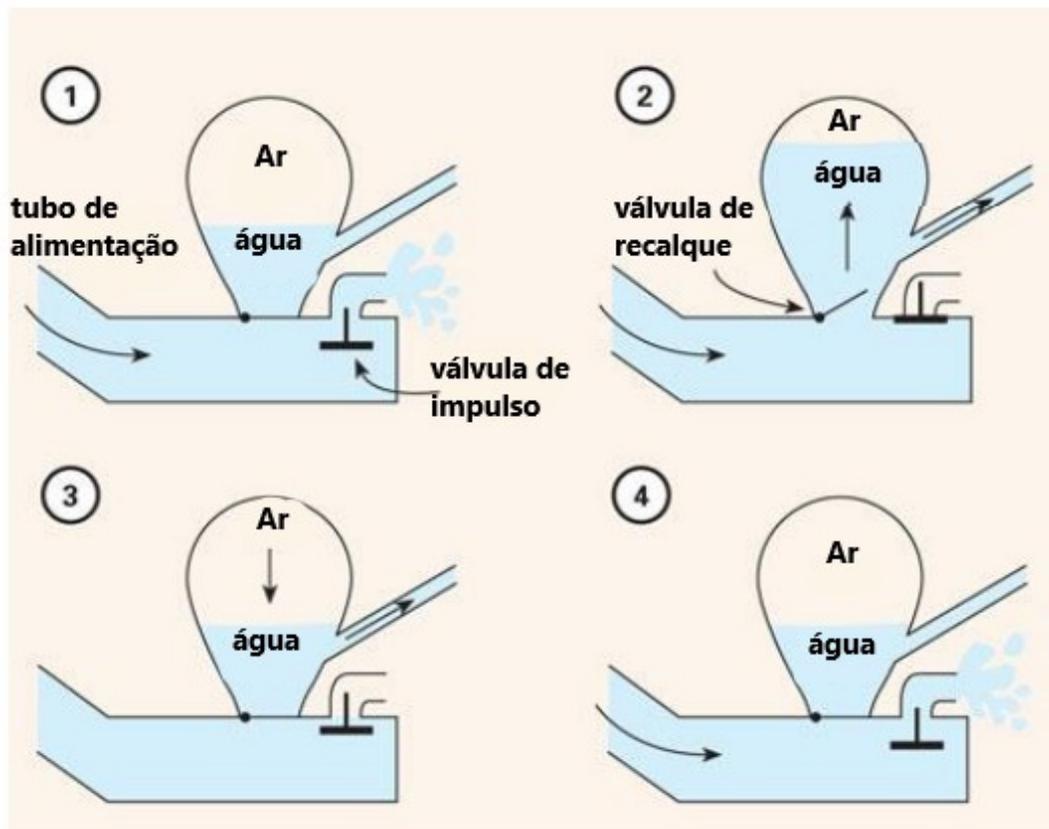
FASE 2: Armazenamento e recalque;

FASE 3: Recalque complementar.

Hipóteses assumidas:

- Fluido incompressível e tubulação de parede rígida;
- escoamento unidimensional e uniforme (ao longo do tubo, corte transversal);
- Fechamento quase instantâneo da válvula A;
- As perdas de pressão são substituídas por elementos de amortecimento concentrado assumidos como concentrados nas válvulas.

Figura 13 – Fases do bombeamento



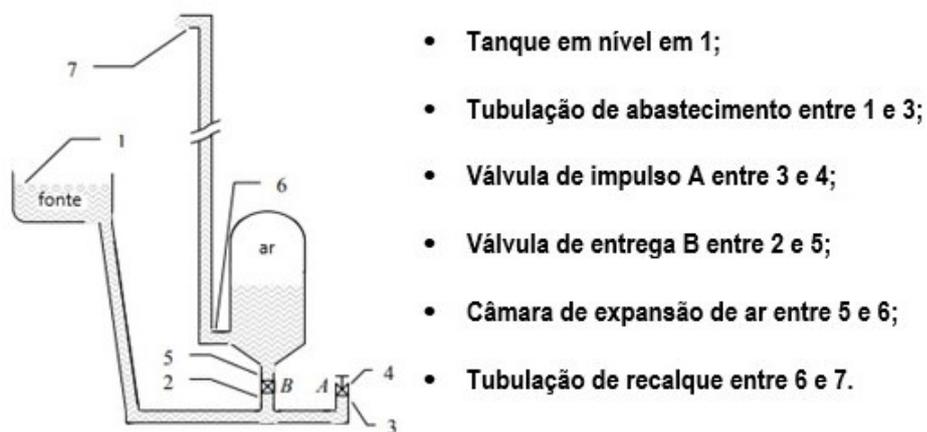
Fonte: Adaptado de Pawlick et al. (2018).

2.4.2.1 Fase 1 - Fase de abastecimento

Essa fase começa com a válvula de retenção B fechada e a válvula de impulso A aberta mostrada na Figura 13. Essa fase começa com a água em repouso no tubo 1-4 como pode ser observado na Figura 14. A massa de água m_1 é acelerada pela gravidade (sujeita ao amortecimento equivalente a C_1), até o tempo T_1 quando a velocidade v_4 do fluxo nessa seção atinge seu máximo e é subitamente bloqueado pela válvula de impulso, essa velocidade máxima chamaremos de V_{bloqueio} . A válvula abruptamente bloqueia o fluxo na tubulação de abastecimento (Figura 13), sempre que a perda de pressão imposta por sua geometria no fluxo excede a força de controle da válvula que é ajustada por uma massa de ajuste ou por uma mola (GOH, 1988, apud CARVALHO; DINIZ; NEVES, 2011, p735).

Com o escoamento interrompido, a pressão aumenta até atingir a pressão de abertura da válvula B. Essa pressão depende da própria válvula e das condições de fluxo na seção 5-7. Uma vez que a válvula B é aberta, o fluxo na seção 1-4 é abruptamente desviado iniciando a fase 2 ou fase de armazenamento/recalque (CARVALHO; DINIZ; NEVES, 2011).

Figura 14 – Diagrama esquemático de um CH



- Tanque em nível em 1;
- Tubulação de abastecimento entre 1 e 3;
- Válvula de impulso A entre 3 e 4;
- Válvula de entrega B entre 2 e 5;
- Câmara de expansão de ar entre 5 e 6;
- Tubulação de recalque entre 6 e 7.

Fonte: Adaptado de Carvalho, Diniz e Neves (2012).

A velocidade do escoamento v_{bloqueio} , no qual o fechamento da válvula A ocorre, é ajustável, variando uma massa ou a força de uma mola. Comparado com a duração do ciclo todo da bomba aríete, esse fechamento pode ser considerado instantâneo (CARVALHO; DINIZ; NEVES, 2011).

No CH, a válvula de recalque B abre sempre que a pressão no ponto “2” excede a pressão no ponto “5”, portanto limitando a pressão máxima. O bom entendimento desse mecanismo explica por que a rigidez da parede do tubo tem uma influência limitada no comportamento do CH. Segundo Jeffery (1992), essa influência começa a aparecer para alturas de recalque superiores a 50 m.

2.4.2.2 Fase 2 – Fase de Armazenamento e recalque

A fase 2 ocorre ao longo de três regiões diferentes do CH, quando a válvula de impulso A fecha, o aumento abrupto da pressão faz com que a válvula de retenção B abra e o fluxo agora começa ao longo da seção 1-7. Nessa seção, entre 5 e 6, existe também uma Câmara de Expansão que permite que um certo volume de líquido seja armazenado e compartilhe o espaço com ar comprimido.

Deve-se considerar que a presença de uma pequena quantidade de ar misturada com a água pode alterar drasticamente as propriedades elásticas da mistura (CARVALHO; DINIZ; NEVES, 2011).

Essa fase é interrompida quando a válvula B fecha e a velocidade v_7 é reduz-se a zero (ou quase zero). O tempo de duração dessa fase é T_2 .

2.4.2.3 Fase 3 – Fase de recalque complementar

Início: quando a válvula B se fecha.

Zona: corresponde ao fluxo na seção 5-7 da tubulação.

Término: Com a reabertura da válvula B.

Essa fase ocorre simultaneamente com a fase 1, logo $T_3=T_1$. (CARVALHO; DINIZ; NEVES, 2011).

2.4.3 Velocidade de bloqueio

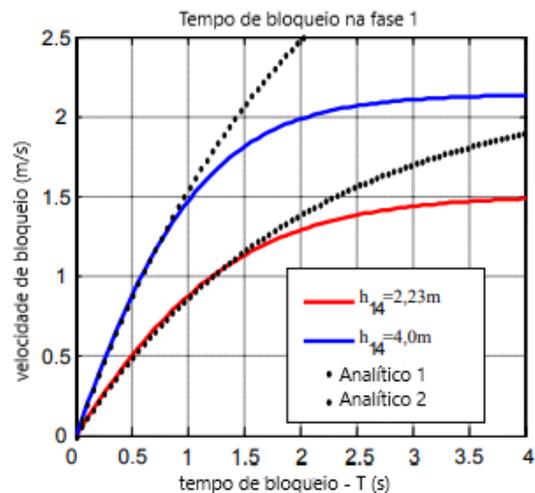
O comportamento dinâmico de cada válvula depende de uma complexa interação fluido-estrutura que é muito particular para cada válvula, dependendo da sua inércia e sua geometria. Supondo que a perda de pressão seja zero, toda a energia potencial na fonte de alimentação seria convertida em energia cinética. (CARVALHO; DINIZ; NEVES, 2011).

Por Bernoulli, v_{bloqueio} através da equação (15) converge para:

$$v_{\text{bloqueio}} = 2gh_{14} \quad (15)$$

Na prática esse valor é muito menor devido às perdas de pressão e ao atrito ao longo de toda a tubulação.

Figura 15 – Exemplos de velocidade de bloqueio real e analítica para duas alturas de alimentação



Fonte: Adaptado de Carvalho, Diniz e Neves (2011).

Para cada tempo de bloqueio T_1 , teremos um v_{bloqueio} conforme mostrado na Figura 15. O ajuste do fechamento da válvula A corresponde a uma velocidade v_{bloqueio} e a um tempo de bloqueio T_1 . Se o ajuste ocorrer a uma velocidade superior a v_{bloqueio} limite o bloqueio não ocorrerá e o CH irá parar, assim, os limites da válvula de impulso podem ser avaliados, pode-se perceber também que a velocidade de bloqueio é proporcional ao tempo de abertura da válvula de impulso “A” e que há perdas no modelo real em comparação com o analítico. (CARVALHO; DINIZ; NEVES, 2011).

2.4.4 Desempenho na fase 1

A importância do desempenho da fase 1 é devido não apenas a perdas dissipativas, mas também, em grande medida, a perdas de energia cinética devido ao

fluxo da válvula A. A fase 1 desempenha um papel fundamental e está associada à parte mais importante do comportamento de eficiência do CH.

Isso indica a grande importância da escolha adequada da velocidade de bloqueio (como o tempo correspondente) para a eficiência global (CARVALHO; DINIZ; NEVES, 2011).

2.4.5 Rendimento

Lal (1989, apud ABATE e BOTREL, 2002) demonstra três formas de calcular o rendimento dada pela equação (16), denominado rendimento volumétrico, a equação (17) definida como critério de D'Aubussion e a eficiência de D'Aubussion dada pela equação (18):

$$N\% = \frac{q}{q + Q} * 100 \quad (16)$$

$$N = \left[\frac{\text{Energia útil em "7"}}{\text{Energia fornecida em "1"}} \right] \quad (17)$$

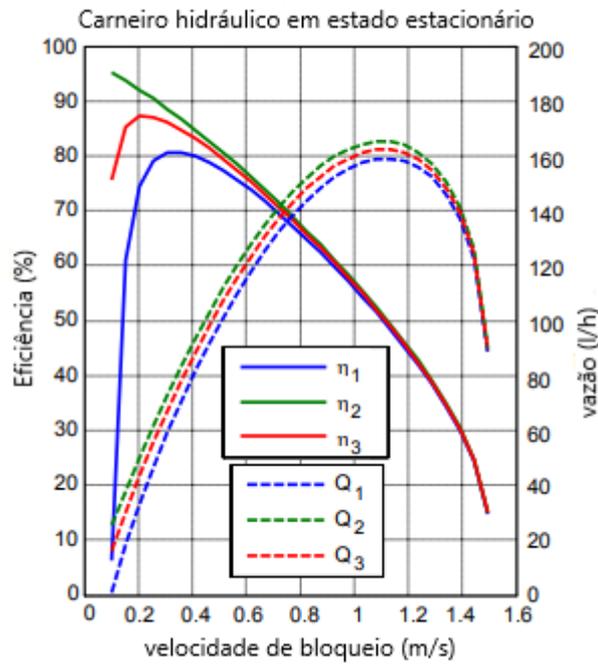
$$N\% = \frac{q_7 * h_7}{(q_4 + q_7) * h_1} * 100 \quad (18)$$

Quanto maior a altura da fonte de água, maior será a eficiência do carneiro hidráulico. Isso acontece porque o nível da água é diretamente proporcional à energia potencial gerada pela fonte de água. Quanto maior a energia potencial, maior será a eficiência produzida (JAFRI; SANUSI, 2019).

Como pode-se observar na Figura 16, simulações de Carvalho, Diniz e Neves (2011) demonstram que para altas velocidades de v_{bloqueio} há diminuição da eficiência do CH, devido à baixa eficiência da válvula de impulso "A". Pode-se observar também que a vazão máxima é obtida para valores de v_{bloqueio} maiores do que aqueles que conduzem para uma eficiência máxima. Esse resultado pode sugerir uma possível estratégia que priorize a vazão em detrimento da eficiência ou vice-versa. Critério

alternativo pode ser escolhido dependendo da disponibilidade de água no reservatório à montante.

Figura 16 – Exemplo de curvas de vazão e eficiência de um CH em uma simulação



Fonte: Carvalho, Diniz e Neves (2011).

2.4.6 Influência da elasticidade do tubo

Segundo Carvalho, Diniz e Neves (2011), se considerarmos a elasticidade do tubo teremos um erro de 5% na eficiência e elasticidade. Ainda em estudos feitos por Abate e Botrel (2002) uma tubulação de alimentação de aço passa a ter melhor desempenho a uma altura de alimentação a partir de 4,7m. Portanto, uma tubulação de PVC pode muito bem atender relativamente a maioria das necessidades de alimentação de um CH sem grandes perdas de desempenho para pequenas alturas de alimentação.

2.4.7 Volume da câmara de ar e frequência de operação

Segundo Carvalho, Diniz e Neves (2012), o volume da câmara e o T_{ciclo} da válvula A determinam a operação do CH e para um bom projeto o volume da câmara

deve ser grande o suficiente para ter um $r > 1,5$. Se for subdimensionado, pode-se trabalhar na faixa de $1 > r > 0,5$.

Considerando sistemas de massa-mola em cada uma das 3 fases, através da equação (19) tem-se a rigidez para o ar da câmara com volume V como:

$$k_2 = \frac{k \cdot A_7^2 \cdot P_0^2}{P_{atm} \cdot V_{atm}} \quad (19)$$

A massa do tubo de recalque calculando-se a equação (20), idealmente rígida, considera-se por:

$$m_2 = L_{67} \cdot \rho \cdot A_7 \quad (20)$$

2.4.8 Ressonância na fase 3

Segundo Carvalho, Diniz e Neves (2012), tendo as condições topográficas definidas, apenas 2 variáveis desempenham papel fundamental na condição de ressonância: V_{atm} (câmara de expansão) que determina a rigidez do sistema e T_1 (período e fase 1), principal fator que influencia o tempo do ciclo T_{ciclo} .

Por Meirovitch (1986), a frequência natural da fase 3 será dada através da equação (21) por:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k \cdot A_7 \cdot P_0^2}{P_{atm} \cdot V_{atm} \cdot L_{67} \cdot \rho}} \quad (21)$$

Sendo pela equação (22) correspondente à rigidez do ar da câmara:

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (22)$$

- A_7 é área da seção da tubulação de recalque;
- P_0 a pressão da câmara de ar;
- P_{atm} a pressão atmosférica local;

- V_{atm} o volume de ar da câmara;
- L_{67} o comprimento da tubulação de recalque;
- ρ a massa específica do líquido a ser recalcado.

Na ressonância um comportamento peculiar pode ser esperado sempre que a frequência natural de excitação dada pela equação (23) se aproxima da frequência natural, ou seja, quando:

$$\omega_{excitação} = \frac{2\pi}{T_1 + T_2} \quad (23)$$

É próximo de um número múltiplo do da frequência natural (ω_n), com $N\omega_n$ para $N = 1, 2, 3 \dots$

Tomando pela equação (24):

$$P_0 \approx \rho g h_{67} + P_{atm} \quad (24)$$

O período natural pode ser estimado através da equação (25):

$$T_n = \sqrt{\frac{\rho \cdot P_{atm} \cdot V_{atm} \cdot L_{67}}{k \cdot A_7 \cdot (\rho \cdot g \cdot h_{67} + P_{atm})^2}} \quad (25)$$

Portanto, a câmara de expansão teria o papel de armazenar a energia liberada durante o pulso curto que ocorre na fase 2 e liberá-lo na fase 3. Sua operação requer que a rigidez da câmara seja a menor possível (dentro dos limites de construção econômica da câmara).

A coincidência entre o período T_{ciclo} e T_n (ou múltiplos inteiros dele) pode levar a indesejáveis comportamentos do CH, com grandes amplitudes de oscilação na velocidade e pressão. Esse comportamento caracteriza a ocorrência da ressonância.

O parâmetro adimensional raio de frequência r é definido através da equação (26) por:

$$r = \frac{T_n}{T_{ciclo}} = \frac{\omega_{ciclo}}{\omega_n} \quad (26)$$

Na prática, para evitar ressonância, a válvula A pode ser ajustada em uma bomba real, para que o T_{ciclo} seja definido e a desigualdade $r > 1$ seja garantida. Fazendo $T_2 \ll T_1$, podemos estimar $T_{ciclo} = T_1 + T_2 \approx T_1$, assim conforme Carvalho, Diniz e Neves (2012) obtem-se pela equação (27) que:

$$r = \frac{2\pi \sqrt{\frac{\rho \cdot P_{atm} \cdot V_{atm} \cdot L_{67}}{k \cdot A_7}}}{(\rho \cdot g \cdot h_{67} + P_{atm}) \cdot T_1} > 1 \quad (27)$$

A escolha da velocidade de bloqueio $v_{bloqueio}$ para o fluxo na seção 1-4 depende da válvula de impulso A e determina T_1 (tempo da fase 1).

3 METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS)

O experimento foi realizado em uma propriedade na zona rural do município de Maracaju-MS mostrada na Figura 17, coordenadas 21°40'26.4"S 55°20'16.2"W, aproveitando-se das condições locais favoráveis à instalação do carneiro hidráulico.

Figura 17 – Local de captação e entrega



Fonte: Google Maps (2020).

Para se determinar a altura de queda e altura de saída pode-se adotar um dos seguintes métodos descritos por Oliveira (2015):

Com uma mangueira transparente, preenchida com água, mede-se o nível da parte mais alta com relação à parte mais baixa, a altura da parte mais baixa onde será instalado o equipamento até onde marcar o nível da água será a altura de queda. Outro método simples seria utilizar um nível, uma régua e uma linha para construção, procedendo da seguinte maneira: marca-se uma estaca ou uma barra reta de aproximadamente um metro e meio, e a linha é amarrada na sua marcação, a linha é esticada até o ponto em que o nível esteja perfeitamente na horizontal com a linha em paralelo ao nível, podendo marcar o ponto onde será fixada uma nova estaca para repetir o procedimento e assim somar todas as alturas obtidas, esse procedimento pode ser utilizado para quedas acima de cinco metros. (OLIVEIRA, 2015, p2).

Na Figura 18 pode-se observar a nascente utilizada como fonte de alimentação e a tubulação de alimentação do CH.

Figura 18 – Detalhe local da fonte, mina d'água (esquerda), início da tubulação de alimentação (centro), CH instalado (direita)



Fonte: Arquivo do autor (2020).

No local tem-se a seguinte proporção: $h/H=0,17 \approx 1/6$ com uma queda d'água de 1,85 m para alimentação do carneiro hidráulico, pretende-se recalcar água a uma altura de 10,80 m até um reservatório distante 175 m do local de captação.

Foi utilizada tubulação de PVC rígido de 1" para alimentação a partir de uma fonte natural local com água suficiente para operação do carneiro hidráulico e represando-a para que mantivesse um nível constante. Para tubulação de recalque foi usada uma mangueira de polietileno de ½" até o reservatório de adução conforme Figura 19 e Figura 20.

Figura 19 – Caminho da tubulação de recalque a partir do CH



Fonte: Arquivo do autor (2020).

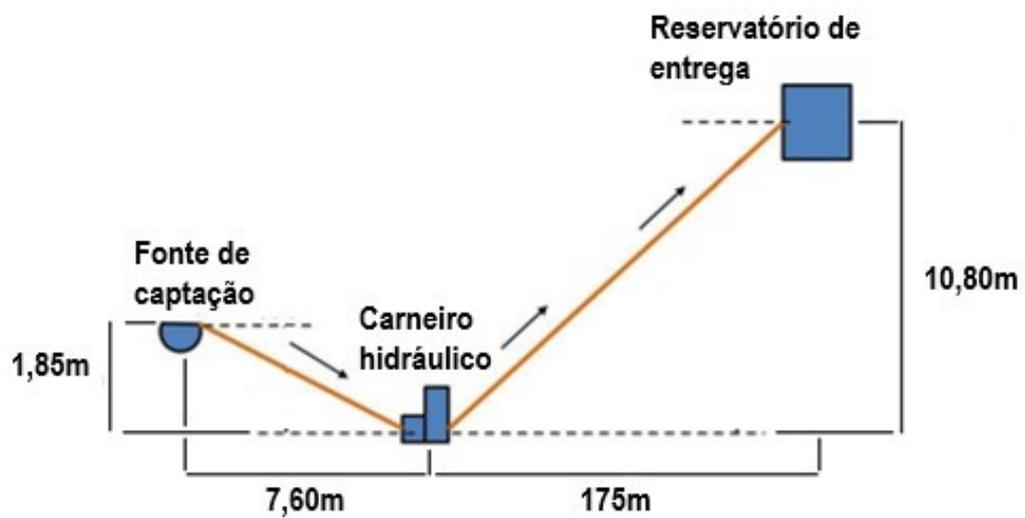
Figura 20 – Detalhe do caminho da tubulação de recalque até o reservatório



Fonte: Arquivo do autor (2020).

A Figura 21 destaca a configuração total de instalação desde a fonte até o local do reservatório.

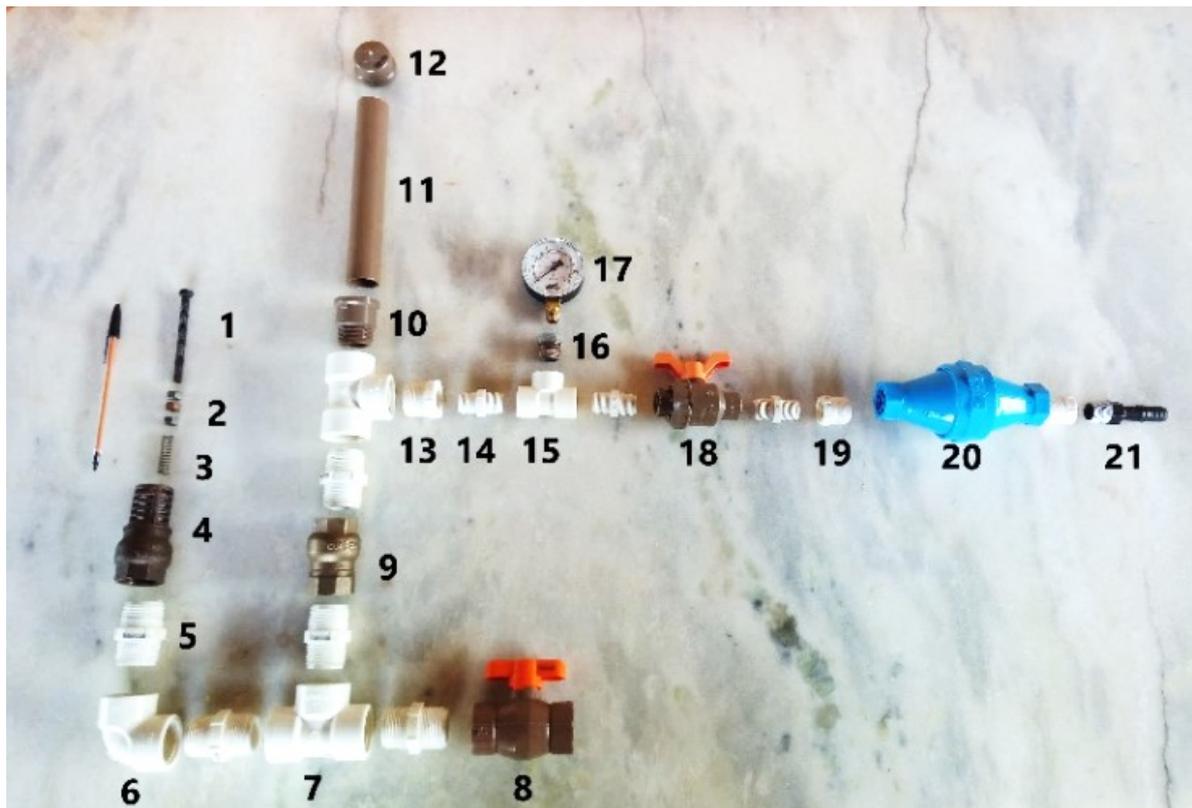
Figura 21 – Esquema simplificado da instalação local



Fonte: Adaptado de Lee et al. (2016).

Conforme ilustrado pela Figura 22 foi fabricado um carneiro de PVC com corpo de tamanho de 1" com conexões roscáveis e apenas a câmara de ar com conexões soldáveis. Foi acoplado um manômetro na saída para medir a pressão de trabalho, além de utilizar fita teflon para selar as conexões roscáveis.

Figura 22 – CH desmontado e suas partes



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Uma terceira válvula de retenção de $\frac{3}{4}$ foi incluída na saída do CH com objetivo de facilitar a instalação e troca das câmaras mantendo sempre cheia a tubulação de recalque, otimizando o tempo de inicialização do bombeamento a cada regulagem feita e também impedindo o retorno da água caso houvesse parada do CH. O uso de uma válvula de retenção logo no início da tubulação de recalque é recomendado por Tiago Filho (2002) e Jennings (2002), assim como alguns fabricantes comerciais também reiteram colocar a cada 100 metros de tubulação de recalque (MARUMBY, 2020). Todos os materiais utilizados para fabricação do carneiro hidráulico estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Lista de materiais utilizados para montagem do CH

Item	Descrição	Quant.	Custo (R\$)
1	Parafuso SX NC aço 1034 5/16x3.1/2 8cm	1	1,50
2	Porca aço 5/16" (Uma delas autotravante)	3	0,45
3	mola de aço L=36mm e=7mm Ø=9,7mm	1	0,70
4	Válvula ferro poço	1	50,00
5	Niple pvc 1"	5	27,25
6	Joelho pvc 1"	1	7,56
7	Tê pvc roscável 1"	2	32,46
8	Registro esfera pvc 1"	1	16,75
9	Válvula de retenção vertical ferro fundido 1"	1	55,34
10	Adaptador pvc soldável com rosca 1"	1	3,78
11	Tubo pvc rígido 1" 60 cm*	1	6,81
12	Tampa pvc 1"	1	2,78
12	Bucha redução roscável 1"x 1/2" pvc	1	5,78
14	Niple 1/2" pvc	3	3,78
15	Tê pvc 1/2"	1	10,00
16	Adaptador 1/2" para NPT 1/4" aço	1	10,00
17	Manômetro analógico	1	60,00
18	Registro esfera pvc 1/2"	1	23,12
19	Adaptador pvc 1/2" para 3/4"	2	21,00
20	Válvula de retenção 3/4" pvc	1	39,90
21	Adaptador mangueira pvc 1/2"	1	1,79
Total			R\$ 380,75

*preço do tubo de comprimento intermediário utilizado nos testes.

Fonte: Elaboração do autor (2020).

O preço médio de um CH comercial de fabricação nacional em comparação com o CH utilizado nesse estudo é dado pela Tabela 5.

Tabela 5 – Comparativo de preço carneiro PVC versus comercial

Carneiro hidráulico	Ø entrada	Ø saída	Preço médio
PVC/conexões hidráulicas	1"	1/2"	R\$ 380,75
Comercial ferro fundido N°3	1"	1/2"	R\$1311,50

Fonte: Elaboração do autor (2020).

Na Figura 23 pode-se observar o CH depois de montado com todas as suas partes.

Figura 23 – Foto do carneiro hidráulico montado utilizado no experimento



Fonte: Arquivo do autor (2020).

3.1 VÁLVULA DE IMPULSO

A válvula utilizada é de um modelo semelhante ao utilizado por Oliveira (2017) e EPAGRI (2013) conforme ilustrado no ANEXO A1 e foi modificada conforme processo ilustrado na Figura 24. Esse modelo de válvula adaptada permite regulação da frequência de trabalho proporcionando maior versatilidade, podendo-se encontrar a melhor configuração para obter máxima vazão ou eficiência do CH, ou ainda, um ponto de equilíbrio entre os dois parâmetros.

Figura 24 – Desenho esquemático de montagem da válvula de impulso modificada



Fonte: Globo Rural (2015 apud Oliveira, 2017).

Figura 25 – Detalhe da válvula de impulso adaptada e suas partes



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Na Figura 25 pode-se observar com maiores detalhes a válvula de impulso e seus principais componentes. Utilizando apenas duas chaves 13 pode-se regular a pressão que a mola faz sobre o êmbolo da válvula e assim modificar a frequência de movimento do mesmo conforme Figura 26.

Figura 26 – Detalhe da regulação da válvula de impulso



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Foram fabricadas 5 câmaras de ar em PVC com diferentes volumes, conforme mostrado na Figura 27, utilizando para cada câmara 1 tampa, 1 adaptador soldável com rosca e um pedaço de tubo indicado conforme a Tabela 6. A câmara 5, por ter diâmetro maior, necessitou de 1 luva, 1 redução 2"/1" e um pequeno pedaço de tubo 1" de 5 cm para acoplamento da redução e o adaptador soldável.

Tabela 6 – Relação das câmaras de ar e seus respectivos volumes após fabricação

Câmara de ar	Volume [L]	Comprimento do tubo [m]	Ø principal
1	0,070	0,10	1"
2	0,140	0,20	1"
3	0,380	0,60	1"
4	1,220	1,00	1"
5	9,000	6,00	2"

Fonte: Elaboração do autor (2020).

Figura 27 – Câmaras fabricadas com diferentes volumes: câmara 1(0,070L), câmara 2 (0,140L), câmara 3 (0,380L), câmara 4 (1,220L), câmara 5 (9,000L)



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Foram feitas medições de parâmetros de trabalho para cada uma das câmaras utilizadas. A regulagem da válvula tem significativa modificação de desempenho no CH quando se altera o tamanho do seu curso em uma válvula modificada conforme Credo e Metra (2020). No caso em questão utilizou-se uma válvula modificada com mola para obter uma regulagem da válvula de impulso por meio da pressão da mola, determinando o número de batidas por minuto e, assim, sua frequência de trabalho.

Para cada frequência de operação regulada na válvula de impulso foram mensuradas a vazão desperdiçada e a vazão útil de recalque, mantendo a câmara de ar fixa. Esse procedimento repetiu-se para cada um dos volumes de câmara.

O início de funcionamento do CH foi feito com a tubulação de alimentação e de recalque cheias e ao abrir o registro de alimentação o funcionamento foi automático para quase todos os volumes de câmara atingindo rapidamente pressão de trabalho conforme literatura (SOBIESKI; LIPÍŃSKI; GRYGO, 2020). Apenas para a câmara de ar n. 5 de 9L, relativamente muito maior que as demais, foi necessário fechar o registro de saída e abrir o registro de entrada várias vezes para que após alguns golpes de aríete se atingisse pressão ideal de trabalho e assim abrir o registro de saída para que fosse feito o equilíbrio de pressão e se iniciasse de fato o bombeamento. Esse procedimento foi necessário para que se ganhasse tempo de trabalho e também para que se atingisse mais rapidamente a compressão do ar da câmara para bombeamento pleno à pressão de trabalho correspondente ao desnível do reservatório de entrega.

Conforme Azevedo Netto (1998), define-se hidrometria como sendo a ciência da medida e da análise da água, sendo utilizados diversos métodos para a medição da velocidade e da vazão do curso d'água. O Método Direto é usado para medir pequenas vazões, ou seja, que não ultrapassem 10 l/s, e pode ser dividido em volumétrico ou gravimétrico. O volumétrico consiste em determinar uma quantidade de volume de água acumulada em um recipiente milimetrado por um tempo estabelecido. Já o gravimétrico baseia-se na pesagem da água que fica retida em um recipiente por um determinado tempo.

A vazão proposta por Azevedo Netto (1998) foi calculada pela equação da continuidade:

$$Q = \frac{V}{\Delta t} \quad (28)$$

Onde:

- Q – Vazão;
- V – Volume;
- Δt – Variação do tempo.

Utilizando método volumétrico semelhante ao de Costa (2019), foi realizada a medição da vazão de entrega q_7 utilizando um copo calibrador agrícola e um cronômetro para medir o tempo necessário para acumular o volume de 1L. O mesmo procedimento foi feito para medição da vazão desperdiçada q_4 , cronometragem do tempo para acumular água em um recipiente com volume conhecido (12L), método semelhante também usado por outros estudos na área (SOUZA; AMORIM; FORTES, 2019). Também foi necessário fabricar um dispositivo utilizando um garrafão pet de 4L mostrado na Figura 28 para que captasse a vazão q_4 desperdiçada pela válvula de impulso.

Figura 28 – Dispositivo de coleta da vazão q_4 (à esquerda) e coleta da vazão q_4 em andamento (à direita)



Fonte: Arquivo do autor (2020).

A partir dos dados coletados em campo foram plotadas as curvas de trabalho com a frequência de operação em relação à eficiência e vazão para cada um dos volumes de câmara utilizados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o golpe de aríete considerando a tubulação de PVC nas condições do experimento ($B = 5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$, $\rho = 999,006 \text{ kg/m}^3$, $d = 0,025 \text{ m}$, $\delta = 0,002 \text{ m}$, $E = 2,41\text{GPa}$) (SONELASTIC®, 2020), a velocidade máxima de onda pela equação (9) é de cerca de 124,4m/s. Com um comprimento da tubulação de alimentação $L = 8,85 \text{ m}$, logo nas condições experimentais estudadas tem-se pela equação (5):

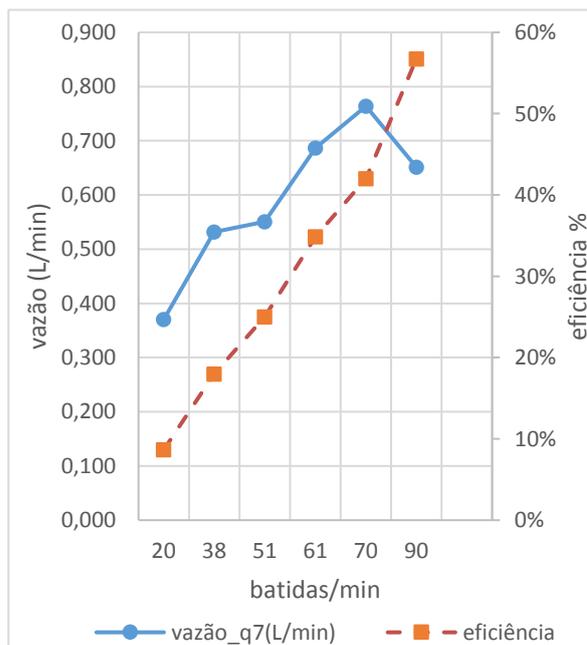
$$\tau = \frac{2L}{c} \quad (5)$$

Como resultado temos $\tau = 0,14 \text{ s}$ (140 ms) de período de canalização da onda.

4.1 GRÁFICOS

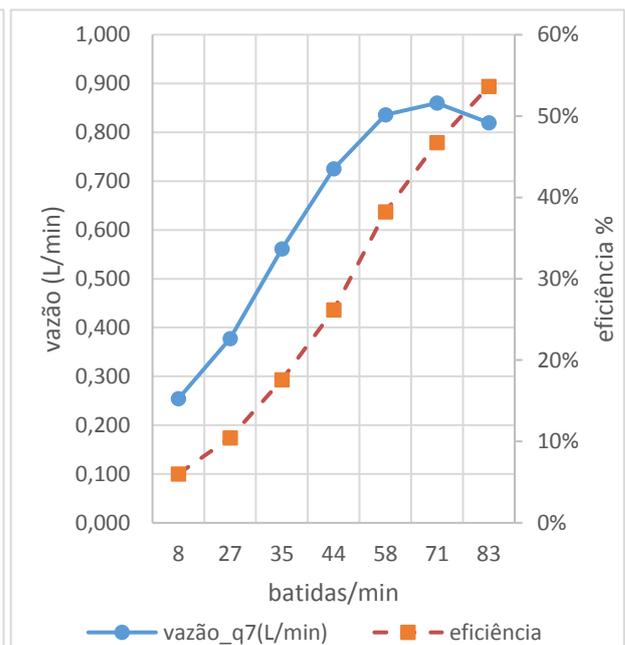
Os gráficos abaixo foram gerados a partir dos dados coletados indicados nas tabelas apresentadas no APÊNDICE A.

Gráfico 1 – Comportamento Câmara 1 (70mL)



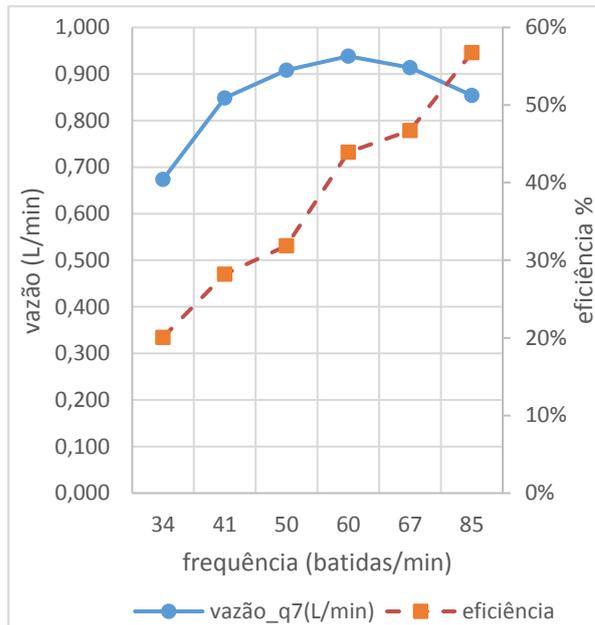
Fonte: Elaboração do autor (2020).

Gráfico 2 – Comportamento Câmara 2 (140mL)



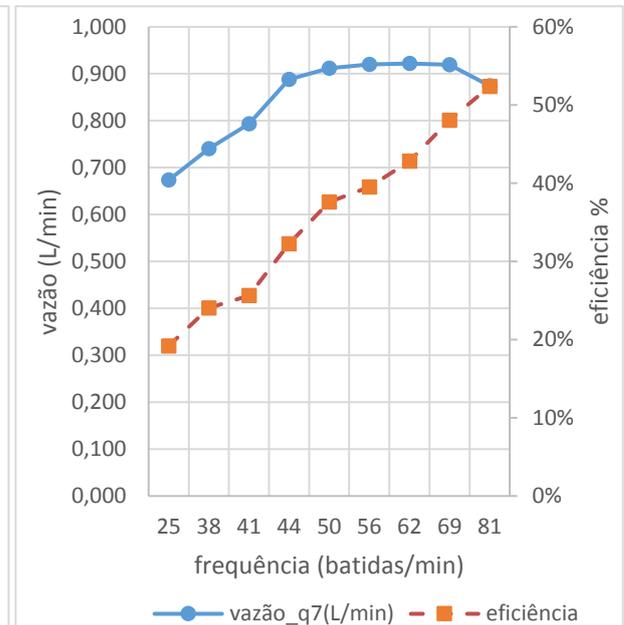
Fonte: Elaboração do autor (2020).

Gráfico 3 – Comportamento Câmara 3 (380mL)



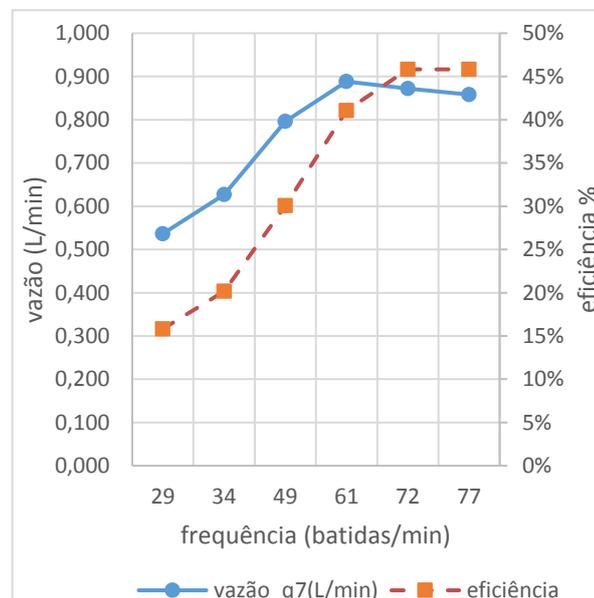
Fonte: Elaboração do autor (2020).

Gráfico 4 – Comportamento Câmara 4 (1220mL)



Fonte: Elaboração do autor (2020).

Gráfico 5 – Comportamento Câmara 5 (9000mL)



Fonte: Elaboração do autor (2020).

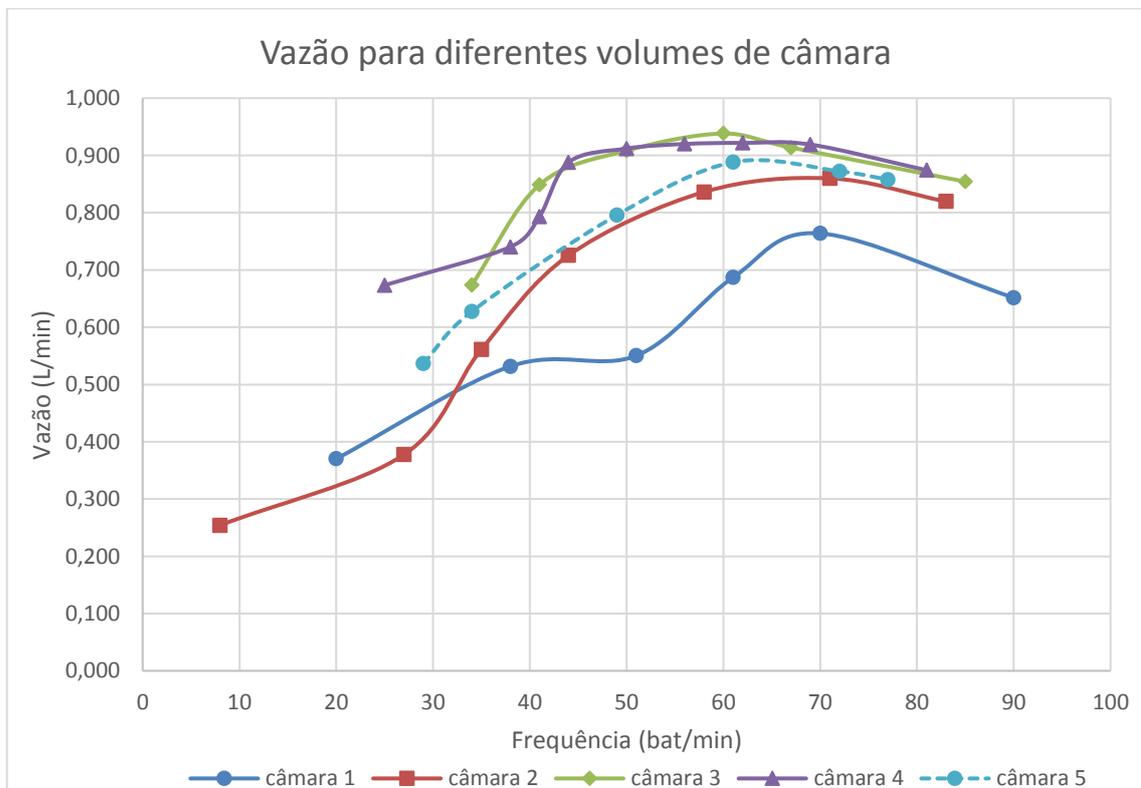
Utilizando a equação (27) pode-se calcular as faixas de ressonância para cada câmara utilizada com as respectivas faixas de operação gerando-se como referência a tabela descrita no APÊNDICE B1. Tendo como referência a cor verde

para $r > 1$ e vermelho para $r < 1$. Pode-se observar que apenas a câmara 5 (9L) tem raio de frequência acima de 1 para quase toda sua faixa de operação.

Pode-se perceber que há comportamento semelhante entre as curvas independentemente do volume de câmara utilizado, todos têm vazão máxima na frequência em torno de 60 batidas/min, valores próximos aos 70-80 batidas/min encontrados por Bonetti *et al.* (2016), corroborando assim para a tese de que para cada situação pode-se ter uma frequência de trabalho ideal. Pode-se perceber também um aumento de eficiência gradual diretamente relacionada ao aumento da frequência de operação.

A configuração da válvula limitou a frequência de operação entre um mínimo de 8 e um máximo de 90 batidas nos testes feitos. Isso se deve a um valor mínimo de ciclo pelo qual o CH começa a operar automaticamente devido ao aperto da mola e design da válvula e curso máximo de operação imposto pelo comprimento da mola.

Gráfico 6 – Vazão q_7 para diferentes volumes de câmara



Fonte: Elaboração do autor (2020).

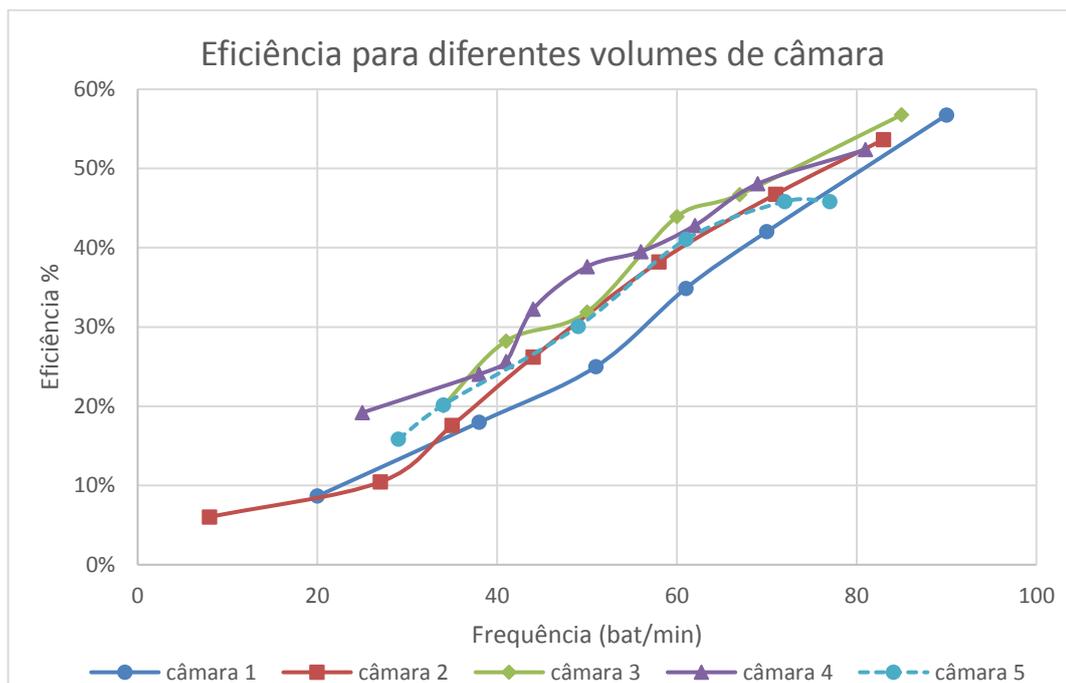
A vazão máxima foi atingida pela configuração com a câmara 3 (380mL) com vazão de 0,938L/min numa frequência de trabalho de 60 bat/min. A menor vazão

medida foi de 0,254L/min para o CH com a câmara 2 (140mL) para uma frequência de trabalho de 8 bat/min.

No caso estudado, a partir da câmara 3 (380mL) não houve diferença significativa de desempenho conforme o volume da câmara de ar, o que também foi constatado por George e Gu (2019). No entanto, para volumes de câmara abaixo de 140mL houve queda significativa de vazão entregue, podendo-se concluir que para volumes de câmara relativamente pequenos há queda expressiva de vazão de entrega. Além do fato do CH utilizado não ter válvula snifter, logo uma reserva de ar menor irá se exaurir mais rapidamente fazendo com que o CH pare de funcionar.

Pode-se observar também por meio dos Gráficos 1 a 5 que há uma relação direta da vazão com a frequência de operação, o que também foi encontrado experimentalmente por Asvapoositkul *et al.* (2019), já no Gráfico 6 comparando diferentes volumes de câmara pode-se notar queda significativa da vazão a partir da câmara 2 (140mL) para frequência de operação menor que 70 bat/min, com a confirmação e desempenho ainda menor para a câmara 1 de volume de 70mL, resultado também encontrado por Bonetti *et al.* (2016) utilizando um volume de câmara de 31mL que se mostrou insuficiente para proporcionar a compressão do ar em comparação com câmaras de ar com volumes superiores.

Gráfico 7 – Eficiência para diferentes volumes de câmara



Fonte: Elaboração do autor (2020).

Como se pode observar, a evolução da eficiência para diferentes volumes tem comportamento bastante semelhante em quase toda extensão da faixa de trabalho apresentando apenas uma pequena diferença de eficiência ($< 10\%$). Pode-se assim concluir que o volume da câmara não tem influência significativa na eficiência do equipamento.

A eficiência tem um crescimento gradual conforme o aumento da frequência de operação, mesmo quando há tendência de queda da vazão a partir de 60-70 bat/min, isso se deve ao fato de que há uma diminuição da vazão desperdiçada q_4 e, portanto, menor uso de água para funcionamento.

Devido a limitações de configuração da válvula, não se pôde avaliar o comportamento do CH para frequências de operação maiores que 90 bat/min, porém simulações feitas por Carvalho, Diniz e Neves (2011) mostram que há queda de eficiência para velocidades de escoamento v_4 bem baixas, e conseqüentemente, frequências de operação elevadas, e que também mesmo atingindo o máximo de eficiência há relativa diminuição da vazão de entrega q_7 .

Outro ponto que pode ser salientado é que se observou maior intermitência da vazão e aumento do pico de pressão conforme a diminuição do volume de câmara utilizado, fato também observado por Cararo *et al.* (2007). Isso é previsível que possa ocorrer, pois, há diminuição do amortecimento do golpe de aríete conforme há a diminuição do volume da câmara de ar.

Uma quantidade maior de golpes por minuto indica desgaste maior de peças móveis, entre elas a válvula de impulso; isso conseqüentemente levará a uma vida útil menor dessa peça. (CARARO *et al.*, 2007).

Considerando a maior vazão alcançada tem-se uma vazão diária estimada em aproximadamente 1350L/dia com uma eficiência de 44%, podendo em muitos casos suprir totalmente ou parcialmente conforme a necessidade local com boa economia de energia elétrica ou combustível.

Comparando com um carneiro hidráulico comercial que pode custar aproximadamente 3,4 vezes mais (Tabela 5, p. 44), o CH de PVC é uma alternativa com menor custo inicial e mais versátil para regulagem da vazão ou eficiência conforme as condições locais. Há de se ressaltar que o carneiro comercial, por ser de ferro fundido, tem uma resistência muito maior e também uma longevidade longa, isso deve ser levado em conta ao selecionar um CH.

5 CONCLUSÕES

Os testes mostraram que há influência direta da frequência de operação tanto na vazão recalçada quanto na eficiência do carneiro hidráulico. No caso estudado, porém, não houve influência significativa do volume da câmara de ar na eficiência do carneiro hidráulico, sendo observado na maioria dos casos uma diferença menor que 10% entre as curvas do Gráfico 7. Quanto à vazão de recalque essa influência ficou limitada a pequenos volumes (no caso analisado, menores que 140 mL).

Para volumes de câmara de ar maiores que 380 mL não houve diferença significativa de vazão. Esse resultado preliminar pode sugerir que a principal função da câmara de ar seja o amortecimento do golpe de aríete proveniente da seção 1-4 do CH, e que o tamanho da câmara de ar seja apenas relevante em outros aspectos, como no tempo que o CH consegue permanecer sem necessitar de reposição de ar (nos casos em que o CH não tem válvula snifter) e, portanto, permanecer com ar suficiente para amortecer os golpes de aríete para que se possa recalcar água com vazão satisfatória. A maior vazão foi encontrada para a câmara 3 (380 mL) com frequência de operação de 60 bat/min e maior eficiência para as câmaras 1 (70 mL) e 3 (380 mL) com 57% sob uma frequência de operação de 85 e 90 bat/min respectivamente.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Fica como sugestão para trabalhos futuros desenvolver uma válvula snifter para esse tipo de carneiro hidráulico de PVC. Também seria interessante combinar carneiros hidráulicos em paralelo e avaliar como seria o comportamento do bombeamento de água.

REFERÊNCIAS

- ABATE, C. **Avaliação do desempenho de um carneiro hidráulico com tubulação de alimentação em aço galvanizado e em pvc.** São Paulo: Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, 2000.
- ABATE, C.; BOTREL, T. A. Carneiro Hidráulico com Tubulação de Alimentação em Aço Galvanizado e em PVC. **Scientia Agrícola**, v. 59, n. 1, p. 197-203, 2002.
- AGROBOMBAS. Esquema de instalação carneiro hidráulico. 2020. Disponível em: https://www.agrobombas.com.br/index.php?route=product/product&product_id=2793. Acesso em: 9 nov. 2020.
- ASVAPOOSITKUL, W. *et al.* Determination of Hydraulic Ram Pump Performance: Experimental Results. **Advances in Civil Engineering**, 22, p. 1-11, 2019.
- AZEVEDO NETTO, J. M. de. Golpe de Ariete. *In*: ZAMBEL, A. R. **Manual de aparelhos de bombeamento de água.** São Carlos: USP/EESC, 1969. p. 183-209.
- AZEVEDO NETTO, J. M. *et al.* **Manual de Hidráulica.** 8. ed. [S.l.]: [s.n.], 1998.
- BONETTI, T. *et al.* Alternativas visando potencializar o uso do carneiro hidráulico no bombeamento de água das chuvas. *In*: MOSTRA NACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA INTERDISCIPLINAR (MICTI), IX, 2016, Videira. **Anais [...]**. Videira: [S.n.], 2016. p. 1-5.
- CARARO, D. C. *et al.* Características construtivas de um carneiro hidraúlico com materiais alternativos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 349-354, 2007. DOI: 10.1590/s1415-43662007000400001. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v11n4/v11n04a01.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2020.
- CARVALHO, M. O. de; DINIZ, A.; NEVES, F. Numerical model for a Hydraulic Ram Pump. **International Review of Mechanical Engineering (IREME)**, v. 5, n. 4, p. 733-746, 2011.
- CARVALHO, M. O. de; DINIZ, A. C.; NEVES, F. J. Resonant Behavior of a Hydraulic Ram Pump. **Warpage Analyses on Thin Plate in Three-Plate Mold by Taguchi Method and Analysis of Variance (ANOVA) for PC, ABS and PC/ABS**, 1, 137, 2012.
- COSTA, R. N. T. **Golpe de ariete - Transiente hidráulico.** . [S.l.], UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. Disponível em: <http://www.gpeas.ufc.br/disc/hidr/aula05.pdf>. , 201-?
- COSTA, N. D. A. M. **Adoção do carneiro hidráulico para estudo didático.** Relatório (Estágio supervisionado obrigatório) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, 2019.
- COSTA, N. B.; SILVA, R. P. da; SILVA, W. A. da. Bombeamento de água no meio rural utilizando um carneiro hidráulico de baixo custo. **Agroecossistemas**, v. 3, n. 1, p. 13–17, 2011.

CREDO, M. C.; METRA, D. P. Design Analysis, Installation and Performance Evaluation of a Hydraulic Ram Pump System with a Modified Waste Valve. **Vietnam Journal of Science and Technology**, v. 58, n. 1, p. 107, 2020. DOI: 10.15625/2525-2518/58/1/13734.

DARDOT, J. P. Comportamento hidráulico de gotejadores pressurizados por carneiro hidráulico. 2012. 83 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Formas Alternativas de Energia)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

DENÍCULI, W. **Hidráulica**. Instalações de recalque. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola. 1992. v.2. 115p.

DOCOL. **Manual de Instalação**. Joinville: [s.n.], 2020. Disponível em: <https://docol-product-file.s3.amazonaws.com/manuais/Manual/2376000r06.pdf>. Acesso em: 9 nov. 2020.

EPAGRI. **Folder Carneiro hidráulico**. . Frei Rogério - SC, Ext. Rural NM/ED – Elcio Pedrão Escritório Municipal da Epagri de Frei Rogério. Disponível em: http://estatico.redeglobo.globo.com/2013/06/18/folder_carneiro_hidraulico.pdf. , 2013

FERREIRA, A. **Aplicação e otimização da bomba de aríete para elevação de água em meios rurais de Timor-Leste**. 2016. 79 f. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016. Disponível em: https://sigarra.up.pt/faup/pt/pub_geral.pub_view?pi_pub_base_id=139232. Acesso em: 9 nov. 2020.

GEORGE, E. E.; GU, S. Experimental Study on the Effect of Air Chamber Size and Operation Parameters on the Performance of a Hydraulic Ram Pump. **Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers**, v. 61, n. 4, p. 55–61, 2019. DOI: 10.5389/KSAE.2019.61.4.055.

GIRARDI, L.; GIORDANI, R. J. **Implantação do carneiro hidráulico nas propriedades dos alunos da escola estadual técnica agrícola de Guaporé**. Guaporé: Escola Estadual Técnica Agrícola, 2008.

JAFRI, M. Evaluation of Field Eligibility and Efficiency of a Single Compression 3” Hydraulic -Ramp-Pump. *In*: SEMINAR NASIONAL SAINS DAN TEKNIK FST UNDANA (SAINSTEK-IV), 2019, [S.I.]. **Proceedings [...]**. [S.I.]: [S.n.], 2019. p. 306-311.

JAFRI, M.; SANUSI, A. Analysis Effect of Supply Head and Delivery Pipe Length toward the Efficiency Hydraulic Ram 3 Inches. **International Research Journal of Advanced Engineering and Science**, v. 4, n. 2, p. 263–266, 2019.

JEFFERY, T. D. *et al.* **Hydraulic Ram Pumps**: A guide to ram pump water supply systems. London: ITDG Publishing, 1992.

JENNINGS, G. D. Hydraulic ram pumps. **Appropriate Technology**, v. 29, n. 3, p. 31–33, 2002. Disponível em: http://www.appropedia.org/Hydraulic_ram_pumps. Acesso

em: 9 nov. 2020.

LEE, S.-H. *et al.* Evaluation of Field Feasibility and Efficiency of Hydraulic Ram Pump. **Economic and Environmental Geology**, v. 49, n. 3, p. 243–248, 2016. DOI: 10.9719/eeg.2016.49.3.243.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. [S.l.]: [S.n.], 1997.

MARUMBY INDUSTRIA E COMERCIO DE BOMBAS LTDA. **Manuais**. [2020]. Disponível em: <http://www.bombasmarumby.com.br/p/manuais.html>. Acesso em: 17 jun. 2020.

MEIROVITCH, L. **Elements of Vibration Analysis**. [S.l.]: McGraw Hill, 1986.

MODERN Plastics Encyclopedia '96. New York: McGraw-Hill, 1996.

OLIVEIRA, T. J. C. de. Eficiência do carneiro hidráulico para bombeamento de água. **Proex**, p. 3–6, 2015.

OLIVEIRA, R. C. **Modelagem matemática de um carneiro hidráulico alternativo**. 2017. 21 f. Artigo (Graduação em Engenharia Civil) - UNICESUMAR, Maringá, 2017.

PAWLICK, M. *et al.* **Ram Pump Design and Installation Manual for use in Developing Countries Comprehensive Ram Pump Design and Installation Manual for use in Developing Countries Clemson Engineers for Developing Countries Ram Pump Group**. August 2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.28690.91849.

PEREIRA, G. M.; MELLO, C. R. **Aula prática 9: Carneiro Hidráulico**. Lavras. [2020]. Disponível em: <https://docplayer.com.br/10064552-Aula-pratica-9-carneiro-hidraulico.html>. Acesso em: 10 set. 2020.

ROJAS, R. N. Z. **Modelagem, Otimização e Avaliação de um Carneiro Hidráulico**. 2002. 70 f. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SARTURI, I. Construção e avaliação de um carneiro. **Conhecimento em Construção**, Joaçaba, v. 6, p. 61–72, 2019.

SARTURI, I.; DAGOSTINI, C. M. Construção e avaliação de um carneiro hidráulico em duas propriedades rurais. **Conhecimento Em Construção**, 6, 61-72, 2019. Disponível em: <https://unoesc.emnuvens.com.br/conheconstr/article/view/21836>.

SOBIESKI, W.; GRYGO, D.; LIPÍŃSKI, S. Measurement and analysis of the water hammer in ram pump. **Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences**, v. 41, n. 11, p. 1333–1347, 2016. DOI: 10.1007/s12046-016-0560-1.

SOBIESKI, W.; LIPÍŃSKI, S.; GRYGO, D. An analysis of the conditions during the autonomous start-up of a water ram. **Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences**, v. 45, n. 1, 2020. DOI: 10.1007/s12046-020-1272-0.

SONELASTIC®. **Módulo de elasticidade de polímeros Sonelastic®**. 2020.

Disponível em: <https://sonelastic.com/pt/fundamentos/tabelas-propriedades-materiais/polimeros.html>. Acesso em: 4 nov. 2020.

SOUZA, O. H. D.; AMORIM, E. L.; FORTES, F. C. A. Desenvolvimento e aplicação de um sistema de bombeamento d'água sustentável para irrigação. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 12, p. 32300–32315, 2019. DOI: 10.34117/bjdv5n12-302.

SUARDA, M.; SUCIPTA, M.; DWIJANA, I. G. K. Investigation on flow pattern in a hydraulic ram pump at various design and setting of its waste valve. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 539, n. 1, p. 1-10, 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/539/1/012008.

SUCIPTA, M.; SUARDA, M. Investigation and analysis on the performance of hydraulic ram pump at various design its sniffer valve. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 539, n. 1, p. 1-8, 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/539/1/012007.

TIAGO FILHO, G. L. **Carneiro hidráulico: o que é e como construí-lo**. Itajubá: CERPCH – Centro Nacional de Referência em Pequenos Aproveitamentos Hidroenergéticos, 2002. Disponível em: <https://cerpch.unifei.edu.br/documents/carneiro-hidraulico.pdf>.

TOLEDO, L. R. Resgate Secular: Projeto da Universidade de Lavras permite montar, com baixo custo, equipamento para elevação de água que não consome combustível. **Globo Rural**, out. 1997.

WIKIVERSITY. **Engineering Projects/Hydraulic ram/Howard Community College/Fall2012/p2501ATandT**. 2019. Disponível em: https://en.wikiversity.org/wiki/Engineering_Projects/Hydraulic_ram/Howard_Community_College/Fall2012/p2501ATandT. Acesso em: 16 out. 2020.

YKEDA, G. E.; BARBOSA, F. D. S.; DEL PINO, M. A. I. T. Estudo do rendimento de bombeamento para um protótipo de carneiro hidráulico de PVC. **Revista Agrogeoambiental**, [S.l.], v. 11, n. 1, p. 143–154, 2019. DOI: 10.18406/2316-1817v11n120191258. Disponível em: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/1258>. Acesso em: 30 ago. 2020.

YOUNG, B. W. Simplified analysis and design of the hydraulic ram pump. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy**, v. 210, n. 4, p. 295–303, 1996. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1996_210_048_02.

YOUNG, B. W. Design of homologous ram pumps. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, v. 119, n. 2, p. 360–365, 1997. DOI: 10.1115/1.2819142.

APÊNDICE A – DADOS COLETADOS

A1 – Dados operação câmara 1 (70mL)

Frequência [bat/min]	ω [Hz]	Tempo (vazão desperdiçada) [s]	vazão desperdiçada [L/min]	Tempo Vazão q_7 [s]	Vazão q_7 [L/min]	eficiência
20	0,33	24,95	28,86	162,06	0,370	9%
38	0,63	36,55	19,70	112,84	0,532	18%
51	0,85	49,67	14,50	109,03	0,550	25%
61	1,02	56,36	12,78	87,35	0,687	35%
70	1,17	61,75	11,66	78,55	0,764	42%
90	1,50	100,06	7,20	92,09	0,652	57%

Fonte: Elaboração do autor (2020).

A2 – Dados operação câmara 2 (140mL)

Frequência [bat/min]	ω [Hz]	Tempo (vazão desperdiçada) [s]	vazão desperdiçada [L/min]	Tempo Vazão q_7 [s]	Vazão q_7 [L/min]	eficiência
8	0,13	25,18	28,59	236,07	0,254	6%
27	0,45	29,57	24,35	158,92	0,378	10%
35	0,58	33,88	21,25	106,9	0,561	18%
44	0,73	39,55	18,20	82,72	0,725	26%
58	0,97	51	14,12	71,76	0,836	38%
71	1,18	61,48	11,71	69,77	0,860	47%
83	1,38	74,83	9,62	73,21	0,820	54%

Fonte: Elaboração do autor (2020).

A3 – Dados operação câmara 3 (380mL)

Frequência [bat/min]	ω [Hz]	Tempo (vazão desperdiçada) [s]	vazão desperdiçada [L/min]	Tempo Vazão q_7 [s]	Vazão q_7 [L/min]	eficiência
34	0,57	32,35	22,26	89,05	0,674	20%
41	0,68	36,54	19,70	70,69	0,849	28%
50	0,83	38,79	18,56	66,05	0,908	32%
60	1,00	52,71	13,66	63,95	0,938	44%
67	1,12	57,82	12,45	65,67	0,914	47%
85	1,42	76,34	9,43	70,24	0,854	57%

Fonte: Elaboração do autor (2020).

A4 – Dados operação câmara 4 (1.000mL)

Frequência [bat/min]	ω [Hz]	Tempo (vazão desperdiçada) [s]	vazão desperdiçada [L/min]	Tempo Vazão q_7 [s]	Vazão q_7 [L/min]	eficiência
25	0,42	30,9	23,30	89,11	0,673	19%
38	0,63	35,46	20,30	81,05	0,740	24%
41	0,68	35,39	20,34	75,64	0,793	26%
44	0,73	40,15	17,93	67,57	0,888	32%
50	0,83	45,96	15,67	65,79	0,912	38%
56	0,93	48,02	14,99	65,22	0,920	40%
62	1,03	52,19	13,80	65,09	0,922	43%
69	1,15	59,26	12,15	65,29	0,919	48%
81	1,35	68,36	10,53	68,64	0,874	52%

Fonte: Elaboração do autor (2020).

A5 – Dados operação câmara 5 (9.000mL)

Frequência [bat/min]	ω [Hz]	Tempo (vazão desperdiçada) [s]	vazão desperdiçada [L/min]	Tempo Vazão q_7 [s]	Vazão q_7 [L/min]	eficiência
29	0,48	31,81	22,63	111,84	0,536	16%
34	0,57	34,87	20,65	95,64	0,627	20%
49	0,82	41,61	17,30	75,4	0,796	30%
61	1,02	51,79	13,90	67,55	0,888	41%
72	1,20	59,32	12,14	68,79	0,872	46%
77	1,28	60,32	11,94	69,95	0,858	46%

Fonte: Elaboração do autor (2020).

APÊNDICE B – RAIOS DE FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA R DE REFERÊNCIA

B1 – Tabela de frequências de ressonância “r”

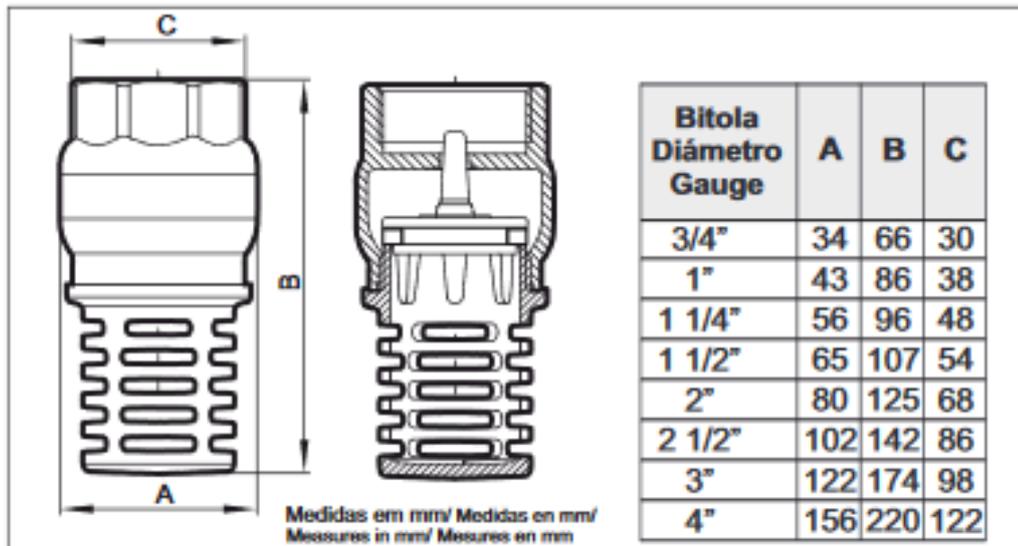
Volume [L]	ω [bat/min]							
	20	30	40	50	60	70	80	90
0,00005	0,24	0,16	0,12	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05
0,0001	0,34	0,23	0,17	0,14	0,11	0,10	0,09	0,08
0,00038	0,67	0,45	0,34	0,27	0,22	0,19	0,17	0,15
0,001	1,09	0,72	0,54	0,43	0,36	0,31	0,30	0,27
0,01	3,44	2,29	1,72	1,37	1,15	0,98	0,82	0,72

Fonte: Elaboração do autor (2020).

ANEXO A – VÁLVULAS COMERCIAIS UTILIZADAS

A1 – Detalhe válvula de sucção original antes de ser adaptada como válvula de impulso

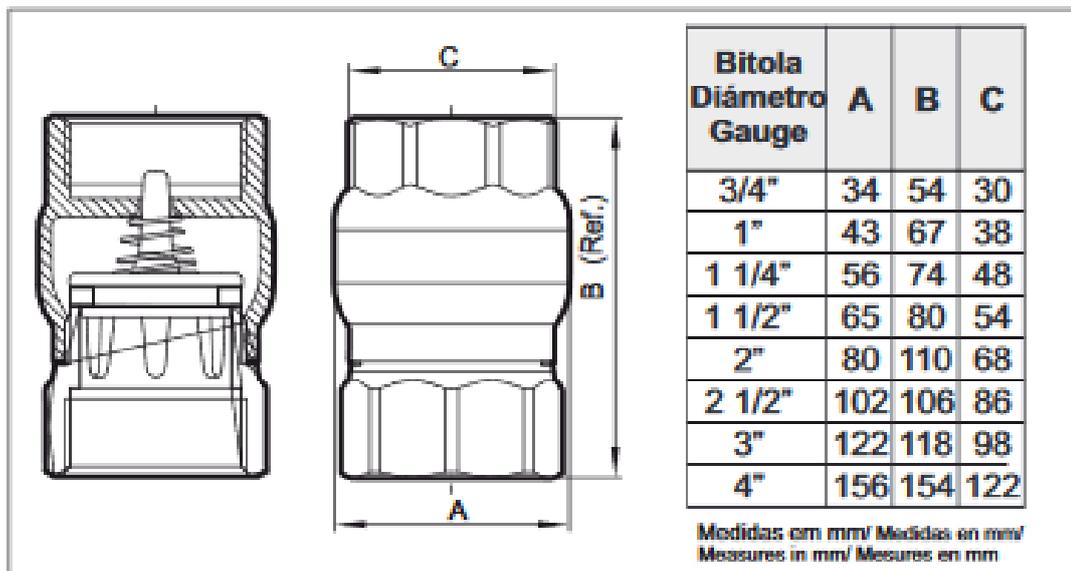
Figura 29 – Dimensões da válvula utilizada como válvula de impulso antes da adaptação



Fonte: DOCOL (2020).

A2 – Válvula de retenção original utilizada como válvula de recalque

Figura 30 – Dimensões da válvula utilizada como válvula de recalque



Fonte: DOCOL (2020).