

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

**IMPLEMENTAÇÃO DE MODELO COMPUTACIONAL
EMPREGANDO FERRAMENTA DE CFD PARA ANÁLISE DO
COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE BOMBA CARNEIRO
NÃO INDUSTRIAL**

BRUNA LOGATTI

ORIENTADOR: DR. ERICH KELLNER

SÃO CARLOS
(AGOSTO/2024)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**IMPLEMENTAÇÃO DE MODELO COMPUTACIONAL
EMPREGANDO FERRAMENTA DE CFD PARA ANÁLISE DO
COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE BOMBA CARNEIRO
NÃO INDUSTRIAL**

BRUNA LOGATTI

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. Erich Kellner

**São Carlos
2024**

Logatti, Bruna

Implementação de Modelo Computacional Empregando Ferramenta de CFD para Análise Do Comportamento Hidráulico de Bomba Carneiro Não Industrial / Bruna Logatti -- 2024.
149f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos
Orientador (a): Erich Kellner
Banca Examinadora: Rodrigo de Melo Porto, Jorge Akutsu, Rodrigo Eduardo Cordoba, Woodrow Nelson Lopes Roma
Bibliografia

1. Carneiro Hidráulico. 2. CFD . 3. Ansys Discovery 2023. I. Logatti, Bruna. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Bruna Logatti, realizada em 01/07/2024.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Erich Kellner (UFSCar)

Prof. Dr. Rodrigo de Melo Porto (USP)

Prof. Dr. Jorge Akutsu (UFSCar)

Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Cordoba (UFSCar)

Prof. Dr. Woodrow Nelson Lopes Roma (USP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

A Deus, por não me permitir desistir.

A minha família, por me permitir sonhar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir perseverar.

Agradeço a minha família pelo eterno incentivo, aos meus pais, a minha irmã e ao Vinícius por sempre me apoiarem, acreditarem mais em mim do que eu mesma e me mostrarem que o amor é maior do que qualquer barreira.

Ao meu orientador Prof. Dr. Erich Kellner, a quem devo muito mais do que esse pequeno agradecimento, você é um verdadeiro professor, ensinou-me muito mais do que o conteúdo, ensinou-me a ser uma pessoa melhor. Obrigada Professor, sem você esse trabalho não existiria!

Às Faculdades Integradas de Araraquara que me formou, permitiu meus primeiros passos na carreira acadêmica e aonde fui muito feliz. Meu eterno muito obrigada!

Aos meus alunos, por serem minha fonte de inspiração, se cheguei até aqui é graças a vocês!

Aos meus amigos por tornarem essa jornada mais alegre e gratificante.

A todo o corpo docente e aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, cujo apoio e ensinamentos foram essenciais para o desenvolvimento desse trabalho.

“Os mais belos pensamentos nada são sem as obras.” - Santa Terezinha do Menino Jesus (História de uma Alma, p. 209)

RESUMO

Em assentamentos urbanos ou zonas rurais observa-se a existência de domicílios localizados próximos a regiões de abundante disponibilidade hídrica, entretanto, em muitos casos há a inexistência de recursos financeiros para aquisição e implantação da infraestrutura elétrica básica para a adoção de soluções convencionais para abastecimento de água. Os carneiros hidráulicos ou bombas de carneiro são dispositivos utilizados para elevar água, seu funcionamento se dá por meio da própria energia hidráulica. Esses dispositivos podem ser vistos como uma alternativa sustentável no transporte de água. No entanto, quando analisada a produção científica atual sobre o assunto, muitos obstáculos são encontrados. A produção científica é limitada até os dias de hoje, nota-se também uma ausência de produções voltadas a área de agronomia e agricultura, ao desenvolvimento de modelos de carneiros hidráulicas com baixo custo, que utilizem novas tecnologias para modelagem e que otimizem o modelo da bomba carneiro. É com esse cenário que a fluidodinâmica computacional, também chamada de CFD (*computational fluid dynamics*) pode ser vista como uma solução. O objetivo principal desse trabalho foi a aplicação de técnicas de CFD na modelagem de fluxo interno de uma bomba carneiro não industrial. Para a construção do modelo 3D da bomba carneiro foi utilizado o software Blender, o carneiro hidráulico teve como base o estudo de Oliveira Junior *et al* (2021). Inicialmente, decidiu-se utilizar o software OpenFOAM para realização das simulações, porém, devido a dificuldades encontradas de adaptação da malha ao programa, alterou-se para o software Ansys Discovery 2023. Foram desenvolvidas quatro malhas distintas, já para a simulação foram criados quatro cenários, variando o volume da câmara de ar, cada um deles contendo sete simulações, variando a carga de pressão. Os resultados das simulações revelaram princípios fundamentais do funcionamento do carneiro hidráulico, como a influência da carga de pressão na entrada da bomba, na vazão de entrada, a relação entre a carga de pressão na saída e na entrada, e a importância do tamanho da câmara de ar no deslocamento de água.

Palavras-chave: 1. Carneiro Hidráulico 2. CFD 3. Ansys Discovery 2023 4. Modelagem computacional 5. Abastecimento de água

ABSTRACT

In urban settlements or rural areas households are often located near regions with abundant water availability. However, in many cases, there is a lack of financial resources for the acquisition and implementation of basic electrical infrastructure for conventional water supply solutions. Hydraulic rams or ram pumps are devices used to elevate water, and they operate using only hydraulic energy. These devices can be seen as a sustainable alternative for water transportation. However, when analyzing the current scientific production on the subject, many obstacles are encountered. The scientific output is limited to this day, and there is also a noticeable absence of studies focused on agronomy and agriculture, the development of low-cost hydraulic ram models, the use of new technologies for modeling, and the optimization of the ram pump model. In this context, computational fluid dynamics, also known as CFD, can be seen as a solution. This study aims to apply CFD techniques in the internal flow modeling of a non-industrial ram pump. The 3D model of the ram pump was constructed using Blender software, based on the study by Oliveira Junior et al (2021). Initially, it was decided to use OpenFOAM software for the simulations; however, due to difficulties encountered in adapting the mesh to the program, it was changed to Ansys Discovery 2023 software. Four different meshes were developed, four scenarios were created for the simulation, varying the volume of the air chamber, each of them containing seven simulations, varying the pressure loads. Results unveiled fundamental operational principles of the hydraulic ram, including the influence of pressure load at the pump inlet on inlet flow, the relationship between pressure loads at the outlet and inlet, and the significance of air chamber size in water displacement.

Keywords: 1. Hydraulic Ram 2. CFD 3. Ansys Discovery 2023 4. Computational modeling 5. Water supply

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bomba carneiro.	29
Figura 2 – Sistema no instante t_0	30
Figura 3 – Esquema de instalação uma bomba carneiro.	32
Figura 4 – Esboço de uma planta simples.	34
Figura 5 – Equilíbrio de forças – esboço e símbolos.	34
Figura 6 – Elementos da bomba carneiro.	31
Figura 7 – Ilustração da variação da pressão junto à válvula de retenção.	37
Figura 8 – Tipos de materiais alternativos utilizados no carneiro.	40
Figura 9 – Carneiro hidráulico em operação (A) e local de instalação (B).	41
Figura 10 – Carneiro hidráulico construído.	41
Figura 11 – Diferentes tamanhos das câmaras de ar/campânulas.	42
Figura 12 – Visualização da rede de palavras – primeira busca.	43
Figura 13 – Visualização da rede de palavras – segunda busca.	43
Figura 14 – Visualização densidade palavras – primeira busca.	44
Figura 15 – Visualização densidade palavras – segunda busca.	44
Figura 16 – Visualização de sobreposição – primeira busca.	45
Figura 17 – Visualização de sobreposição – segunda busca.	45
Figura 18 – Produção científica anual – primeira busca.	46
Figura 19 – Produção científica anual – segunda busca.	46
Figura 20 – Autores mais relevantes – primeira(a) e segunda(b) busca.	47
Figura 21 – Nuvem de palavras – primeira (a) e segunda (b) busca.	47
Figura 22 – Fenômeno da fluidodinâmica observado a partir de superfície sólida.	54
Figura 23 – Formas Geométricas da Malha.	56
Figura 24 – Malha estruturada e não-estruturada.	56
Figura 25 – Fluxograma do processo de desenvolvimento do Carneiro Hidráulico.	63
Figura 26 – Relação peças utilizadas para modelagem da bomba carneiro.	64
Figura 27 – Opções de figuras 3D disponíveis no Blender para modelagem.	65
Figura 28 – Adição do cilindro ao desenho.	66
Figura 29 – Inserida as medidas para o cilindro.	67
Figura 30 – Adição do cubo.	67
Figura 31 – Inserida medida do lado do cubo.	68
Figura 32 – Ativada propriedade “esconder” para o cilindro.	68

Figura 33 – Estendidas as faces laterais do cubo.....	69
Figura 34 – O cubo é transformado em um prisma retangular.....	69
Figura 35 – A medida do lado do prisma ultrapassa a medida do diâmetro do cilindro.	70
Figura 36 – Cópia do prisma inicial e rotação em 45°.....	70
Figura 37 – Colocação de cada prisma copiado em uma extremidade.....	71
Figura 38 – Aumento da altura dos prismas auxiliares.	71
Figura 39 – Seleção do modificador (modo objeto).....	72
Figura 40 – Opções de operações da função <i>Boolean</i>	72
Figura 41 – Operação da diferença da “porca” por um dos prismas auxiliares.	73
Figura 42 – Em destaque laranja nota-se que a “porca” tomou formato de um octógono.	73
Figura 43 – Figura resultante do processo descrito.	74
Figura 44 – União entre o octógono e o cilindro inicial utilizando o comando <i>Join</i>	74
Figura 45 – Inclusão de novo cilindro para formação do “furo” no <i>Nipple</i>	75
Figura 46 – <i>Nipple</i> após a operação booleana de diferença.	75
Figura 47 – Vista lateral do <i>Nipple</i>	76
Figura 48 – Vista lateral do carneiro.	76
Figura 49 – Vista frontal carneiro.	77
Figura 50 – Válvulas e suas estruturas internas diferenciadas.	77
Figura 51 – Elementos do carneiro modelado.	78
Figura 52 – Carneiro em corte com suas faces, internas e externas.	78
Figura 53 – Malha 3D do carneiro.	79
Figura 54 – Elementos que viraram blocos após a execução do <i>SwiftBlock</i>	80
Figura 55 – Carneiro após primeira importação para o Gmsh.	81
Figura 56 – Detalhe das peças mais críticas: válvulas e registro.....	82
Figura 57 – A malha se encontrava com poucos nós e grandes espaços.....	82
Figura 58 – Função utilizada para refinamento da malha.	83
Figura 59 – Carneiro após duas aplicações da função <i>Refine by splitting</i>	84
Figura 60 – Vista geral da malha do carneiro.....	84
Figura 61 – Detalhes da válvula pé e crivo.	85
Figura 62 – Detalhes do registro de esfera, tê e joelho.....	85
Figura 63 – Detalhes do adaptador de mangueira.	86
Figura 64 – Detalhes da câmara de ar.....	86
Figura 65 – Detalhe das válvulas.....	87

Figura 66 – Malha após o refinamento, reduziram-se os espaços e aumentaram a quantidade de nós.	87
Figura 67 – Processo de exportação da malha em um arquivo .msh.....	88
Figura 68 – Propriedades do arquivo .msh da malha.	88
Figura 69 – Malha após corte central.	90
Figura 70 – Delimitação elemento <i>outlet</i> (saída).....	91
Figura 71 – Delimitação elemento <i>wall</i> (parede).	91
Figura 72 - Delimitação elemento <i>inlet</i> (entrada).....	91
Figura 73 – Delimitação elemento <i>footvalve</i> (válvula pé e crivo).....	92
Figura 74 – Delimitação elemento mesh2D (malha 2D).....	92
Figura 75 – Diretórios criados a partir do addon <i>SnappyHexMesh</i>	93
Figura 76 – Malha gerada no ParaView após comandos.....	93
Figura 77 – Ausência da parede inferior.	94
Figura 78 – Malha no formato . <i>stl</i> no Gmsh.....	94
Figura 79 – Malha no formato . <i>stl</i> no ParaView.	95
Figura 80 – Visão Geral da Malha 1 no Blender.....	97
Figura 81 – Malha 1: Posição das válvulas (ambas abertas).	97
Figura 82 – Visão Geral da Malha 1 no ANSYS Discovery 2023.....	98
Figura 83 – Adaptação da Malha 1 aos dados de entrada.	98
Figura 84 – Malha 2: Válvula 1 fechada e válvula 2 aberta.	99
Figura 85 – Visão Geral da Malha 2 no Blender.....	99
Figura 86 – Visão Geral da Malha 2 no ANSYS Discovery 2023.....	100
Figura 87 – Adaptação da Malha 2 aos dados de entrada.	100
Figura 88 – Malha 3: Posição das válvulas (ambas fechadas).	101
Figura 89 – Visão Geral da Malha 3 no Blender.....	101
Figura 90 – Visão Geral da Malha 3 no ANSYS Discovery 2023.....	102
Figura 91 – Adaptação da Malha 3 aos dados de entrada.	102
Figura 92 – Malha 4: Válvula 1 aberta e Válvula 2 fechada.	103
Figura 93 – Visão Geral da Malha 4 no Blender.....	103
Figura 94 – Visão Geral da Malha 4 no ANSYS Discovery 2023.....	104
Figura 95 – Adaptação da Malha 4 aos dados de entrada.	104
Figura 96 – Visão geral da Malha 4 com Câmara com 20% do Volume ocupado por ar.	105
Figura 97 – Menu de configurações do ANSYS Discovery 2023.....	106

Figura 98 – Resposta do Modelo ao Cenário 1 - Simulação 7.	107
Figura 99 – Gráfico Pressão x Tempo ponto saída (<i>outflow</i>): Cenário 1 – Simulação 7.	107
Figura 100 – Volume Líquido a ser deslocado.	107
Figura 101 – Visão geral da Malha 4 com Câmara com 50% do Volume ocupado por ar.	109
Figura 102 – Resposta do Modelo ao Cenário 2 - Simulação 7.	110
Figura 103 – Gráfico Pressão x Tempo ponto saída (<i>outflow</i>): Cenário 2 – Simulação 7.	110
Figura 104 – Opção existente de exportar dados no formato .csv.	110
Figura 105 – Visão geral da Malha 4 com Câmara com 80% do Volume ocupado por ar.	112
Figura 106 – Gráfico Pressão x Tempo ponto saída (<i>outflow</i>): Cenário 3 – Simulação 7.	112
Figura 107 – Resposta do Modelo ao Cenário 3 - Simulação 7.	113
Figura 108 – Visão geral da Malha 1 com Câmara com 99% do Volume ocupado por ar.	113
Figura 109 – Resposta do Modelo ao Cenário 4 - Simulação 7.	115
Figura 110 – Gráfico Pressão x Tempo ponto saída (<i>outflow</i>): Cenário 4 – Simulação 7.	115
Figura 111 – Variação da vazão de entrada em função da carga de pressão na entrada da bomba.	119
Figura 112 – Relação entre as cargas de Pressão Máximas obtidas pela simulação em CFD e pelas equações de Joukowski e Jouguet.	121
Figura 113 – Desenho esquemático da bomba carneiro empregada na simulação.	122
Figura 114 – Variação do Volume Deslocado (VD) em função da relação entre as cargas de pressão na saída e na entrada, para $n=1,4$	132
Figura 115 – Variação do Volume Deslocado (VD) em função da relação entre as cargas de pressão na saída e na entrada, para $n=1,2$	132
Figura 116 – Variação do Volume Deslocado (VD) em função da relação entre as cargas de pressão na saída e na entrada, para $n=1,0$	133
Figura 117 – Ajuste da curva de predição do volume deslocado em relação aos valores obtidos por simulação CFD.	133

Figura 118 – Relação da frequência de pulsos com a celeridade (a) e o comprimento da linha de recalque (L).....	134
Figura 119 – Fluxograma para construção da curva, determinação do volume da câmara ou escolha do volume da câmara.....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relações do comprimento da tubulação de elevação.	33
Tabela 2 – Cálculo do volume da câmara com base na variação de diâmetro e comprimento.	62
Tabela 3 – Medidas: Diâmetro, raio e espessura.	63
Tabela 4 – Principais medidas dos acessórios.	64
Tabela 5 – Resultados obtidos pelas Simulações do Cenário 1.	108
Tabela 6 – Resultados obtidos pelas Simulações do Cenário 2.	111
Tabela 7 – Resultados obtidos pelas Simulações do Cenário 3.	114
Tabela 8 – Resultados obtidos pelas Simulações do Cenário 4.	116
Tabela 9 – Parâmetros de saída obtido após a simulação por CFD da bomba carneiro, em função dos parâmetros carga de pressão na entrada (h) e do volume da Câmara ($V_{\text{Câmara}}$).	117
Tabela 10 – Valores da pressão máxima da saída obtidas pela simulação CFD e pelas Equações de Joukowski e Jouguet.	121
Tabela 11 – Valores dos volumes deslocados (V_D) obtidos por simulação, para câmara de 0,200l. variando a celeridade, o coeficiente politrópico e a relação entre a pressão de saída e a de entrada.	128
Tabela 12 – Valores dos volumes deslocados (V_D) obtidos por simulação, para câmara de 0,267l. variando a celeridade, o coeficiente politrópico e a relação entre a pressão de saída e a de entrada.	129
Tabela 13 – Valores dos volumes deslocados (V_D) obtidos por simulação, para câmara de 0,300l. variando a celeridade, o coeficiente politrópico e a relação entre a pressão de saída e a de entrada.	130
Tabela 14 – Valores dos volumes deslocados (V_D) obtidos por simulação, para câmara de 0,500l. variando a celeridade, o coeficiente politrópico e a relação entre a pressão de saída e a de entrada.	131

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação das bombas hidrodinâmicas ou cinéticas.	27
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	20
2 OBJETIVOS	23
2.1 Objetivo principal	23
2.1 Objetivos secundários	23
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1 A água e o rural	24
3.2 Bombas hidráulicas	27
3.2.1 Bomba carneiro	28
3.2.2 Cenário atual das pesquisas sobre Carneiros Hidráulicos	42
3.3 O campo de pesquisa do carneiro hidráulico: perspectiva atual	48
3.4 Desafios, lacunas e oportunidades de pesquisa	49
3.4.1 Ausência de trabalhos relacionados com agronomia, agricultura	49
3.4.2 Ausência de trabalhos relacionados com desenvolvimento de modelos de carneiros hidráulicas com baixo custo	50
3.4.3 Ausência de trabalhos que utilizam novas tecnologias	50
3.4.4 Ausência de trabalhos recentes que otimizam o modelo da bomba carneiro	51
4 MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1 Análise Bibliométrica	52
4.2 Fluidodinâmica Computacional	53
4.2.1 Método dos Volumes Finitos	54
4.2.2 Discretização da malha numérica	55
4.3 Software disponíveis para aplicação do CFD	57
4.3.1 OpenFOAM ®	57
4.3.2 ANSYS Discovery ®	57
4.4 Construção da malha numérica e utilização de softwares	58
4.4.1 Blender: <i>SwifBlock</i> , <i>SnappyHexMesh GUI</i> e <i>Export OF</i>	58

4.4.2 Gmsh.....	60
4.5 Elementos Físicos que compõe o carneiro hidráulico	61
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1 Modelagem 3D do Carneiro Hidráulico	65
5.1.1 Modelagem do <i>Nipple</i>	66
5.1.2 Visão 3D	76
5.2 Modelagem da malha do Carneiro Hidráulico	79
5.2.1 Malha Gmsh	80
5.2.3 Adaptações da Malha.....	89
5.2.4 Necessidade de mudança do software de simulação	96
5.3 Simulação utilizando o ANSYS Discovery 2023.....	96
5.3.1 Malha 1: Ambas válvulas abertas.....	97
5.3.2 Malha 2: Válvula 1 fechada e válvula 2 aberta	99
5.3.3 Malha 3: Ambas válvulas fechadas	101
5.3.4 Malha 4: Válvula 1 Aberta e Válvula 2 Fechada.....	102
5.4 Do Resultado das Simulações	104
5.4.1 Cenário 1 - Malha 4: Câmara 20% do Volume	105
5.4.2 Cenário 2 - Malha 4: Câmara 50% do Volume	109
5.4.3 Cenário 3 - Malha 4: Câmara 80% do Volume	112
5.4.4 Cenário 4 - Malha 1: Câmara 99% do Volume	113
5.5 Da Aplicação do Modelo Gerado	117
5.5.1 Avaliação da vazão de entrada (Q_e).....	118
5.5.2 Verificação da Carga de Pressão na Saída (H).....	119
5.5.3 Verificação do Volume de Água Deslocado (V_D).....	122
5.5.4 Verificação da Vazão Média Descarregada (Q_D).....	133
5.5.5 Verificação Da Condição De Não Esvaziamento Da Câmara – Comprimento Mínimo Da Linha De Recalque.....	134

5.5.6 Verificação da Eficiência da Bomba Carneiro	136
5.5.7 Proposta para Escolha, Construção da Curva e Avaliação de uma Bomba Carneiro	136
6 CONCLUSÕES	140
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	142

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Desde os primórdios da humanidade nota-se que o desenvolvimento humano sempre esteve atrelado ao saneamento básico. As primeiras civilizações desenvolviam-se à beira de rios, onde tinham acesso à água para agricultura e suas atividades básicas (preparação de alimentos, dessedentação, higiene pessoal, limpeza doméstica, entre outras) (TOKMAKIDIS, 2009).

Em 1997, com a Lei Nº 9.433, também chamada de Política Nacional de Recursos Hídricos, o Brasil concordou que a água é um bem essencial, insubstituível que deve ser assegurado a atual e futuras gerações com qualidade, quantidade e regularidade. Dentro da Política Nacional de Recursos Hídricos, aponta-se o artigo 1, item III, que diz: “em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;”.

A estimativa populacional de 2021 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021) indica que o Brasil possui 213.317.639 habitantes. A pesquisa nacional de amostra de domicílios (IBGE, 2015) aponta que 84,7% da população brasileira vive no ambiente urbano, o restante (15,3%) em zonas rurais. Apesar de ser uma pequena porcentagem, mais de 32 milhões de brasileiros pertencem a população rural e pela Política Nacional de Recursos Hídricos, também devem ter acesso a água.

Enquanto isso, do lado energético tem-se uma cobertura que atinge 97,8% dos domicílios brasileiros. Nas áreas urbanas este percentual chega a 99,1% e na área rural atinge 89,7%. Em 2010 havia 1,3% de domicílios sem energia elétrica, com maior incidência nas áreas rurais do País (7,4%) (IBGE, 2012).

Deve-se salientar que, ainda que esses domicílios estejam em regiões de abundante disponibilidade hídrica, muitas vezes não há recursos financeiros para aquisição e implantação da infraestrutura elétrica básica para a adoção de soluções convencionais de abastecimento de água. Dessa maneira é importante compreender a necessidade da adoção de diferentes métodos que possibilitem o abastecimento de água em zonas rurais, tanto para a dessedentação animal quanto para a irrigação ou uso em outras atividades essenciais para a fixação do homem e desenvolvimento da região.

Com isso, o carneiro hidráulico surge como opção para realizar o abastecimento de água dessas regiões. Seu funcionamento é dado por meio de uma sequência de golpes de aríete, a montagem do carneiro pode ser feita por meio de tubos de PVC, garrafas plásticas (PET) e conexões metálicas ou de PVC, apontando a facilidade de sua construção (BRASIL, 2015).

O carneiro hidráulico é classificado como uma bomba hidráulica especial, sua operação é dada através do fechamento de uma válvula que interrompe o movimento de água proveniente de uma fonte de alimentação que deve estar locada em um nível superior. Salienta-se que esses equipamentos precisam de uma relação entre a vazão de alimentação e de recalque, não muito bem estabelecidas, devendo ser instalados em um nível abaixo da fonte de suprimento (BRASIL, 2015).

Dentre as vantagens do carneiro hidráulico destaca-se que ele trabalha ininterruptamente, não consome energia elétrica ou combustíveis fósseis, é uma tecnologia limpa, apresenta uma grande vida útil, pouco desgaste, tem uma construção e manutenção de baixo custo e sua operação não necessita de mão de obra qualificada. Sua principal desvantagem é que é pouco eficiente e tem um rendimento variável (BRASIL, 2015; COSTA, GALINDO, 2018).

Apesar do grande número de características positivas e que se adaptam bem a temas atuais, Logatti e Kellner (2021), através de uma análise sistêmica da bibliografia, apontaram uma ausência de obras de referência para o assunto e indicaram a necessidade de mais estudos relacionados com a modelagem, uso de novas tecnologias e melhoria de desempenho das bombas.

Portanto esse trabalho justifica-se pelo entendimento do funcionamento dessa bomba hidráulica ou do comportamento desse equipamento de maneira a facilitar ou permitir a melhor utilização pela população não atendida. Destaca-se que para tal conhecimento chegar a essa população existe como alternativas a utilização de políticas de educação, como distribuição de folhetos com instruções em áreas rurais (*folders*), aplicação de oficinas para essa população, assim como disponibilização de vídeos instrucionais em plataformas da *internet*, além de publicações (*posts*) em redes sociais.

Esta tese foi estruturada em seis partes, contando esta Introdução, compõem: 2. Objetivos (1 página), onde estão estabelecidos o objetivo principal e os objetivos secundários; 3. A Revisão Bibliográfica (28 páginas), que inclui a revisão sistêmica sobre o tema, assim

como o referencial teórico que subsidiou a elaboração da tese; 4. Material e Métodos (14 páginas), que descreve os dispositivos empregados na simulação, assim como os procedimentos para sua realização; 5. Resultados e Discussão (76 páginas), onde os resultados são discutidos à luz do referencial teórico; e, por fim, 6. Conclusão (2 páginas), que traz as principais conclusões deste trabalho e propostas para trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS

Apresentados a seguir os objetivos buscados durante o desenvolvimento do trabalho

2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é aplicar técnicas de CFD (*computational fluid dynamics* – dinâmica dos fluidos computacional) para modelar o fluxo interno de uma bomba carneiro.

2.1 Objetivos secundários

O trabalho apresenta como objetivos secundários:

- Construir curvas de vazão, altura de elevação e eficiência de uma bomba carneiro;
- Simular a variação de pressão da câmara de pressurização ao longo do tempo;
- Modelar fisicamente o *grid* da bomba carneiro.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é apresentada a revisão bibliográfica que norteou esta pesquisa. Inicialmente, apoiou-se em literatura que reforça a importância do uso e do acesso à água, principalmente na região rural e como o emprego do carneiro hidráulico pode contribuir com isso; na sequência é apresentado conteúdo sobre o que a literatura técnica atual apresenta sobre as bombas carneiros e fenômenos hidráulicos característicos e importantes ao seu funcionamento. Além disso, apresenta-se a revisão sistêmica sobre os carneiros hidráulicos que, além de ilustrar as mais recentes pesquisas sobre o tema, permitiu a identificação de lacunas as quais permitiram delimitar o desenvolvimento desta pesquisa.

3.1 A água e o rural

Frente a evolução observada junto ao setor de saneamento básico com a instituição da Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, dos Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB) e do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) - Decreto nº 8.141, de 20 de novembro de 2013 -, o maior acesso da população brasileira a água se torna uma realidade representada por números, com um índice médio de atendimento total de água no ano de 2020 de 84,1% frente a 83% em 2014 (BRASIL, 2016; BRASIL, 2020).

Entretanto, em vista desses dados, outros dois se destacam, em 2020, na região norte 58,9% da população total era abastecida com água, enquanto no Nordeste esse índice era de 74,9%, levando em consideração que essas são as duas regiões com a maior porcentual de população rural no Brasil, 26,5% e 26,9%, respectivamente, nota-se um padrão em que regiões menos urbanizadas possuem um abastecimento de água mais deficiente (BRASIL, 2020; IBGE, 2012).

Reconhecer e atender essa população, enxergando suas peculiaridades em relação ao uso e disponibilidade de recursos, sendo eles naturais ou produzidos pelo homem, é um dos grandes desafios observados para o saneamento básico no Brasil. Para gerir esse cenário em 2019 foi lançado o Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR) que se estruturou consultando outros marcos referenciais do saneamento no Brasil, conceituando o que deve ser considerado rural, realizando uma análise situacional do saneamento rural, estabelecendo diretrizes e estratégias, além de metas a serem cumpridas em curto, médio e longo prazo. Por fim, estabeleceu as necessidades de investimento, como o programa deve ser gerido para ter sucesso, e apresentou algumas experiências com desfecho positivo (BRASIL, 2019b).

Dentre todos os tópicos abordados, destaca-se a questão de soluções para o saneamento rural, ou seja, as estratégias que devem ser adotadas para o atendimento das demandas de saneamento básico nas áreas rurais brasileiras. Para isso, foram divididos em três eixos de integração: gestão dos serviços, educação e participação social, e tecnologia, entre eles cita-se o eixo de tecnologia, que tem como objetivo dar suporte às medidas estruturais, adotar/criar ferramentas práticas e capazes de atender as necessidades do saneamento, seguindo os princípios de universalidade e equidade (BRASIL, 2019b).

Para cada um desses três eixos foram definidas diretrizes para adoção das soluções, essas podem dizer respeito a ações a serem tomadas, comportamentos que devem ser observados, processos que necessitam ser implementados, entre outros. Assim como informado anteriormente, será dado o destaque para diretrizes que dizem respeito ao eixo tecnológico, principalmente as que frisam a adoção de soluções já existentes, fáceis de passarem pelo processo de manutenção, com baixo custo e que promovem energias renováveis. Portanto dentre as oito diretrizes definidas citam-se três, sendo elas:

DIRETRIZ 1

PRIORIZAR A IMPLANTAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE MAIOR ACEITABILIDADE E DE FÁCIL MANEJO PELA POPULAÇÃO LOCAL.

ESTRATÉGIAS:

1.1 - Dar preferência à tecnologia já utilizada e, quando necessário, promover sua adequação ou melhoria, ou, ainda, indicar serviços públicos de abastecimento de água capazes de atender às demandas locais, desde que garantam a salubridade, a privacidade, o conforto, a segurança e a dignidade da população, e que considerem as diversidades sociais, culturais, étnicas e regionais. [...] (BRASIL, 2019b, p. 139).

A Diretriz 1 expõe algumas concepções que até certo ponto podem parecer evidentes para os tomadores de decisões, entretanto são práticas que muitas vezes não são adotadas, ao implantar um sistema de abastecimento é necessário realizar uma pré-análise do ambiente e seus constituintes, ou seja, se for adotado como solução do transporte da água um conjunto motobomba, é essencial que seja verificada a disponibilidade de energia elétrica, caso opere por meio de combustíveis fósseis, qual a facilidade da população em questão de obter esse combustível, em caso da quebra do conjunto, se existe um fácil acesso a profissionais que realizem tanto o conserto quanto a manutenção. Assim sendo, soluções já existentes, com fácil manutenção, manejo e que são aceitas pela população local são as mais indicadas. Outro ponto interessante é o abordado pela Diretriz 3:

DIRETRIZ 3

GARANTIR ACESSIBILIDADE FINANCEIRA PARA A PERENIDADE DO SERVIÇO PÚBLICO DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA ESCOLHIDO E IMPLANTADO NA COMUNIDADE.

ESTRATÉGIAS:

3.1 - Criar mecanismos de subsídios e financiamentos, para manutenção dos serviços públicos de abastecimento de água.

3.2 - Estimular o uso de tecnologia social e sustentável de abastecimento de água e, quando possível, de matéria-prima local para implantação/construção das soluções e manutenção dos serviços. (BRASIL, 2019b, p. 139).

Em uma recente nota técnica do IPEA que analisou o perfil da população rural e a composição de seu orçamento, buscando compreender a evolução da insegurança alimentar, apontou-se que em uma comparação de dados entre os anos de 2008 e 2018 a proporção de famílias rurais situadas na menor faixa de renda (até dois salários mínimos) aumentou de 41% para 43%, o mesmo foi observado para a população com rendimento de até três salários mínimos (de 22 para 24%), além disso houve uma redução do trabalho como elemento de composição de renda. Tendo em vista tais indicadores, a questão relacionada a acessibilidade financeira dessa população e a busca por soluções que utilizem matéria-prima local e exijam uma manutenção simplificada, apontada pela Diretriz 3, se torna ainda mais válida, ainda mais se esses dispositivos utilizem uma tecnologia social e sustentável. Com isso, a Diretriz 8 complementa todo esse pensamento: (VALADARES, 2022).

DIRETRIZ 8

FOMENTAR E APOIAR A UTILIZAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E ENERGIA EÓLICA, PARA REDUÇÃO DOS CUSTOS COM ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.

ESTRATÉGIAS:

8.1 - Realizar estudo de viabilidade do uso da energia solar fotovoltaica e energia eólica com o objetivo de redução dos custos com energia elétrica e promoção de autonomia (locais sem abastecimento de energia elétrica) em sistemas de abastecimento de água. (BRASIL, 2019b, p. 139).

A adoção de sistemas de energia renováveis como a energia solar e a eólica indicam a busca por soluções sustentáveis dentro do ambiente rural, onde a obtenção de energia através dos métodos adotados no meio urbano enfrentam uma série de dificuldades, além da questão do custo \times benefício para o poder público, muitas vezes essas comunidades se encontram em áreas de difícil acesso com características ambientais diversas. Embora a Diretriz 8 cite somente esses dois tipos de energia, outras “soluções verdes” existem e podem ser adotadas nesses ambientes, ainda mais se elas atenderem mais de uma diretriz.

Por fim, para garantir o abastecimento dessas comunidades, como constatado anteriormente, é necessário existir um meio que realize a distribuição/transporte da água, o meio mais utilizado é um dispositivo hidráulico conhecido pela sua capacidade de superar tanto distâncias quanto diferenças de cotas, as bombas hidráulicas.

3.2 Bombas hidráulicas

As bombas hidráulicas são dispositivos projetados para converter energia mecânica em energia hidráulica. Em geral elas são classificadas em duas categorias básicas:

- a) Bombas turbo-hidráulicas;
- b) Bombas de deslocamento positivo.

Enquanto as bombas turbo-hidráulicas movem fluidos através do movimento de uma palheta rotativa, as bombas de deslocamento positivo movem os fluidos utilizando somente o deslocamento preciso de máquinas, como um sistema de engrenagens ou um pistão. A maior parte das bombas utilizadas em sistemas de água modernos são do tipo turbo-hidráulicas (HOUGHTALEN, AKAN, HWANG, 2009).

As bombas turbo-hidráulicas também recebem o nome de bombas hidrodinâmicas ou cinéticas e sua operação se dá através da energia fornecida à água por meio de energia de velocidade, essa, quando no interior da bomba, é convertida em energia de pressão, o que permite que a água atinja tanto posições mais elevadas como percorra distâncias até então impossíveis no sistema. Esse tipo de dispositivos também é classificado em três tipos (Quadro 1). (BRASIL, 2019a).

Quadro 1 – Classificação das bombas hidrodinâmicas ou cinéticas.

Bombas hidrodinâmicas ou cinéticas.	
Centrífugas	Fluxo radial
	Fluxo misto
	Fluxo axial
Periféricas	Estágio único
	Estágios múltiplos
Especiais	Ejetor
	Ar comprimido
	Carneiro hidráulico

Fonte: (BRASIL, 2019a).

Outra característica que deve ser levada em conta durante a adoção de um sistema de bombeamento é em relação a forma como o motor é acionado, a maior parte das bombas apresentam o acionamento por meio de motores elétricos, mas ainda existem bombas acionadas manualmente. Com isso, a questão da eficiência, não só da bomba, mas da energia elétrica é

um ponto crucial ao implantar esses equipamentos, de acordo com Coelho e Andrade-Campos (2014) 7% da energia elétrica global é consumida para a distribuição de água, ademais existe uma estimativa de que 30% da água a ser distribuída é perdida, ou seja, uma porção similar da energia também é perdida. Em vista de tal cenário, Coelho e Andrade-Campos (2014) apontam como soluções para melhoria de eficiência a seleção de sistemas de energia com tarifas adequadas e a incorporação de energia renováveis, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis (BRASIL, 2019a).

Segundo Fink (2020), de acordo com os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) de 2018, no Brasil os custos da energia elétrica utilizada na captação e no bombeamento de água usualmente atingem metade dos custos totais demandados pelos serviços de abastecimento, em sistemas menos aprimorados podem atingir proporções equivalentes a 75% dos custos totais.

Com base no cenário da população rural, descrito no capítulo anterior, em conjunto com as características das bombas, que em sua maior parte operam utilizando uma quantidade considerável de energia elétrica, um tipo especial de bomba hidrodinâmica pode ser apontado como uma solução interessante nesse meio, o carneiro hidráulico.

3.2.1 Bomba carneiro

O carneiro hidráulico é um tipo de bomba utilizado desde 1797, este dispositivo tem a vantagem de funcionar segundo os princípios de um fenômeno simples observado no século XIX, o “golpe de aríete”. Consiste em parar um fluxo rápido que ocorre em um tubo longo por algum tipo de acessório hidráulico, por exemplo, o fechamento de uma válvula. Além de ser terrivelmente barulhento, o golpe de aríete possibilita a subida da água a uma altura surpreendente (MILLS, 2014).

Em 1816, Pierre Montgolfier, surgiu com um novo projeto de bomba, permitindo o fluxo de água através de grande diferença de cotas, esta bomba foi então chamada de “carneiro hidráulico”, “bomba carneiro” ou “aríete hidráulico” (Figura 1), é um equipamento usado para elevar água, seu funcionamento se dá por meio da própria energia hidráulica, ou seja, utilizando o golpe de aríete. (MILLS, 2014; AZEVEDO NETTO, 1998; BRASIL, 2019a).

Figura 1 – Bomba carneiro.



Fonte: BRASIL (2015).

A utilização do carneiro hidráulico no lugar de conjuntos motobomba se dá, principalmente, em zonas rurais pela razão de que ele trabalha ininterruptamente, não consome energia elétrica ou combustíveis fósseis, é uma tecnologia limpa, apresenta uma grande vida útil, pouco desgaste, tem uma construção e manutenção de baixo custo e sua operação não necessita de mão-de-obra qualificada. Entretanto, ele é pouco eficiente, tem um rendimento variável, produz um ruído alto e tem problemas para transportar água durante o inverno, quando em locais com baixas temperaturas, onde existe risco de congelamento da água (BRASIL, 2019a; COSTA, GALINDO, 2018; MILLS, 2014).

3.2.1.1 Golpe de Aríete

O transiente hidráulico, comumente denominado golpe de aríete, é um fenômeno físico causado pela repentina variação de velocidade de um fluido no interior de um sistema hidráulico. A definição utilizada para a explicação do golpe de aríete dada por Chaudhry (1979) foi desenvolvida por meio do enunciado: assumindo que no sistema mostrado na Figura 2 a válvula de saída da tubulação está totalmente aberta, a água está escoando com uma velocidade V_0 e o tempo $t = t_0$, a válvula então é repentinamente fechada. Como resultado desse fechamento da válvula, o escoamento pela válvula é instantaneamente reduzido a zero, e devido a conversão de energia cinética em energia elástica, a pressão aumenta nesse acessório e uma onda de pressão propaga em direção à montante. Essa onda é refletida no reservatório e propagada do reservatório em direção a válvula e vice-versa. Devido a perdas ocorridas pela fricção, essa onda é dissipada enquanto propaga pela tubulação e finalmente em um tempo t_1 , a pressão em todo o sistema se torna igual ao do reservatório e o escoamento é completamente parado.

Figura 2 – Sistema no instante t_0 .



Fonte: Adaptado de CHAUDHRY (1979).

Como pode ser observado pela explicação, os transientes hidráulicos são causados quando existe a mudança de um estado de escoamento constante para outro, o termo usado para isso é fluxo de estado transitório. Essas “perturbações” podem ser originadas de alterações planejadas ou acidentais, nas configurações do equipamento de controle de um sistema projetado pelo homem e pela mudança de vazão da entrada ou saída de um sistema natural. Tem-se, portanto, que a bomba carneiro é um dispositivo projetado pelo homem para replicar esse fenômeno e possibilitar o transporte de fluidos. (CHAUDHRY, 1979)

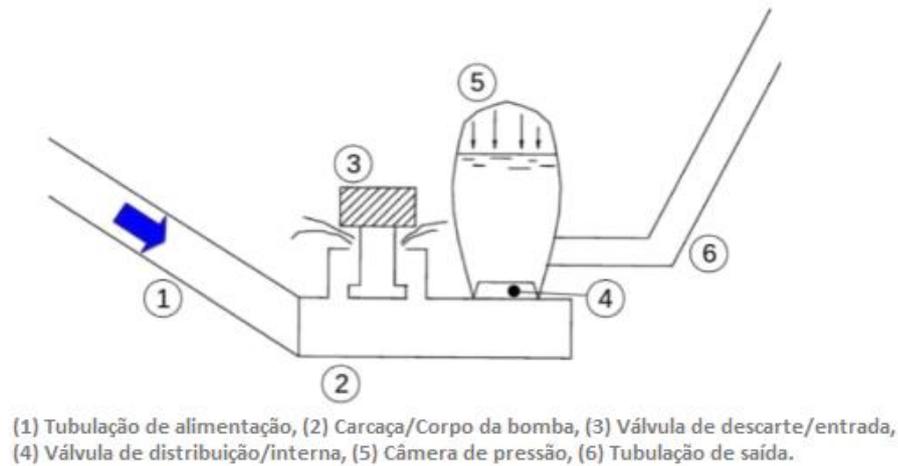
3.2.1.2 Elementos Constituintes do Carneiro Hidráulico

Conforme Hatiplogu *et al* (2018), a bomba carneiro, em geral, é constituída por seis principais elementos (Figura 3):

- 1) Tubulação de alimentação;
- 2) Carcaça/Corpo da bomba;
- 3) Válvula de descarte/entrada;
- 4) Válvula de distribuição/interna;
- 5) Câmara de pressão;
- 6) Tubulação de saída.

É importante destacar que a pressão do processo é mediada pela quantidade de ar dentro da câmara (5), que é transferida para o tubo de saída (6) (HATIPOGLU *et al*, 2018).

Figura 3 – Elementos da bomba carneiro.



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

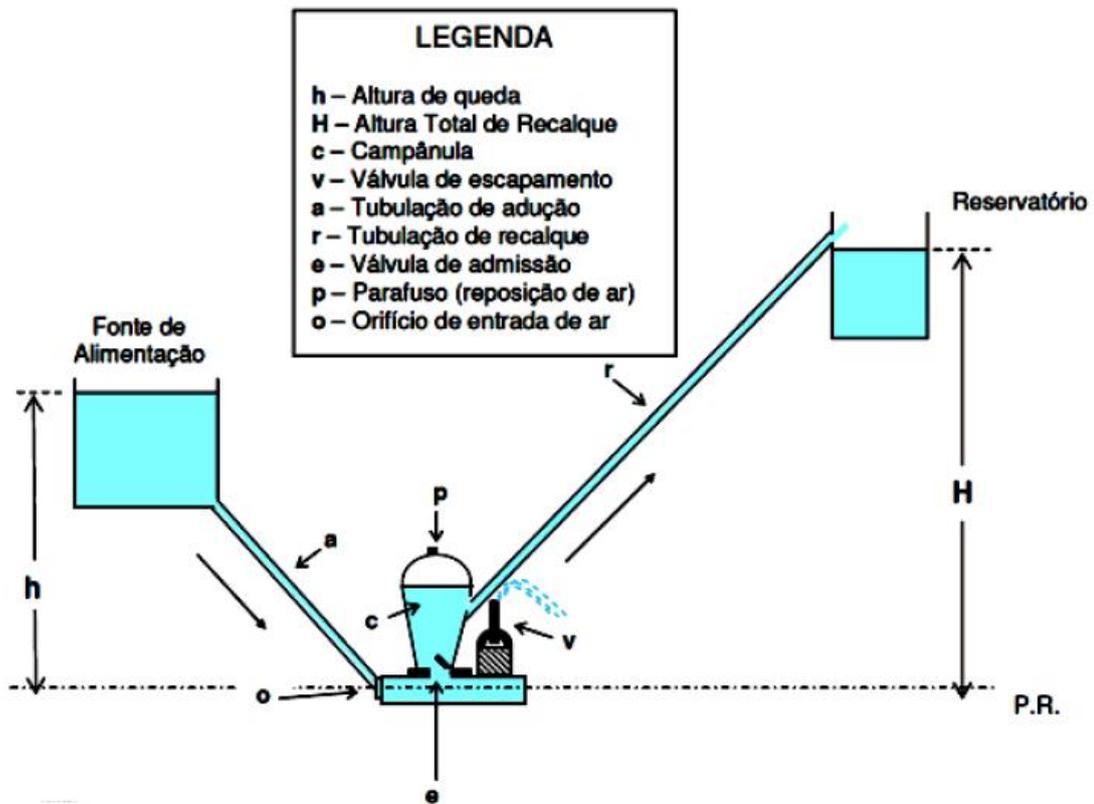
3.2.1.3 Operação

O aparelho deve ser instalado em um nível inferior ao do manancial, na menor cota possível. Ele funciona da seguinte forma: primeiramente a água que chega ao aríete sai por uma válvula externa até que ela alcance uma velocidade elevada. Nesse momento, a válvula fecha, repentinamente, causando uma sobre pressão que possibilita a elevação da água (AZEVEDO NETTO, 1998).

Recomenda-se que a diferença de nível ou queda aproveitável para o funcionamento do aparelho seja superior a 1 metro e que possuam uma vazão de alimentação superior à vazão de recalque. (AZEVEDO NETTO, 1998; BRASIL, 2019a).

O esquema da Figura 4 apresenta como é a instalação de um carneiro hidráulico, no qual se tem a água proveniente de uma altura “ h ” percorrendo uma tubulação de adução “ a ”. Quando alcançada a velocidade desejada a válvula de entrada “ v ” é fechada, causando um golpe de aríete que abre a válvula interna “ e ”. Possibilitando a entrada da água na campânula “ c ”, comprimindo o ar, esse reage fechando a válvula interna “ e ” e impulsionando a água, que percorre a tubulação de recalque “ r ” vencendo a altura “ H ” (OLIVEIRA, SOUZA, 2015; BRASIL, 2019a).

Figura 4 – Esquema de instalação uma bomba carneiro.



Fonte: OLIVEIRA, SOUZA (2015).

3.2.1.4 Dimensionamento das Bombas Carneiro

De acordo com Azevedo Netto (1998), quando da adoção de uma bomba carneiro é necessário atentar-se a alguns critérios. O primeiro ponto é verificar se a diferença de nível ou queda aproveitável apresenta ao menos 1 metro.

Tem-se que os aparelhos fabricados no Brasil operam com vazões compreendidas entre 7.200 e 216.000 l/dia, podendo elevar de 240 a 19.200 l/dia. O segundo ponto é certificar-se que a altura de elevação se encontra entre 6 e 12 vezes a altura da queda, mais do que isso torna o recalque difícil e recomenda-se a adoção de bombas convencionais (AZEVEDO NETTO, 1998).

O terceiro ponto de importância diz respeito a canalização de alimentação, essa deve ser retilínea e apresentar um diâmetro maior do que a tubulação de elevação, além disso o comprimento L deve seguir as recomendações apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Relações do comprimento da tubulação de elevação.

Relação comprimento (L) x Altura de queda disponível (h) x Altura de elevação (H)
$L \geq 1 H$ a $1,2 H$
$L > 5 h$
$L < 10 h$
$L > 8 m$
$L < 75 m$

Fonte: AZEVEDO NETTO (1998).

Sugere-se a instalação de um crivo na extremidade inicial da bomba carneiro, este deve ficar no mínimo 30 cm abaixo do nível d'água e 10 cm acima do fundo. O quarto ponto é a equação existente para cálculo de quantidade de água elevada (Equação (1)):

$$q = \frac{Q * h}{H} * \eta \quad (1)$$

Sendo:

q = vazão a elevar (l/min)

Q = vazão mínima para operar o aparelho (l/min)

h = altura de queda disponível (m)

H = altura de elevação (m)

η = rendimento aparelho

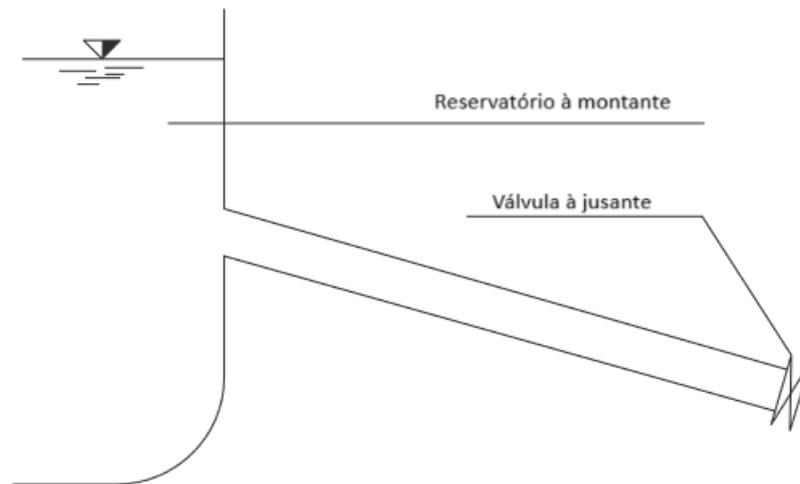
O rendimento é variável entre 20 e 70%, de acordo com a relação H/h decrescendo com o aumento de H/h.

Celeridade

Durante o fenômeno do golpe de aríete ocorrido nos carneiros hidráulicos ocorre um fluxo transitório na tubulação que está sob pressão, a esse fluxo é dado o nome de onda. A celeridade é definida como a velocidade com que essa onda se desloca ao longo da tubulação (COSTA, 2013; KODURA *et al*, 2018).

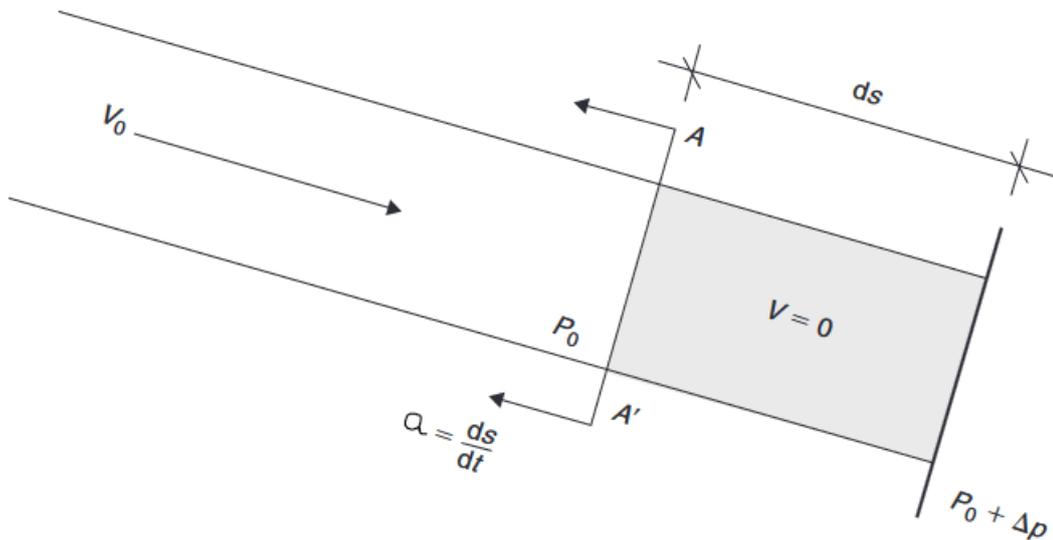
Para explicar melhor esse evento utiliza-se a Figura 5 e a Figura 6. Elas reproduzem as condições num tempo genérico t numa tubulação após o fechamento instantâneo da válvula a jusante. No tempo subsequente dt a seção que separa o fluido parado (a jusante) daquele em movimento (a montante) move-se a montante de A–A', juntamente com a onda de pressão; em vez disso, a própria seção A–A' se move a jusante de uma distância $V_0 \cdot dt$ porque o volume W entre essa seção e a válvula a jusante é comprimido; o volume diminui de um valor calculado pela Equação (2) (MAMBRETTI, 2014).

Figura 5 – Esboço de uma planta simples.



Adaptado de: MAMBRETTI (2014).

Figura 6 – Equilíbrio de forças – esboço e símbolos.



Adaptado de: MAMBRETTI (2014).

$$dW = -A \cdot V_0 \cdot dt \quad (2)$$

Ao mesmo tempo, sobre o mesmo volume W atua um aumento de pressão dado pela Equação (3) ao qual, por causa do módulo de elasticidade em massa de um fluido (Equação (4)), corresponde um decréscimo no volume apresentado na Equação (5):

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot V_0 \quad (3)$$

$$\varepsilon = \rho \cdot \frac{dp}{d\rho} \quad (4)$$

$$dW = - \frac{W \cdot \Delta p}{\varepsilon} = - \frac{A \cdot \rho \cdot a \cdot Vo}{\varepsilon} \cdot ds \quad (5)$$

Sendo: Vo : velocidade inicial na tubulação (m/s); A : área da tubulação (m²); ρ : massa específica do fluido (kg/m³); dW : variação do volume (m³); dt : variação do tempo (s); a : celeridade (m/s); dp : variação da pressão (Pa); ε : módulo de elasticidade do fluido (Pa).

Igualando a Equação (2) com a Equação (5) e sabendo-se que $a = ds/dt$, tem-se a Equação (6).

$$a = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}} \quad (6)$$

Este é o valor da celeridade sonora no fluido. Para água com temperatura igual a 8°C, esse valor é igual a $a \approx 1425 \text{ m/s}$, o que representa um aumento de cerca de 3 m/s para cada grau de aumento de temperatura. Se o líquido for mais compressível, como acontece com certos óleos, a celeridade a diminui.

A velocidade de propagação da onda também diminui quando a elasticidade da parede do duto é considerada. Para um tubo com diâmetro D , espessura e e módulo de elasticidade E , a Equação (6) torna-se a Equação (7).

$$a = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}}{\sqrt{1 + \lambda \cdot \frac{\varepsilon \cdot D}{E \cdot e}}} \quad (7)$$

Sendo: a : celeridade (m/s); ε : módulo de elasticidade do fluido (Pa); e : espessura da tubulação (m); ρ : massa específica do fluido (kg/m³); λ : coeficiente que considera os efeitos das junções entre tubos e pode ser assumido igual a 1 para um único tubo; D : diâmetro da tubulação (m); E : módulo de elasticidade (Pa).

Para tubos de aço, uma suposição generalizada é $a = 1000 \text{ m/s}$, enquanto para tubos de plástico este valor é menor porque a sua elasticidade é maior. A presença de ar pode ter um efeito significativo neste parâmetro (MAMBRETTI, 2014).

Já Azevedo Netto (1998), destaca a fórmula de Allievi para cálculo da celeridade (Equação (8)).

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + k \cdot \frac{D}{e}}} \quad (8)$$

Sendo: a: celeridade (m/s); D: diâmetro da tubulação (m); e: espessura da tubulação (m).

O valor de k é dado pela Equação (9).

$$k = \frac{10^{10}}{E} \quad (9)$$

Sendo: k: coeficiente que leva em conta os módulos de elasticidade (E); E: módulo de elasticidade.

Para tubos de aço tem-se o $k=0,5$, já para tubos de ferro fundido (fofo) o $k = 1$, enquanto para tubos de plástico $k = 18$.

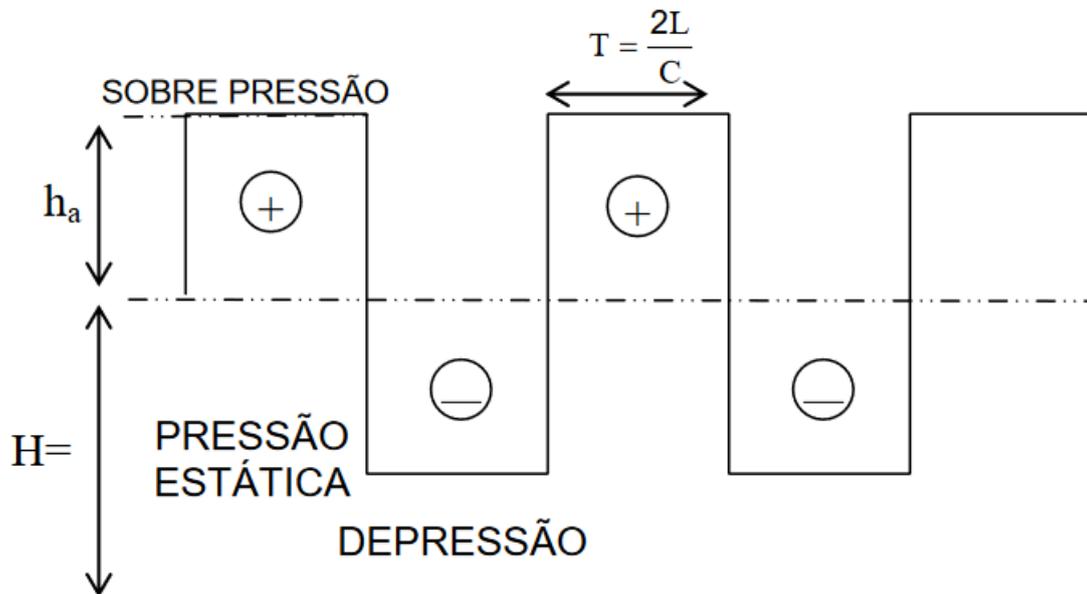
Sobrepessão

O exemplo típico e considerado mais importante de golpe de aríete em instalações com bomba carneiro é o que se verifica logo após a interrupção do fornecimento energia (água) na válvula de retenção (COSTA, 2013).

O que ocorre é a ascensão da coluna líquida pela tubulação de recalque até que a força de inércia seja vencida pela ação da força gravitacional. Na prática, interessa particularmente saber o que ocorre junto à bomba, próximo da válvula de retenção, logo após a parada dela.

A Figura 7 apresenta a oscilação da onda de pressão, junto à válvula de retenção (VR), numa instalação de bomba carneiro, considerando desprezível a perda de carga ao longo do conduto.

Figura 7 – Ilustração da variação da pressão junto à válvula de retenção.



Fonte: COSTA (2013).

O tempo que a onda de sobrepressão leva para ir e voltar de uma extremidade à outra da canalização é denominado fase ou período da canalização, definido pela Equação (10) (AZEVEDO NETTO, 1998).

$$T = \frac{2 \cdot L}{a} \quad (10)$$

Sendo: L : comprimento da canalização (m); a : celeridade (m/s); T : período da canalização (s).

Após a onda chegar, ela retorna mudando o sentido e fazendo no mesmo tempo (T) todo o percurso de ida e volta, porém com sinal contrário, sob forma de onda de depressão.

O tempo de fechamento da válvula de retenção é um importante fator dentro desse fenômeno. Se a válvula fechar rapidamente, ela ficará completamente fechada antes da atuação da onda de depressão. Por outro lado, se o fechamento for lento, haverá tempo para atuar a onda de depressão antes da obturação completa.

Equação de Joukowski e Jouguet/Michaud

Já para a variação de pressão decorrente desse fenômeno, existem duas fórmulas para cálculo. Joukowski é tido como um dos precursores no estudo do golpe de aríete, seu artigo denominado “*Waterhammer*” foi publicado em 1898, assim como foi um dos primeiros a estabelecer o cálculo do incremento da pressão (MAMBRETTI, 2014).

Para chegar na Equação (11), Joukowski utilizou uma tubulação horizontal com diâmetro único, ao longo dessa tubulação havia água com uma velocidade média em movimento permanente. Por fim, com a redução brusca da velocidade no conduto forçado, gera-se uma onda de pressão junto ao registro (SILVESTRE, 1979).

$$\Delta H = a \cdot \frac{\Delta V}{g} \quad (11)$$

Sendo: ΔH : Variação da pressão (mca); a : celeridade (m/s); ΔV : Variação da velocidade de escoamento (m/s); g : aceleração gravitacional (m/s²).

Por outro lado, Jouguet e Michaud, no cálculo da variação de pressão, não consideraram a elasticidade do tubo e nem a compressibilidade do líquido, assumindo a teoria da coluna rígida, com isso chegaram à Equação (12) (CARVALHO, 2011).

$$\Delta H = \frac{L \cdot V}{g \cdot T} \quad (12)$$

Sendo: ΔH : Variação da pressão (mca); V : Velocidade média de escoamento (m/s); g : aceleração gravitacional (m/s²); T o período da tubulação (s); L : o comprimento da tubulação (m).

Lei de Dalton (Gases Ideais)

De acordo com Livi (2004), um gás o qual não existem forças de interação intermolecular de origem eletromagnética, mas somente interações por meio de colisões entre moléculas é aquele considerado um gás ideal ou gás perfeito. Essa relação pode ser expressa pela Equação (13), de estado.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (13)$$

Sendo: P : pressão absoluta (Pa); V : volume ocupado pelo gás (m³); n : número de mols existentes no volume V ; R : constante do gás (J/mol·K); T : temperatura absoluta (Kelvin).

A lei de Dalton é estritamente válida para misturas de gases ideais. Ela estabelece que a pressão total de uma mistura gasosa é igual à soma da pressão parcial de cada um dos gases que compõem a mistura (Equação (14)) (LIMA, 2015).

$$P_t = P_a + P_b + P_c \quad (14)$$

Sendo: P_a , P_b e P_c representam as pressões parciais dos componentes gasosos A, B e C.

Portanto, substituindo os valores da Equação (13) na Equação (14) tem-se a Equação (15).

$$P_t = (n_a + n_b + n_c) \frac{R \cdot T}{V} \quad (15)$$

Entretanto, deve-se lembrar que o ar não é um gás perfeito, sendo que a composição da atmosfera pode variar bastante. De acordo com Dias *et al* (2007) tem-se como principais elementos que compõem o ar terrestre: nitrogênio (N₂ - 78,09%), oxigênio (O₂ - 20,95%), argônio (Ar - 0,93%), dióxido de carbono (CO₂ - 0,035%), hidrogênio (H₂ - 5·10⁻⁵ %), ozônio (O₃ - 1·10⁻⁶ %), e mais elementos em menor proporção.

Na bomba carneiro existe uma câmara de ar cuja porção inferior contém água, enquanto a porção superior contém ar. A movimentação existente entre a “fronteira” do ar com a água na câmara do carneiro hidráulico é denominada de movimento de fronteira e esse processo recebe ou fornece trabalho (BORGNAKKE, 2018).

A parcela do trabalho pode ser examinada medindo-se a pressão e o volume durante o processo e para isso é utilizada uma formulação matemática (Equação (16)) baseada numa curva chamada processo politrópico.

$$P \cdot V^n = cte \quad (16)$$

Sendo: P: pressão absoluta (Pa); V: volume ocupado pelo gás (m³); n: expoente politrópico.

Nota-se que a Equação é baseada na fórmula dos gases ideais (Equação (13)). Mas nesse caso existem novos valores, como o expoente politrópico. Esse expoente é o referencial do tipo de processo existente, e pode variar de menos infinito a mais infinito. Por exemplo, em um processo com pressão constante, n=0, já para em um processo de volume constante, $n \rightarrow \pm\infty$ (BORGNAKKE, 2018).

Conforme Wylie e Streeter (1993) para gases ideais, em processos isotérmicos, ou seja, em sistemas maiores, com um grande volume de água e pequena massa de ar, deve-se considerar n=1. Já em processos adiabáticos, em sistemas hidráulicos pequenos nos quais a resposta é rápida, tem-se n=1,4. Em estudo de Magalhães, Arens e Porto (2003), o valor de n pode ser alterado em aplicações de pequenas dimensões para n=1,34.

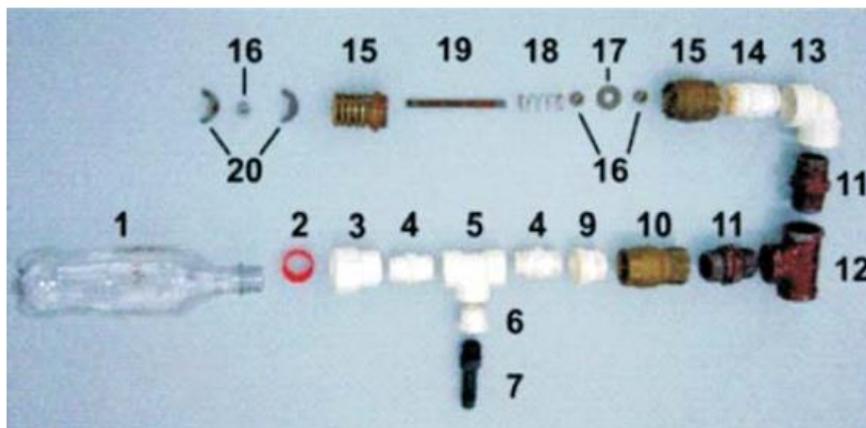
3.2.1.5 Bombas carneiros não industriais

Devido a operação da bomba carneiro se dar de uma forma “simples”, por meio de um fenômeno físico que pode ser facilmente replicado, com o tempo pesquisadores observaram que poderiam construir esses dispositivos utilizando materiais alternativos, principalmente aqueles que apresentam baixo custo, com isso surgiu uma “nova” categoria de bombas carneiro: as bombas carneiro construídas com materiais alternativos.

Essa prática é observada desde o início da década de 90, Silva e Rêda (1991) foram capazes de construir um desses dispositivos utilizando madeira e PVC, já Barreto e Lima (1997) fabricaram a partir somente do PVC, Abate e Botrel (2002) usaram além das tubulações de PVC, as de aço galvanizado. Contudo foi Cararo *et al* (2007) que realizaram um estudo aprofundado sobre essa questão.

Cararo *et al* (2007) executaram uma série de combinações entre diferentes peças e materiais alternativos (Figura 8), dentre eles garrafas PET, tampas de garrafa, acessórios de tubulações – luva, *niple*, tê, reduções, cotovelos - em PVC e galvanizado, válvula de retenção metálica, válvula de poço metálica, parafusos, porcas, arruelas e mola, para validação de qual modelo construído apresentava o melhor rendimento, maior vazão recalçada, menor vazão de alimentação e menor desperdício.

Figura 8 – Tipos de materiais alternativos utilizados no carneiro.

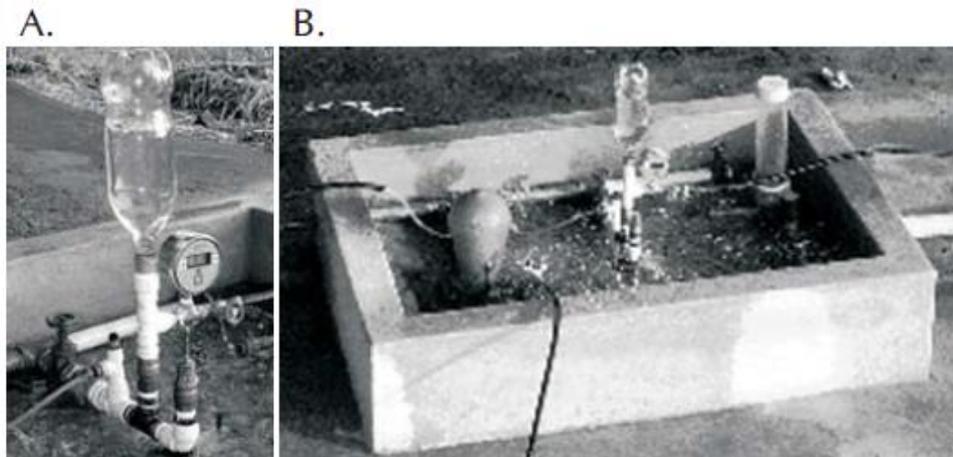


Fonte: CARARO *et al* (2007).

Além da variação do tamanho e materiais das peças, durante a experiência (Figura 9) também houve a alternância de altura de recalque e do posicionamento válvula (horizontal e vertical), como conclusão obteve-se como carneiro “ótimo” aquele construído com garrafa PET com capacidade de 600 ml, válvula de escape na horizontal e tamanho de furo da tampa da

garrafa de 25 mm. Além disso, o equipamento era capaz de recalcar 1000 L de água por dia para carga manométrica de até 50 m. Entretanto o rendimento foi inferior a 40% e o desperdício de água superior a 90%, na maior parte dos modelos testados. (CARARO *et al*, 2007)

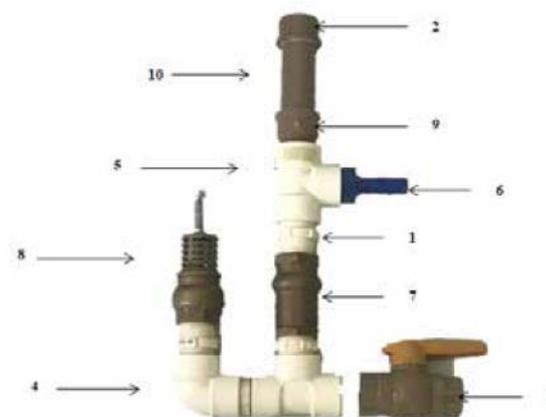
Figura 9 – Carneiro hidráulico em operação (A) e local de instalação (B).



Fonte: CARARO *et al* (2007).

Dentre estudos recentes utilizando essa categoria de bomba, evidencia-se o de Oliveira Junior *et al* (2021), que utilizando como base os trabalhos de Abate e Botrel (2002), Cararo *et al*. (2007) e Filho (2002 *apud* Oliveira Junior *et al*, 2021) construíram um carneiro hidráulico em sua maior parte de tubulações e acessórios de PVC (Figura 10), o objetivo do estudo era o de avaliar e comparar características hidráulicas de uma bomba carneiro construída com diferentes tamanhos de câmaras de PVC.

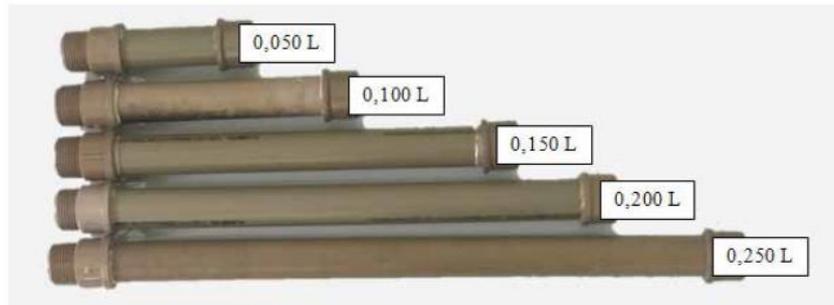
Figura 10 – Carneiro hidráulico construído.



Fonte: OLIVEIRA JUNIOR *et al* (2021).

Para isso foram utilizados cinco tamanhos de câmaras diferentes (Figura 11), além da variação das câmaras também foi variada a altura da lâmina d'água (h) no reservatório que alimentava a bomba, com isso chegou-se nas conclusões de que quanto maior o valor de h maior a pressão de saída da bomba, porém a constatação mais importante é que o desempenho da bomba carneiro melhora quanto maior o volume da campânula.

Figura 11 – Diferentes tamanhos das câmaras de ar/campânulas.



Fonte: OLIVEIRA JUNIOR *et al* (2021).

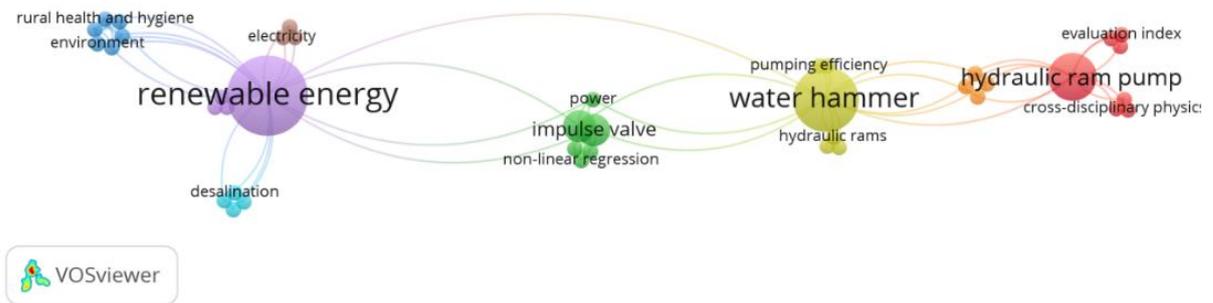
3.2.2 Cenário atual das pesquisas sobre Carneiros Hidráulicos

Logatti e Kellner (2021) apresentaram uma análise sistêmica sobre a produção de pesquisas a respeito do carneiro hidráulico. Para essa análise foram utilizados dois termos para busca: (1) “*hydraulic ram*” OR “*hydram*” OR “*gravity pump*” - tradução: “carneiro hidráulico” OU “bomba carneiro” OU “bomba por gravidade” - e (2) (“*hydraulic ram*” OR “*hydram*” OR “*gravity pump*”) AND (“*water lifting*” OR “*water-hammer*”) - tradução: (“carneiro hidráulico” OU “bomba carneiro” OU “bomba por gravidade”) E (“bombeamento de água” OU “golpe de aríete”).

Como pode ser observado pelos termos pesquisados, a primeira busca é mais abrangente que a segunda, que é mais específica. Isso pode ser constatado também pelo número de resultados, enquanto a primeira retornou 75 artigos publicados em periódicos a segunda retornou apenas oito (8) publicações (LOGATTI, KELLNER, 2021).

No VOSViewer o foco principal para gerar os gráficos foram as palavras-chaves indicadas pelos autores dos trabalhos, tendo tal fato em perspectiva geraram-se três diferentes gráficos para cada combinação de termos, totalizando seis gráficos. Cada gráfico possuía um dos seguintes objetivos: apresentar as conexões existentes entre as expressões, a densidade de distribuição das palavras e o número médio de citações para cada palavra. A Figura 12 expõe a rede de palavras para a primeiro termo da busca: (LOGATTI, KELLNER, 2021).

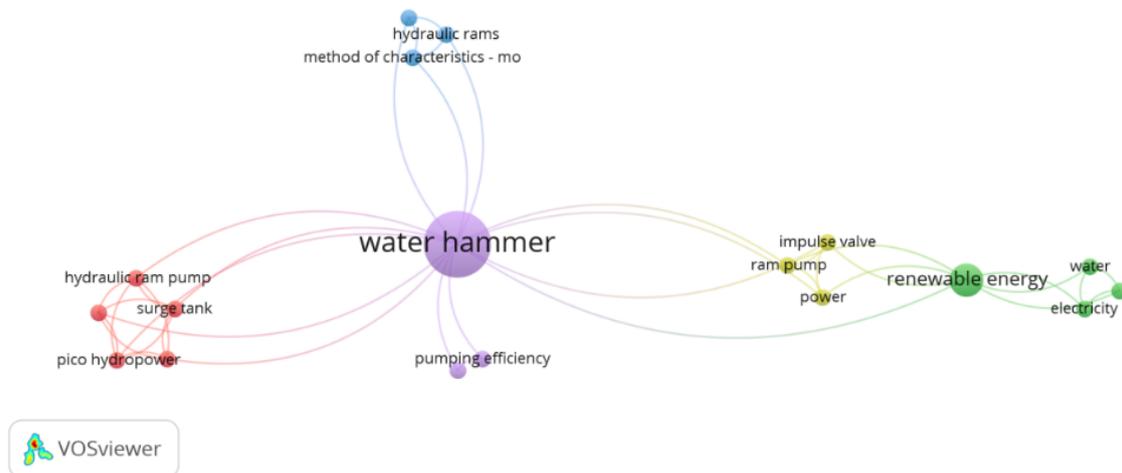
Figura 12 – Visualização da rede de palavras – primeira busca.



Fonte: LOGATTI, KELLNER (2021).

Como pode ser observado, as principais palavras relacionadas com o tema estudado são: energia renovável (*renewable energy*), golpe de aríete (*water hammer*), bomba carneiro (*hydraulic ram pump*) e válvula de impulso (*impulsive valve*). O maior número de ligações é entre bomba carneiro e golpe de aríete, isso pode ser causado pelo fato do primeiro operar utilizando o segundo. Destaca-se também o fato de energia renovável possuir conexão com golpe de aríete, indicando que o fenômeno pode ser considerado uma solução sustentável. A Figura 13 indica a rede de palavras para a segunda pesquisa: (LOGATTI, KELLNER, 2021).

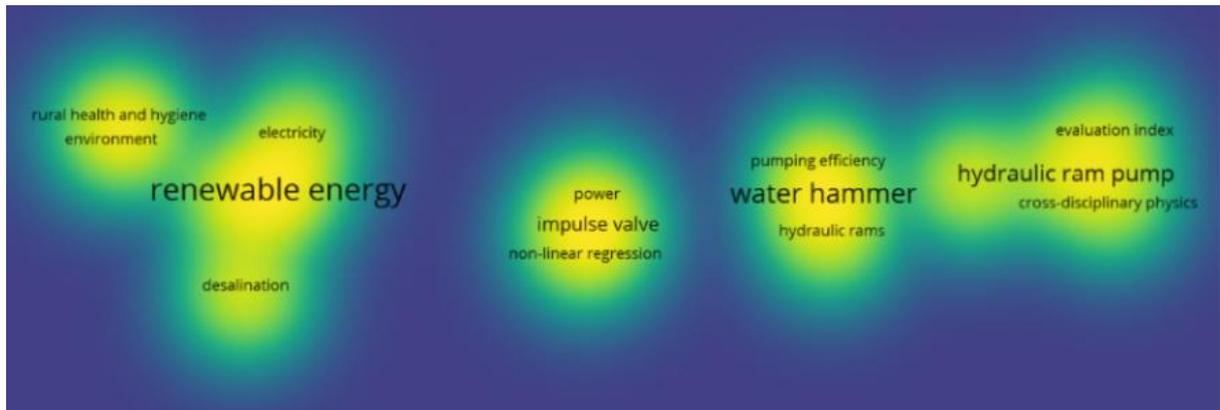
Figura 13 – Visualização da rede de palavras – segunda busca.



Fonte: LOGATTI, KELLNER (2021).

Para a Figura 13, três dos quatro termos anteriores apareceram: golpe de aríete, energia renovável e bomba carneiro. A primeira palavra foi a mais utilizada entre eles, seguida por energia renovável. Neste caso, pode ser pontuado que as palavras-chave: carneiro hidráulico, bomba carneiro hidráulico e bomba carneiro, indicam o mesmo dispositivo, que possui diferentes nomenclaturas. A Figura 14 mostra a densidade das palavras para a primeira pesquisa: (LOGATTI, KELLNER, 2021).

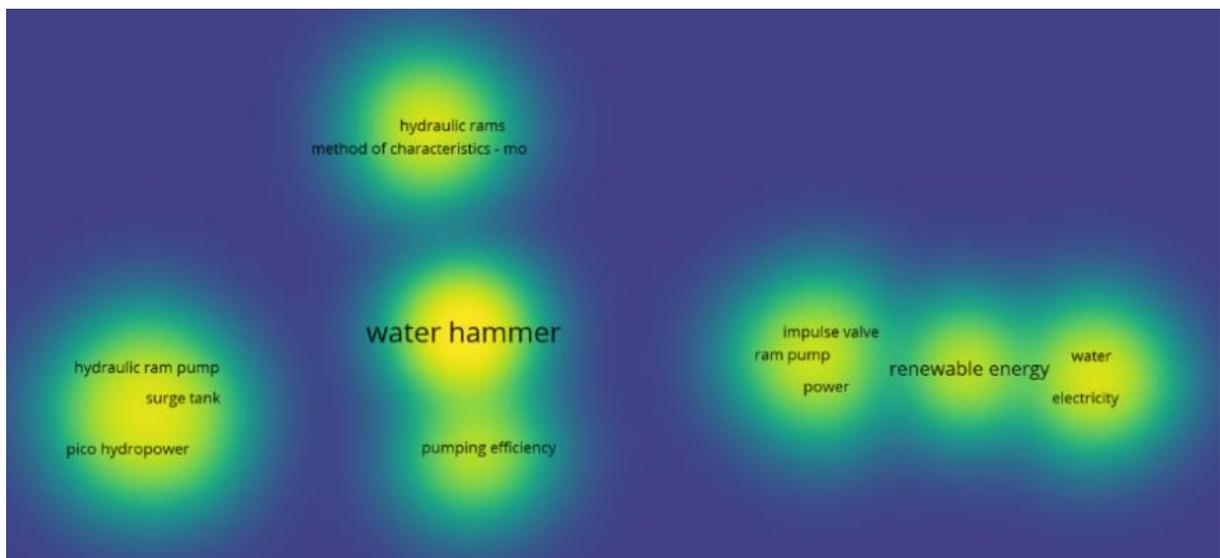
Figura 14 – Visualização densidade palavras – primeira busca.



Fonte: LOGATTI, KELLNER (2021).

A densidade da distribuição das palavras-chave possui uma disposição homogênea. No VOSViewer, nesse tipo de gráfico, a escala considera o número de itens na vizinhança e vai da cor azul (baixa) até vermelha (alta), com isso pode-se dizer que nenhum termo está destacado dos outros, ou seja, nenhuma palavra tem um número substancial de outras palavras conectadas a ela. O mesmo cenário foi verificado para a segunda busca (Figura 15). (LOGATTI, KELLNER, 2021).

Figura 15 – Visualização densidade palavras – segunda busca.

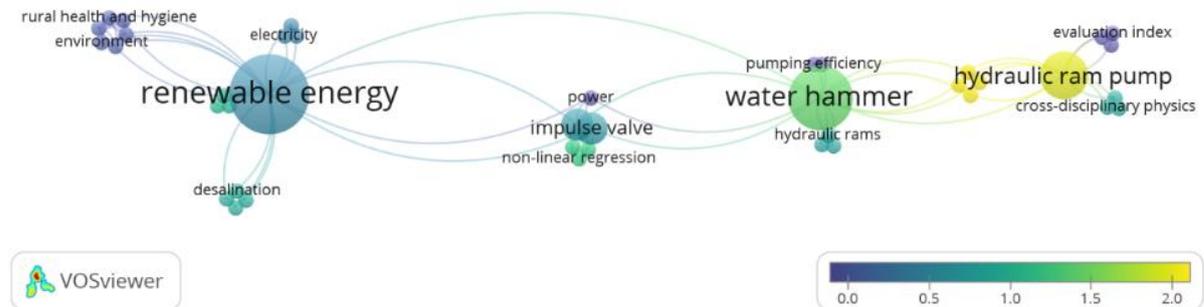


Fonte: LOGATTI, KELLNER (2021).

De acordo com o Manual do Usuário do VOSViewer a média normalizada de citações é um indicador que apresenta a mediana de documentos em que uma palavra-chave ou termo

ocorre. Esse indicador varia de azul (baixo) até amarelo (alto), a Figura 16 mostra os resultados para a primeira busca: (LOGATTI, KELLNER, 2021).

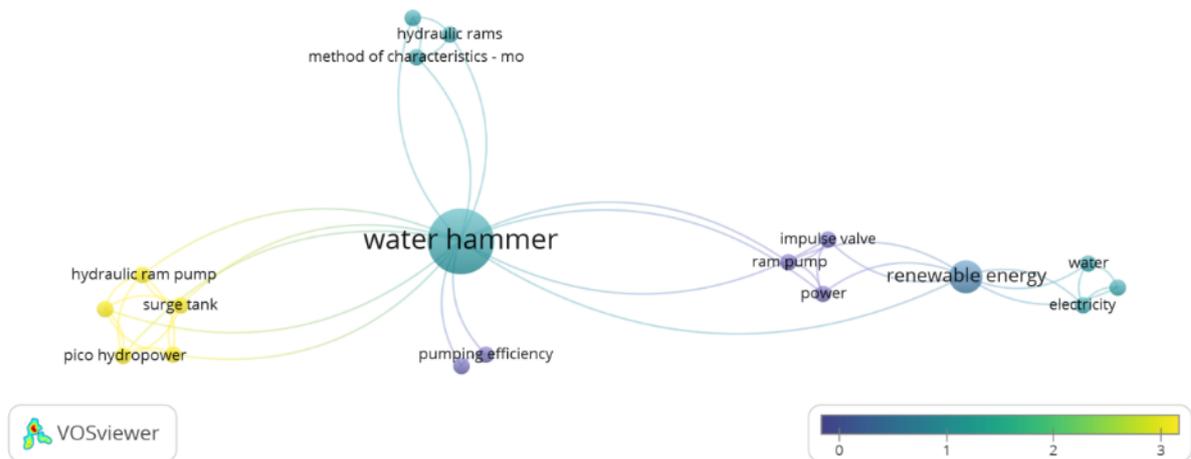
Figura 16 – Visualização de sobreposição – primeira busca.



Fonte: LOGATTI, KELLNER (2021).

A visualização de sobreposições para a primeira pesquisa indica que a palavra mais citada é bomba carneiro, seguida de golpe de aríete. As palavras-chave energia renovável e válvula de impulso não são tão relevantes quanto o que foi apresentado na visualização de rede e densidade de palavras, já que nesse gráfico o valor delas varia na escala de 0,5 até 1,0. A Figura 17 expõe os resultados para a segunda busca: (LOGATTI, KELLNER, 2021).

Figura 17 – Visualização de sobreposição – segunda busca.

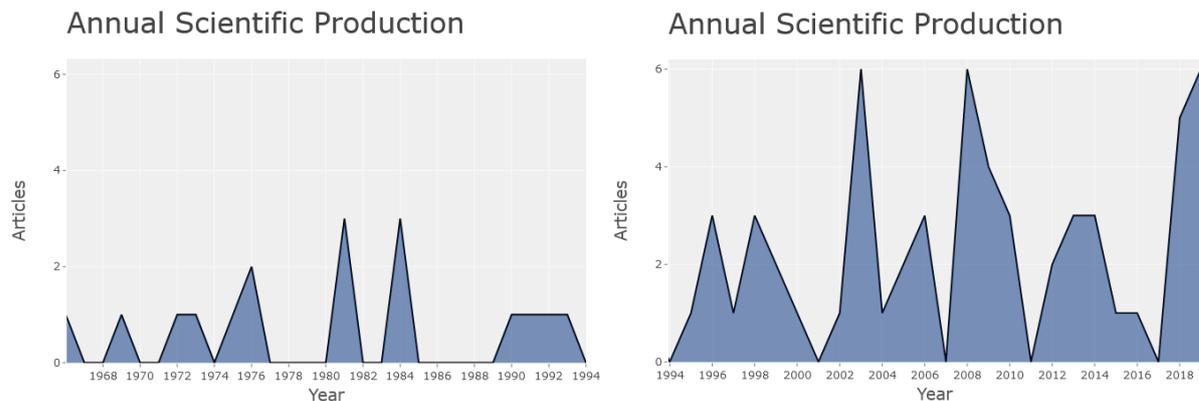


Fonte: LOGATTI, KELLNER (2021).

A Figura 17 demonstra que as principais palavras-chave são aquelas associadas com a bomba carneiro, possuindo o valor de três (3) na escala. O termo golpe de aríete e energia renovável possuem valores baixos na escala, entre zero e dois. É interessante notar que os termos mais citados ficaram ao lado esquerdo da figura, enquanto o restante teve pouca variação na escala de cor. (LOGATTI, KELLNER, 2021).

Segundo Logatti e Kellner (2021) o Software R foi aplicado na pesquisa com os objetivos de informar o número de publicações ao longo dos anos, os principais autores e gerar uma nuvem de palavras, indicando os principais termos relacionados e subtópicos. A Figura 18 apresenta o número de publicações desde 1966 para a primeira busca.

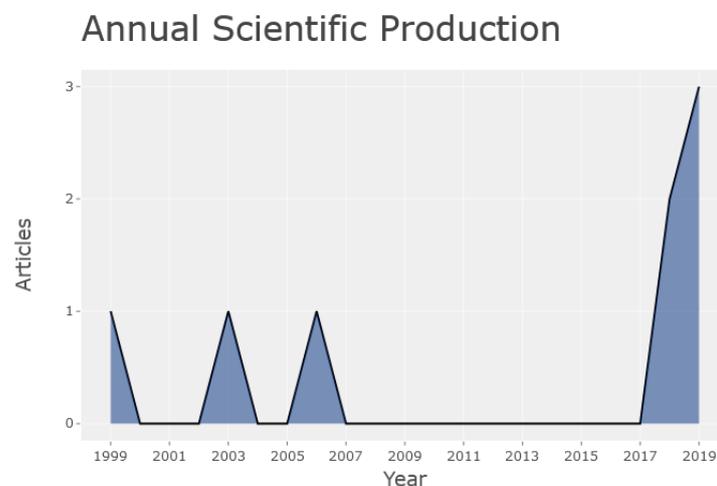
Figura 18 – Produção científica anual – primeira busca.



Fonte: LOGATTI, KELLNER (2021).

Os dados mostram que a produção de artigos sobre o tema iniciou em 1966, mas, até 1994, houve vários intervalos de produção (1967-1968, 1970-1971, 1977-1980, 1985-1989). Posteriormente, houve alguns anos sem produção, entretanto nunca superando um ano (1994, 2001, 2007, 2011 e 2017). Os anos com o maior número de artigos publicados, seis no total, são 2003, 2008 e 2019. Por fim, o gráfico apresentou resultados aleatórios para cada ano, o que impossibilitou a transformação em algum tipo de curva para estudos aprofundados dos dados. A Figura 19 mostra a produção anual para a segunda busca (LOGATTI, KELLNER, 2021).

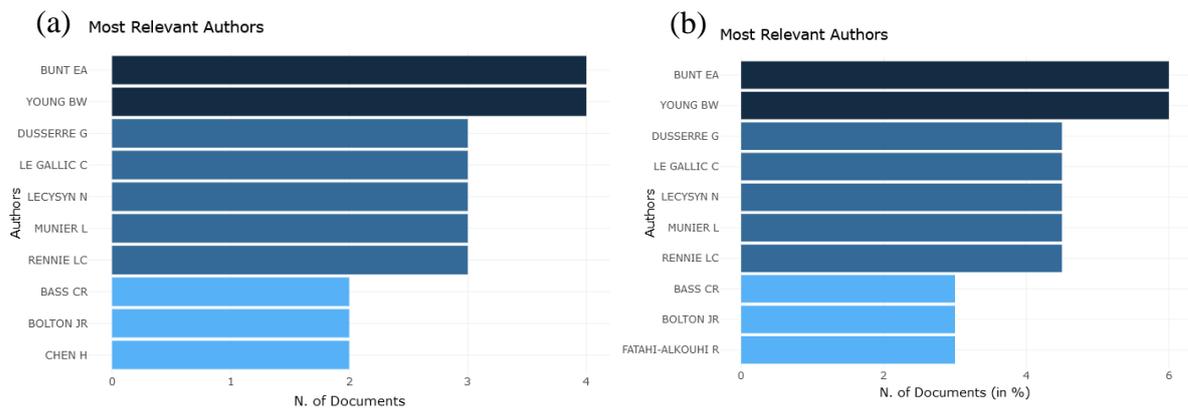
Figura 19 – Produção científica anual – segunda busca.



Fonte: LOGATTI, KELLNER (2021).

Como poder ser observado da Figura 19, a produção começou somente em 1999, apresentando somente um período recente de produção, de 2018 até 2019. O gráfico possui três intervalos de tempo, o maior sendo de 2007 até 2017, totalizando 10 anos. O maior número de artigos publicados foram três (3) em 2019. Novamente o gráfico não pode ser transformado em uma curva para análise aprofundada dos dados. A Figura 20 indica os dez autores mais relevantes para ambas as buscas (LOGATTI, KELLNER, 2021).

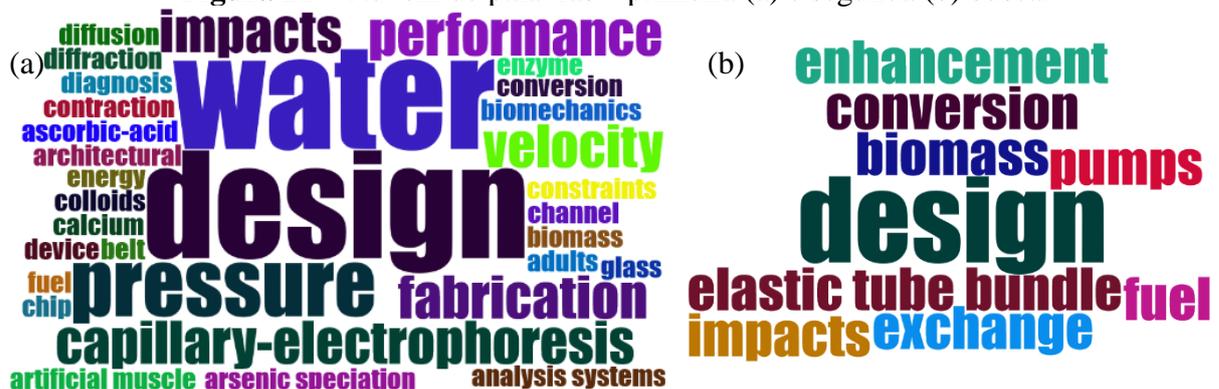
Figura 20 – Autores mais relevantes – primeira(a) e segunda(b) busca.



Fonte: LOGATTI, KELLNER (2021).

De uma forma geral, pode ser observado que os autores mais relevantes eram comuns entre ambas as buscas, a única diferença sendo do último lugar, enquanto na primeira busca quem ocupava essa posição era Chen, H.; na segunda era Fatahi-Alkouhi, R. O número de documentos indicados na escala do segundo gráfico (b) é maior, pois no cálculo da razão: artigos escritos pelo ator *versus* total de artigos, o total de artigos é menor, o segundo teve oito, enquanto o primeiro teve 75, aumentando os valores indicados na Figura 20. Por fim, a última análise bibliométrica realizada foi a nuvem de palavras, exposta na Figura 21 (LOGATTI, KELLNER, 2021).

Figura 21 – Nuvem de palavras – primeira (a) e segunda (b) busca.



Fonte: LOGATTI, KELLNER (2021).

Como pode ser notado nas imagens, a nuvem de palavras introduziu alguns termos novos na pesquisa. A primeira busca apresentou, como principais palavras, água (*water*) e design, enquanto a segunda apresenta design. Entre ambas as nuvens, a Figura 21(b) demonstra palavras-chave interessantes para o assunto, em conjunto com design, os termos: aprimoramento (*enhancement*), conversão (*conversion*) e troca (*exchange*) não foram utilizadas durante a busca no *Web of Science*, mas podem ser aplicadas em novas buscas, já que frequentemente aparecem e são relevantes ao assunto. (LOGATTI, KELLNER, 2021).

3.3 O campo de pesquisa do carneiro hidráulico: perspectiva atual

Em uma análise qualitativa da perspectiva atual de pesquisa, alguns tópicos podem ser destacados como dominantes do que foi produzido, dessa forma pode ser estabelecido que entre os artigos obtidos durante a pesquisa, prevalecem aqueles que dispõem de uma abordagem técnica, que buscam aprimorar a configuração de bombas carneiro ou validam novos modelos. Isso pode ser verificado filtrando os artigos dentro da base de dados *Web Of Science*, enquanto Verspuy e Tijsseling (1993) apresentaram um modelo matemático que trabalhava em conjunto com um software de simulação e compararam os dados gerados em uma série de experimentos representativos, obtendo uma boa concordância entre ambos, Basfeld e Muller (1984) desenvolveram uma teoria, baseada na equação de movimento de Newton, comparando os resultados com experimentos desenvolvidos em laboratório e conseguindo uma boa concordância entre eles, estabelecendo uma nova forma de modelar carneiros hidráulicos. Rennie e Bunt (1990) investigaram experimentalmente uma nova análise teórica sobre o ciclo do carneiro hidráulico, Young (1995) demonstrou que a bomba carneiro pode ser desenhada utilizando duas novas equações obtidas através de métodos empíricos. Por outro lado, o que também pode ser notado analisando esses resultados relevantes é que a maior parte da produção ocorreu durante os anos 90, e que desse período até os dias atuais a engenharia hidráulica teve uma grande evolução, assim como foram desenvolvidas novas ferramentas para facilitar o processo de coleta, armazenamento e processamento de dados. (LOGATTI, KELLNER, 2021).

Outro ramo relevante de pesquisa dos carneiros hidráulicos é seu aspecto sustentável, esses dispositivos podem ser vistos como uma alternativa aos conjuntos motobomba, sendo suas principais vantagens a prescindibilidade de energia elétrica, e com isso surge sua característica de operar utilizando energia renovável. Alguns artigos destacam e investigam a fundo essa consideração, Fatahi-Alkouhi *et al* (2019) experimentaram e trocaram a energia do golpe de aríete para uma coluna de pressão d'água, os autores obtiveram um resultado positivo

para áreas montanhosas, apresentando potencial de geração de energia a partir do golpe de aríete. Algo similar foi desenvolvido por Roberts *et al* (2019), em um modelo de pequena escala, foi obtido experimentalmente que, ao substituir o sistema de fornecimento de água pressurizada por um mecanismo de conversão de energia, o golpe de aríete pode prover energia renovável. Diferentemente do que pode ser observado com o tópico anterior, quando abordado o aspecto sustentável e renovável do carneiro hidráulico, a produção começa a apresentar uma idade menor, com o artigo mais antigo sendo publicado em 1995 e o mais novo em 2019 (ano limite para a análise bibliométrica), tal fato pode corroborar com o que se vê atualmente no mundo científico, uma crescente produção de artigos associados a “soluções verdes” para problemas ambientais. Entretanto, em alguns casos essas soluções podem já existir, são dispositivos operáveis e relativamente simples, mas a necessidade humana de criar algo novo, ao invés de melhorar/otimizar e estudar o que está disponível, faz com que esses mecanismos sejam esquecidos. Mesmo que possam ser, em alguns casos, melhor aplicados como solução do que o que foi criado. (LOGATTI, KELLNER, 2021).

3.4 Desafios, lacunas e oportunidades de pesquisa

À medida que a discussão da perspectiva real foi desenvolvida, alguns desafios, lacunas e oportunidades de estudo puderam ser observados, este aspecto da pesquisa será refinado e dividido em diferentes tópicos para melhor compreensão. (LOGATTI, KELLNER, 2021).

3.4.1 Ausência de trabalhos relacionados com agronomia, agricultura

Agronomia e agricultura são setores importantes em qualquer país, enquanto em países desenvolvidos os valores gerados nessa área influenciam grandemente o Produto Interno Bruto (PIB), em alguns casos até mais que o setor industrial (DOKIC, JOVIC, 2017). Em nações em desenvolvimento, o setor industrial é a chave por trás do desenvolvimento econômico mais amplo (KEMP-BENEDICT *et al*, 2011). Como descrito ao longo desse estudo, as bombas carneiros são dispositivos interessantes que podem distribuir e fornecer água em ambientes que respeitem o fenômeno do golpe de aríete. Durante a discussão da perspectiva atual, um aspecto interessante, e até preocupante, foi notado, quando aplicado o filtro de pesquisa para engenharia agrônoma, agronomia e agricultura, somente dois artigos estavam disponíveis. Esse resultado pode ser visto como um aviso para estudos futuros, a bomba carneiro é totalmente capaz de melhorar a irrigação, com a possibilidade de se tornar um dispositivo indispensável em áreas pobres ou em desenvolvimento. Em um estudo, Kemp- Benedict *et al* (2011) enfatizaram que em comunidades agrícolas perto de bacias hidrográficas foi observado um pequeno

desenvolvimento de métodos para irrigação. Levar, aplicar, operar e estudar a bomba carneiro nessas comunidades certamente traria um desenvolvimento interessante da área em estudo. (LOGATTI, KELLNER, 2021).

3.4.2 Ausência de trabalhos relacionados com desenvolvimento de modelos de carneiros hidráulicas com baixo custo

Semelhante ao discutido no tópico anterior, as bombas carneiro disponíveis no mercado podem custar até milhares de reais¹, sendo menos eficiente do que um conjunto motobomba e possuindo praticamente o mesmo preço², esse equipamento se torna uma solução não tão atraente quando da disponibilidade de energia elétrica. Contudo, levando em consideração que comunidades pobres seriam aquelas que tirariam maior proveito desse dispositivo, já que possuem acesso limitado a energia elétrica, desenvolver um modelo de carneiro hidráulico com baixo custo pode ser uma solução inovadora. Durante a pesquisa, somente um artigo abordava esse assunto, Ykeda *et al* (2019) avaliaram o ganho de eficiência de um carneiro hidráulico construído com canos de PVC onde foi adicionada uma válvula redutora de pressão na sua entrada e compararam os resultados com a bomba convencional, como resultado concluíram que o aumento da eficiência não foi suficiente para compensar o custo da válvula, piorando a relação custo/benefício. (LOGATTI, KELLNER, 2021).

3.4.3 Ausência de trabalhos que utilizam novas tecnologias

Como discutido por cientistas sociais, é conhecido que o mundo está em meio a uma nova revolução, comumente chamada de revolução digital. Uma de suas principais características é a necessidade constante de conexões, sendo que essas conexões podem ser entre homem e máquina, máquina e máquina ou homem e homem. O desenvolvimento dessas conexões criou uma ampla gama de novas ferramentas, e essas ferramentas podem ser usadas para mudar a relação humana com o meio ambiente (positiva ou negativamente). Uma dessas ferramentas, largamente utilizada na área da mecânica dos fluidos são os modelos da mecânica dos fluidos computacional (*computational fluids dynamics* – CFD), esses softwares são capazes de simular o comportamento dos fluidos durante seu escoamento nos mais diferentes locais, desde pequenas tubulações até grandes barragens. Durante a pesquisa, nenhum estudo aplicando os modelos de CFD para simular o comportamento do escoamento no interior de

¹ Preço de R\$ 1.850,00, de acordo com cotação realizada em 2024 para o Carneiro Hidráulico Marumby nº 03 (MARUMBY, 2024; MERCOCOMERCIAL, 2024).

² Preço de R\$ 1.399,00, de acordo com cotação realizada em 2024 para a Motobomba Toyama TWP50CA (TOYAMA, 2024; BSS MÁQUINAS, 2024).

bombas carneiros foi encontrado, transformando tal fato em uma área de estudo em potencial. Um importante aspecto dos modelos CFD é que eles podem operar em conjunto com dispositivos que coletam dados, como sensores, RFID, *lasers*, fotogrametria e videogrametria. Essas peças de hardware podem ser programadas e utilizadas para comparar resultados reais, de experimentos, com os resultados dos modelos, e ambos podem ser refinados até encontrarem uma solução ótima, uma situação favorável a ambos. (LOGATTI, KELLNER, 2021).

3.4.4 Ausência de trabalhos recentes que otimizam o modelo da bomba carneiro

Esta seção, apesar de ser a última faceta a ser apresentada representa o desenvolvimento do tópico anterior. Com o surgimento de novas tecnologias, utilizadas para simular o comportamento do escoamento e modelar seus aspectos, é natural que novos estudos considerando o aprimoramento de bombas carneiro seja uma área considerável para ser amplamente explorada em pesquisas futuras. Diferentemente dos demais tópicos, há um número considerável de trabalhos sobre o aprimoramento de modelos de carneiros hidráulicos, mas esses estudos foram publicados de 1966 a 1998. Desde então, apenas dois estudos envolvendo o aprimoramento podem ser destacados: Guo *et al* (2018) que aplicando a simulação numérica e um experimento físico, apresentaram um método para otimização do projeto e para análise do desempenho do sistema, e Asvapoositkul *et al* (2019) que executaram vários experimentos usando a bomba carneiro e variando alguns de seus parâmetros, como alimentação, pressão da câmara de ar e variação de batimentos por minuto da válvula de impulso. (LOGATTI, KELLNER, 2021).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Análise Bibliométrica

A análise bibliométrica é utilizada como um meio de determinar e monitorar a produção científica. Devido ao seu aspecto multidisciplinar, auxiliou no início de um novo ramo da pesquisa científica: a cienciometria. Essa área de estudo também é utilizada como um instrumento de suporte para tomada de decisões, em algumas pesquisas pode até ser aplicada como um meio de direcionar o progresso, em tópicos como metodologia e resultados.

Trata-se de uma ferramenta de grande valor, principalmente para apontar os estudos mais relevantes, assim como indicar o que já foi produzido e publicado considerando alguns aspectos (GUMPENBERGER, WIELAND, GORR, 2012).

Nessa análise, utilizou dois diferentes softwares (VOSViewer e *Software R*), considerando diferentes conjuntos de palavras-chave sobre o carneiro hidráulico. Com isso, esperou-se dirigir o desenvolvimento do futuro modelo computacional. Informa-se que os resultados obtidos com a análise bibliométrica já foram incorporados na revisão bibliográfica apresentada anteriormente.

Para avaliar a produção científica existente a respeito do carneiro hidráulico, a análise bibliométrica teve um caráter descritivo, quantitativo e qualitativo. A análise descritiva partiu do levantamento de informações feito através do site *Web of Science* sobre o uso da bomba de aríete. O *Web of Science* é um banco de dados multidisciplinar e indexa estudos de grande relevância mundial.

Em relação ao caráter quantitativo, esse pode ser apontado por meio da quantificação dos artigos, esses sendo divididos por meio do ano de produção, dos autores mais relevantes e das palavras-chave. Por fim, a análise qualitativa se deu por meio da discussão dos artigos já produzidos, onde foi dada a perspectiva atual da área de pesquisa e indicados pontos a serem melhorados em produções futuras.

A pesquisa foi realizada em novembro de 2020 e englobou o período de 1945 até 2019, o grande intervalo de tempo utilizado é resultado do fato de que as bombas carneiro são dispositivos usados desde o início do século XIX, entretanto, atualmente, essa bomba não é mais aplicada devido, principalmente, pela disponibilidade de energia elétrica e pelo fácil

acesso a conjuntos motobomba. Por fim, para a tipologia da produção científica, foram considerados apenas artigos em inglês publicados em revistas.

Para a análise dos dados foram utilizados dois programas (*softwares*) diferentes, sendo eles o VOSViewer (VOSVIEWER, 2020) e a aplicação R (THE R FOUNDATION, 2020). O VOSViewer foi o programa escolhido para ilustrar as redes e conexões existentes entre termos durante o estudo, pois a construção de gráficos a partir dos dados do *Web of Science* é nativa a ele, ou seja, a operação é simples e direta quando comparada com outras ferramentas, soma-se a esse argumento a questão desses gráficos apresentarem uma resolução gráfica e disposição no espaço melhor quando comparado, por exemplo, com o *software* R.

Por outro lado, a aplicação R apresenta uma extensa gama de métodos estatísticos e gráficos, também aceita diferentes tipos de extensões, facilitando o desenvolvimento de uma análise bibliométrica. Devido a tais características, para esse estudo foi utilizada a aplicação R em conjunto com o pacote Bibliometrix (ARIA, CUCCURULLO, 2017), o Bibliometrix carrega na aplicação R uma série de funções pré-programadas, interessantes para otimização do tempo durante a análise de dados.

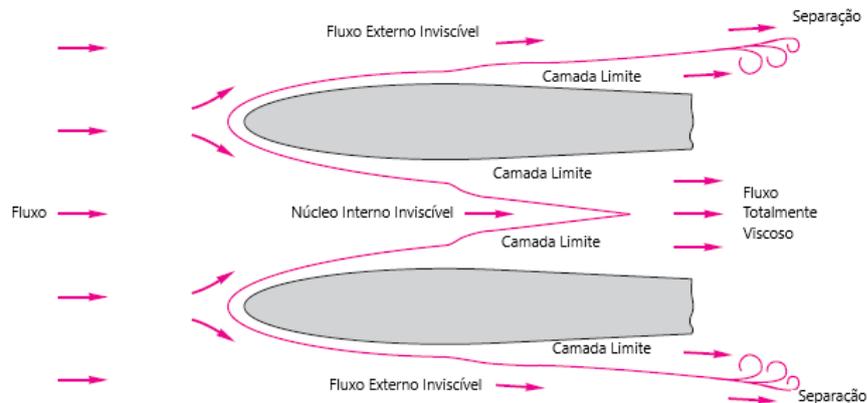
4.2 Fluidodinâmica Computacional

A mecânica dos fluidos é tida como a ciência que estuda o comportamento físico dos fluídos e as leis que regem esse comportamento. É um ramo bem desenvolvido da física, sendo extremamente útil, e envolvendo diferentes áreas da ciência aplicada (BRUNETTI, 2008).

O assunto inclui três tópicos intimamente relacionados: dinâmica dos fluidos, transferência de calor e transferência de massa. A dinâmica dos fluidos (fluidodinâmica) envolve o transporte de momento, a transferência de calor lida com o transporte de energia e a transferência de massa diz respeito ao transporte de massa de várias espécies químicas (BIRD, STEWART, LIGHTFOOT, 2004).

Segundo Brunetti (2008) a fluidodinâmica é um dos tópicos da mecânica dos fluidos que visa estudar a interação existente entre um fluido e um corpo nele imerso, quando entre os dois existe um movimento relativo. Para essa condição não é importante se o corpo, o fluido ou ambos estão em movimento. Segundo o autor, o fenômeno é observado tendo como fixa a superfície sólida, conforme indicado na Figura 22.

Figura 22 – Fenômeno da fluidodinâmica observado a partir de superfície sólida.



Modificado de: WHITE (2011).

Conforme Silva (2017) a Fluidodinâmica Computacional, também chamada de CFD (*computational fluid dynamics*) tem o objetivo de solucionar numericamente as equações de transporte de quantidade de movimento, massa e energia, simulando a dinâmica dos fluidos e solucionando os problemas práticos.

É uma ferramenta que soluciona equações matemáticas de modo específico, perante uma região de interesse e com condições de contorno pré-determinadas. A utilização de CFD aplica-se a diversos sistemas cujas equações advêm da teoria de fenômeno de transportes, obtendo-se resultados detalhados e reduzindo o tempo e os custos quando comparados a métodos experimentais e de campo. Para aplicação de métodos CFD usam-se *softwares* que fazem a previsão da dinâmica dos fluidos, relacionando-os com os fenômenos físicos envolvidos (OLIVEIRA, 2017).

4.2.1 Método dos Volumes Finitos

Os principais métodos numéricos adotados para a resolução de problemas de escoamento são o Método das Diferenças Finitas (MDF), o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Volumes Finitos (MVF). Dentre eles, aquele mais adequado para situações em que a modelagem é tridimensional é o MVF (OLIVEIRA, 2017).

Segundo Maliska (2004 *apud* OLIVEIRA, 2017), a aplicação desse método se dá a partir da obtenção de equações aproximadas que respeitam a regra de conversão das propriedades em nível de volumes elementares. O MVF funciona reduzindo os termos diferenciais parciais no espaço para equações algébricas. Isso é possível através da realização do balanço da

conservação de diversas propriedades (massa, quantidade de movimento, e outros) no volume elementar.

A principal vantagem MVF em relação aos outros métodos é sua versatilidade para ser aplicado a diferentes tamanhos de malhas. Além disso, a utilização do método em malhas grosseiras (com elementos maiores) pode resultar em um tempo de simulação significativamente reduzido (OLIVEIRA, 2017).

4.2.2 Discretização da malha numérica

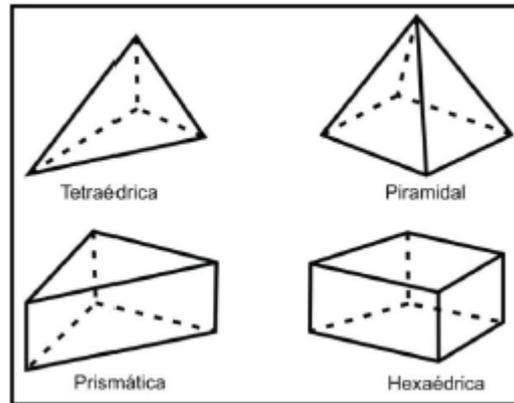
O fluxo e os fenômenos relacionados podem ser descritos por equações diferenciais parciais (ou integro-diferencial), essas não podem ser resolvidas analiticamente, exceto em casos especiais. Para obter as soluções numéricas aproximadas, o método de discretização tem de ser utilizado, ele se baseia na aproximação das equações diferenciais usando sistema de equações algébricas, que então podem ser resolvidas pelo computador (FERZIGER, PERIC, 2002).

As aproximações são aplicadas em pequenos domínios do espaço e/ou tempo para que a solução numérica forneça resultados em locais distintos no espaço e no tempo. Por mais que a precisão dos dados experimentais dependa da qualidade das ferramentas utilizadas, a precisão das soluções numéricas depende da qualidade das discretizações usadas (FERZIGER, PERIC, 2002).

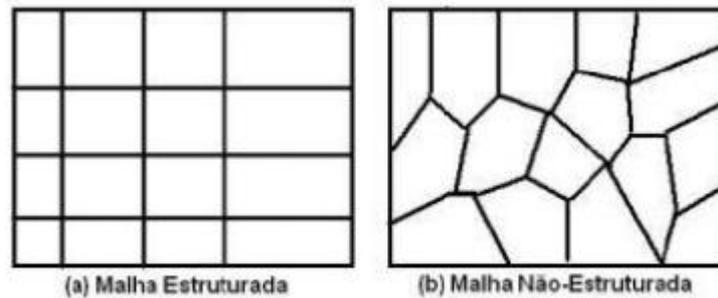
A malha numérica é um fator importante quando analisada a discretização do método, é essencial que a malha possibilite sucesso dos resultados da simulação, isso é alcançado por meio de uma boa distribuição de elementos e nós (SILVA, 2017).

A geração da malha é um processo em que é feita a discretização espacial do sistema, uma boa representação discretizada do domínio permite que seja aplicado um método de solução numérica que resolverá o problema. A malha numérica fragmenta o domínio da solução num número finito de subdomínios (MIRANDA *et al*, 2000 *apud* SILVA, 2017).

De acordo com Silva (2017), a malha gerada pode apresentar inúmeras formas geométricas, sendo as mais comuns: triangular, tetraédricas, elementos prismáticos e hexaédricos (Figura 23). A classificação também se dá em dois tipos: malhas estruturadas, que utilizam um sistema de coordenadas e malhas não estruturadas, não utilizam sistema de coordenadas (Figura 24).

Figura 23 – Formas Geométricas da Malha.

Fonte: SILVA (2017).

Figura 24 – Malha estruturada e não-estruturada.

Fonte: SILVA (2017).

As malhas estruturadas são construídas através da subdivisão dos eixos coordenados em elementos unidimensionais, resultando em elementos bidimensionais, representados por quadriláteros, e tridimensionais, representados por elementos hexaédricos. Já as malhas não-estruturadas são criadas automaticamente, formadas por vários elementos de diferentes formatos, para casos bidimensionais geralmente usam-se triângulos, e tridimensionais, tetraedros (SILVA, 2017).

Para determinar a melhor malha a ser adotada deve ser analisado o nível de complexidade da geometria utilizada e qual é nessa geometria o ponto de maior interesse. Existem modelos numéricos que permitem o uso de malha híbrida, ou seja, que aplicam malhas de diferentes tipos. A malha híbrida deve ser usada para problemas que tenha uma geometria complexa, com mudanças de direção e curvaturas, por exemplo (SILVA, 2017).

Salienta-se que a definição do tipo de malha deve ser feito somente após uma série de simulações, assim, aquela que apresenta a melhor relação tempo de processamento/resultado obtido é adotada para o trabalho.

4.3 Software disponíveis para aplicação do CFD

Para a utilização de técnicas de CFD é preciso que seja adotado um *software* de desenvolvimento que permita fazer a modelagem do sistema de um carneiro hidráulico, assim como a inclusão de todos os parâmetros que podem alterar o seu funcionamento.

4.3.1 OpenFOAM ®

O OpenFOAM® é um software CFD de código aberto e gratuito, é desenvolvido desde 2004 pela OpenCFD Ltd. Apresenta uma grande base de usuários das mais diversas áreas das engenharias e ciências. Possui um grande alcance de aplicações, resolvendo problemas complexos de escoamento, incluindo reações químicas, turbulência, transferência de calor, acústica, mecânica dos sólidos e eletromagnetismo. Inclui a capacidade de realizar as operações de: (OPENCFD, 2019)

- Fluxos de trabalho de ponta a ponta orientados a processos, CAD → malha → solução → análise → otimização.
- Aerodinâmica e hidrodinâmica, incluindo veículos, edifícios, meio ambiente, clima urbano, marinho.
- Fluxos internos em dutos, ventilação de aquecimento e ar-condicionado, sistemas de controle ambiental, câmaras frias, instalações de incêndio e segurança, hidráulica, condições de conforto.
- Aplicações físicas padrão incluindo turbulência, combustão, compressibilidade, velocidade, aeroacústica, momento de massa multifásico e transferência de calor, volume de fluido, fusão e solidificação, reações químicas, sedimentação.

4.3.2 ANSYS Discovery ®

O ANSYS Discovery é um software que funciona como uma ferramenta de design orientada por simulação. Sua principal vantagem é a capacidade de combinar a simulação física instantânea, simulação de alta fidelidade e a modelagem geométrica interativa. O ANSYS Discovery permite explorar vários aspectos do fluxo de fluidos, como velocidade, distribuição de pressão, turbulência e transferência de calor (ANSYS INC, 2024).

Os principais recursos do ANSYS Discovery para análise de fluxo de fluidos incluem:

1. Interface intuitiva: interface fácil de usar que permite aos usuários configurar e executar simulações de fluxo de fluidos com eficiência. O fluxo de trabalho intuitivo

orienta os usuários através do processo de definição de condições limite, especificação de propriedades de fluidos e configuração de parâmetros de simulação.

2. *Feedback* em tempo real: oferece *feedback* em tempo real para simulações de fluxo de fluidos. Os usuários podem visualizar e interagir instantaneamente com os resultados da simulação à medida que fazem alterações no projeto, permitindo rápida iteração e exploração de alternativas de projeto.
3. Malha automática: gera automaticamente malhas de alta qualidade para simulações de fluxo de fluido, eliminando a necessidade de malha manual. Isso agiliza o processo de configuração da simulação e garante resultados precisos sem a complexidade das técnicas tradicionais de geração de malhas.
4. Ferramentas de pós-processamento: fornece ferramentas de pós-processamento para visualizar e analisar os resultados da simulação. Os usuários podem examinar padrões de fluxo de fluidos, perfis de velocidade, distribuições de pressão e outros dados relevantes para obter insights sobre o comportamento de seus projetos.

Ao combinar modelagem interativa e vários recursos de simulação em um produto, o Discovery permite a resposta de questões críticas de projeto no início do processo de projeto. Essa abordagem inicial de simulação economiza tempo e esforço na prototipagem à medida que se explora vários conceitos de projeto em tempo real, sem a necessidade de esperar pelos resultados da simulação. Entretanto, o seu principal ponto negativo é ser um software pago, em 2024

4.4 Construção da malha numérica e utilização de softwares

A construção e modelagem da malha numérica pode ser considerada como o passo mais importante, complexo e difícil da mecânica dos fluidos computacional, portanto é natural que com o avanço dessa área de pesquisa, ferramentas, mais especificamente softwares, foram desenvolvidos para agilizar e facilitar todo o processo. Destaca-se que, geralmente, o *software* utilizado para a modelagem da malha numérica e o *software* utilizado para a simulação CFD são distintos, portanto é importante verificar quais são os softwares disponíveis para cada uma das diferentes etapas do processo de simulação.

4.4.1 Blender: *SwifBlock*, *SnappyHexMesh GUI* e *Export OF*

Blender é um software gratuito e de código aberto para criação de desenhos em 3D. Ele apresenta todas as funcionalidades básicas para produção 3D - modelagem, *rigging*, animação, simulação, renderização, composição e rastreamento de movimento, edição de vídeo e criação

de jogos. Além disso como o Blender é um projeto conduzido pela comunidade sob a licença GNU, o público tem o poder de fazer pequenas e grandes alterações na base de código, o que leva a novos recursos, correções de bugs responsivas e melhor usabilidade. Com isso várias aplicações extras baseadas na linguagem Python, chamadas de “add-ons”, encontram-se disponíveis para serem usadas dentro desse software, entre elas destacam-se três voltadas para a criação de malhas de CFD: o *SwiftBlock*, o *SnappyHexMesh GUI* e o *Export OF* (BLENDER, 2022a).

SwiftBlock é um complemento do Blender desenvolvido para utilização em conjunto com a função *blockMesh* do OpenFOAM®, que cria malhas de volume estruturadas em blocos hexaédricos para simulações OpenFOAM. A estrutura do bloco é primeiro modelada como um objeto de malha no Blender em seguida um método baseado em teoria de grafos, implementado pelo *add-on*, identifica os blocos hexaédricos discretos na malha e gera o dicionário do *blockMesh* (*blockMeshDict*). As principais características desse *add-on* são: (KESKITALO, 2020)

- divisões especificadas pelo usuário e gradação opcional das arestas do bloco;
- especificação de *patches* (superfícies de fronteira);
- especificação de blocos para criar zonas/conjuntos de células;
- fácil manipulação de blocos, incluindo seleção, visualização e desativação;
- visualização de direções de borda;
- projeção de arestas de bloco para superfícies em outro objeto para criar formas curvas.

SnappyHexMesh GUI é uma ferramenta de geração de malha geométrica para o OpenFOAM®. Ele destina-se a ajudar os usuários do OpenFOAM a usar o Blender como uma ferramenta de pré-processamento de CFD. Os seus objetivos são: (KESKITALO, 2022)

- Facilitar o fluxo de trabalho para atualizar, modificar e exportar malhas de superfície 3D para OpenFOAM.
- Permitir a definição das configurações mais comuns do *SnappyHexMesh* via GUI do Blender, para reduzir a necessidade de escrita manual das definições do dicionário OpenFOAM.
- Requer habilidades mínimas no Blender. A geometria pode ser modelada em qualquer programa de modelagem 3D/CAD que exporte um formato de malha de

superfície que pode ser importado para o Blender, como STL ou Wavefront OBJ. O complemento é operado através de painéis na GUI do Blender.

Esse *add-on* gera arquivos de dicionário OpenFOAM para os objetos de malha de superfície no Blender. A criação do dicionário é baseada em substituições de *strings* usando arquivos de modelo localizados no diretório *skel* do complemento.

O *Export OF* é o *add-on* mais simples entre os três, ele exporta objetos em formato de arquivo ASCII STL para OpenFOAM. Para utilizá-lo selecionam-se vários objetos e salva-os em um arquivo *.stl*. Além disso, pode-se dimensionar os objetos e aplicar modificadores durante a exportação. O “complemento” dimensiona os objetos do sistema de coordenadas base. Outra característica deste complemento é a capacidade de alterar a orientação do objeto durante a exportação (SAFDARI, 2021).

4.4.2 Gmsh

Gmsh é um gerador de malha de elementos finitos tridimensional embutido com um mecanismo CAD e pós-processador. O objetivo do programa é fornecer uma ferramenta de construção rápida, leve e fácil de usar com entrada paramétrica e recursos avançados de visualização (GEUZAINÉ, REMACLE, 2022).

Esse *software* é construído em torno de quatro módulos: geometria, malha, *solver* e pós-processamento. Todas as instruções geométricas, de malha, *solver* e pós-processamento são prescritas interativamente usando a interface gráfica do usuário (GUI) ou em arquivos de texto usando a própria linguagem de script do Gmsh. Suas principais vantagens são: (GEUZAINÉ, REMACLE, 2022).

- Descrever rapidamente geometrias simples e/ou “repetitivas” com a linguagem de script integrada, utilizando macros, loops, condicionais e inclusões definidas pelo usuário;
- Parametrizar geometrias;
- Importar geometrias de softwares CAD em formatos padrão;
- Gerar malhas de elementos finitos simples 1D, 2D e 3D, com controle fino sobre o tamanho dos elementos;
- Criar geometrias e malhas extrudadas simples e permitir acoplar automaticamente essas malhas estruturadas com as não estruturadas (usando uma camada de pirâmides em 3D);
- Gerar malhas de alta ordem (curvas) que estão em conformidade com a geometria do modelo CAD;

- Visualizar e exportar resultados computacionais de várias maneiras: pode exibir conjuntos de dados escalares, vetoriais e tensores, executar várias operações no pós-processamento de visualizações e pode gerar animações complexas;
- Execução em máquinas de baixo custo e/ou máquinas sem interface gráfica: pode ser compilado com ou sem a GUI, e todas as versões podem ser usadas interativamente ou diretamente no prompt de comando;
- É multiplataformas e gratuito.

4.5 Elementos Físicos que compõe o carneiro hidráulico

Para a modelagem no *software* Blender, será usado como base a bomba carneiro montada pelo estudo de Oliveira Junior *et al* (2021), portanto os elementos constituintes do equipamento serão:

- 1 Registro de esfera;
- 2 Tês;
- 1 Joelho/Cotovelo 90°;
- 1 Válvula de Retenção;
- 1 Válvula de Pé e Crivo;
- 2 *Nipples*;
- 1 Adaptador de mangueira;

Para correta modelagem dos acessórios e tubulação será utilizado como base o Catálogo Técnico da empresa Tigre (TIGRE, 2016). Como no estudo de Oliveira Junior *et al* (2021) não houve a especificação do diâmetro das peças, mas existiu uma variação do volume da câmara de pressão, foram efetuados cálculos com o diâmetro variando de 1/2” até 2” e o comprimento de 10 até 100 cm, apresentados na Tabela 2. Esses foram comparados com os volumes informados no estudo e chegou-se no diâmetro comercial de 1” como o que melhor se adaptou aos volumes de câmara informados, a Tabela 3 apresenta as medições utilizadas. A Figura 25 apresenta o fluxograma do processo de desenvolvimento do carneiro hidráulico, desde a definição da bomba até a análise dos resultados.

Tabela 2 – Cálculo do volume da câmara com base na variação de diâmetro e comprimento.

Diâmetro (")	Diâmetro (m)	Comprimento (m)	Área (m²)	Volume (m³)	Volume (L)
½	0,0127	0,1	0,0001267	1,26677E-05	0,0126677
½	0,0127	0,2	0,0001267	2,53354E-05	0,0253354
½	0,0127	0,3	0,0001267	3,80031E-05	0,0380031
½	0,0127	0,4	0,0001267	5,06707E-05	0,0506707
½	0,0127	0,5	0,0001267	6,33384E-05	0,0633384
½	0,0127	0,6	0,0001267	7,60061E-05	0,0760061
½	0,0127	0,7	0,0001267	8,86738E-05	0,0886738
½	0,0127	0,8	0,0001267	0,000101341	0,1013415
½	0,0127	0,9	0,0001267	0,000114009	0,1140092
½	0,0127	1	0,0001267	0,000126677	0,1266769
¾	0,01905	0,1	0,000285	2,85023E-05	0,0285023
¾	0,01905	0,2	0,000285	5,70046E-05	0,0570046
¾	0,01905	0,3	0,000285	8,55069E-05	0,0855069
¾	0,01905	0,4	0,000285	0,000114009	0,1140092
¾	0,01905	0,5	0,000285	0,000142511	0,1425115
¾	0,01905	0,6	0,000285	0,000171014	0,1710138
¾	0,01905	0,7	0,000285	0,000199516	0,1995161
¾	0,01905	0,8	0,000285	0,000228018	0,2280184
¾	0,01905	0,9	0,000285	0,000256521	0,2565207
¾	0,01905	1	0,000285	0,000285023	0,285023
1	0,0254	0,1	0,0005067	5,06707E-05	0,0506707
1	0,0254	0,2	0,0005067	0,000101341	0,1013415
1	0,0254	0,3	0,0005067	0,000152012	0,1520122
1	0,0254	0,4	0,0005067	0,000202683	0,202683
1	0,0254	0,5	0,0005067	0,000253354	0,2533537
1	0,0254	0,6	0,0005067	0,000304024	0,3040245
1	0,0254	0,7	0,0005067	0,000354695	0,3546952
1	0,0254	0,8	0,0005067	0,000405366	0,405366
1	0,0254	0,9	0,0005067	0,000456037	0,4560367
1	0,0254	1	0,0005067	0,000506707	0,5067075
1 ½	0,0381	0,1	0,0011401	0,000114009	0,1140092
1 ½	0,0381	0,2	0,0011401	0,000228018	0,2280184
1 ½	0,0381	0,3	0,0011401	0,000342028	0,3420275
1 ½	0,0381	0,4	0,0011401	0,000456037	0,4560367
1 ½	0,0381	0,5	0,0011401	0,000570046	0,5700459
1 ½	0,0381	0,6	0,0011401	0,000684055	0,6840551
1 ½	0,0381	0,7	0,0011401	0,000798064	0,7980643
1 ½	0,0381	0,8	0,0011401	0,000912073	0,9120735
1 ½	0,0381	0,9	0,0011401	0,001026083	1,0260826
1 ½	0,0381	1	0,0011401	0,001140092	1,1400918

Continua...

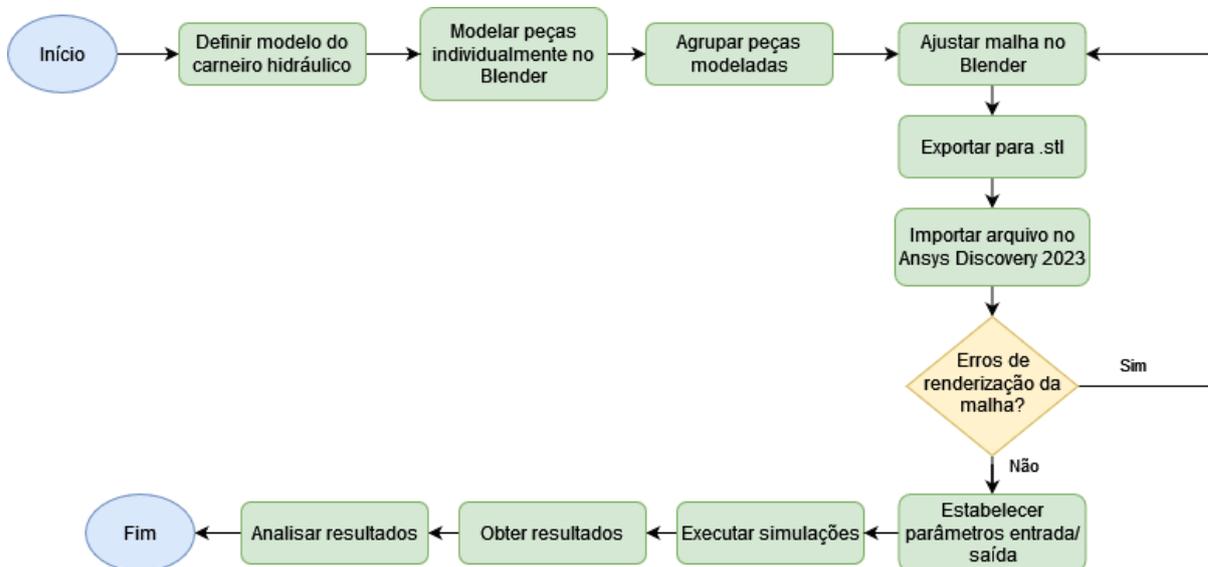
Tabela 2 (Continuação) – Cálculo do volume da câmara com base na variação de diâmetro e comprimento.

Diâmetro (")	Diâmetro (m)	Comprimento (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)	Volume (L)
2	0,0508	0,1	0,0020268	0,000202683	0,202683
2	0,0508	0,2	0,0020268	0,000405366	0,405366
2	0,0508	0,3	0,0020268	0,000608049	0,608049
2	0,0508	0,4	0,0020268	0,000810732	0,810732
2	0,0508	0,5	0,0020268	0,001013415	1,013415
2	0,0508	0,6	0,0020268	0,001216098	1,2160979
2	0,0508	0,7	0,0020268	0,001418781	1,4187809
2	0,0508	0,8	0,0020268	0,001621464	1,6214639
2	0,0508	0,9	0,0020268	0,001824147	1,8241469
2	0,0508	1	0,0020268	0,00202683	2,0268299

Tabela 3 – Medidas: Diâmetro, raio e espessura.

Diâmetro interno (mm)	Espessura (mm)	Diâmetro externo (mm)
25,4	1,7	28,8
Raio interno (mm)		Raio externo (mm)
12,7		14,4

Figura 25 – Fluxograma do processo de desenvolvimento do Carneiro Hidráulico.



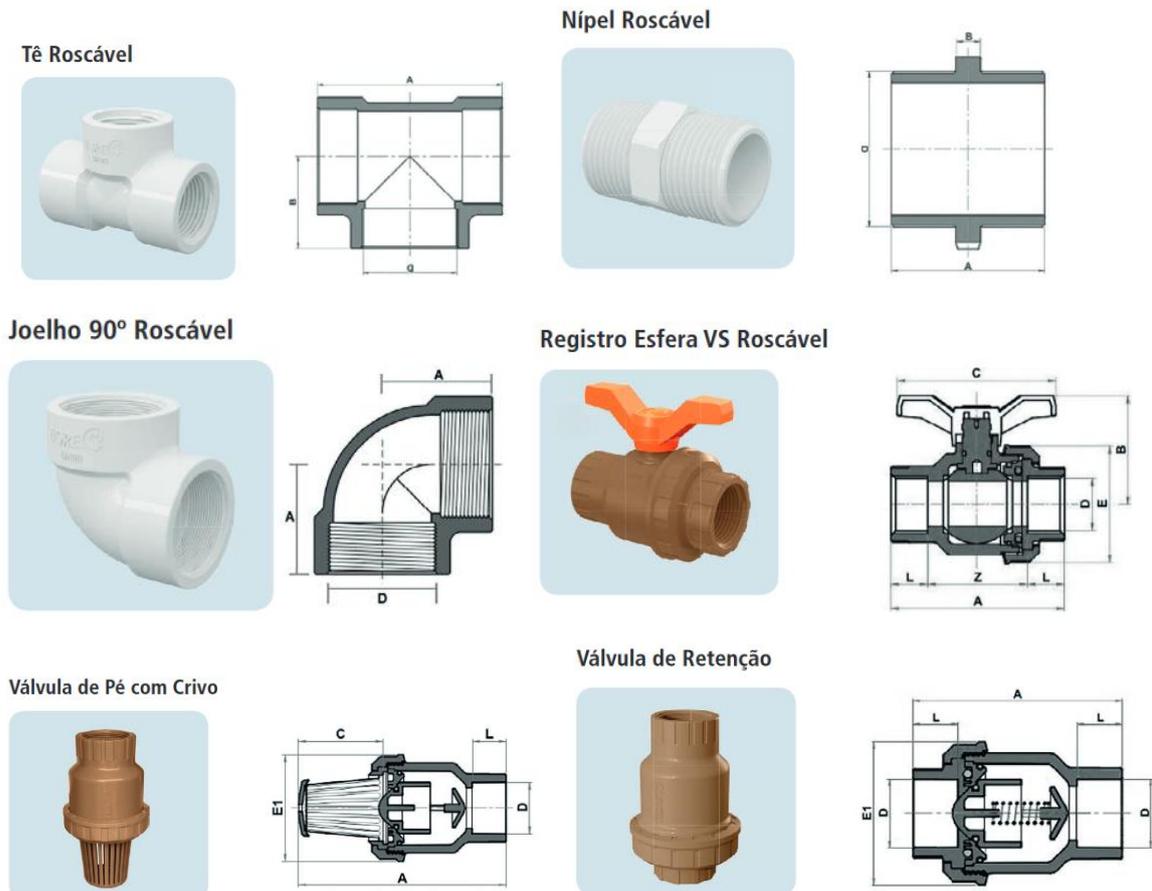
Por fim a Figura 26 apresenta a relação das peças e onde se encontram as respectivas medidas apontadas pela Tabela 4, usadas durante a modelagem.

Tabela 4 – Principais medidas dos acessórios.

Peça	Comprimento (mm)	Medida
Registro de esfera	99,5	A
T	79	A
Joelho	25,1	A
Válvula de retenção	22	L
	27,4	Diâmetro Maior
	30,8	Diâmetro Maior Externo
	99,5	A
Válvula de pé crivo	18,5	L
	48	C
	61	E1
	115,4	A
	28,8	Raio Maior Externo
	27,1	Raio Maior Interno
	48,9	A – (C+L)
<i>Nipple</i>	11	Raio Interno
Adaptador mangueira 1”	8,125	Raio Interno extremidade mangueira
	9,525	Raio Externo extremidade mangueira

Fonte: TIGRE, 2016.

Figura 26 – Relação peças utilizadas para modelagem da bomba carneiro.



Fonte: TIGRE, 2016.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

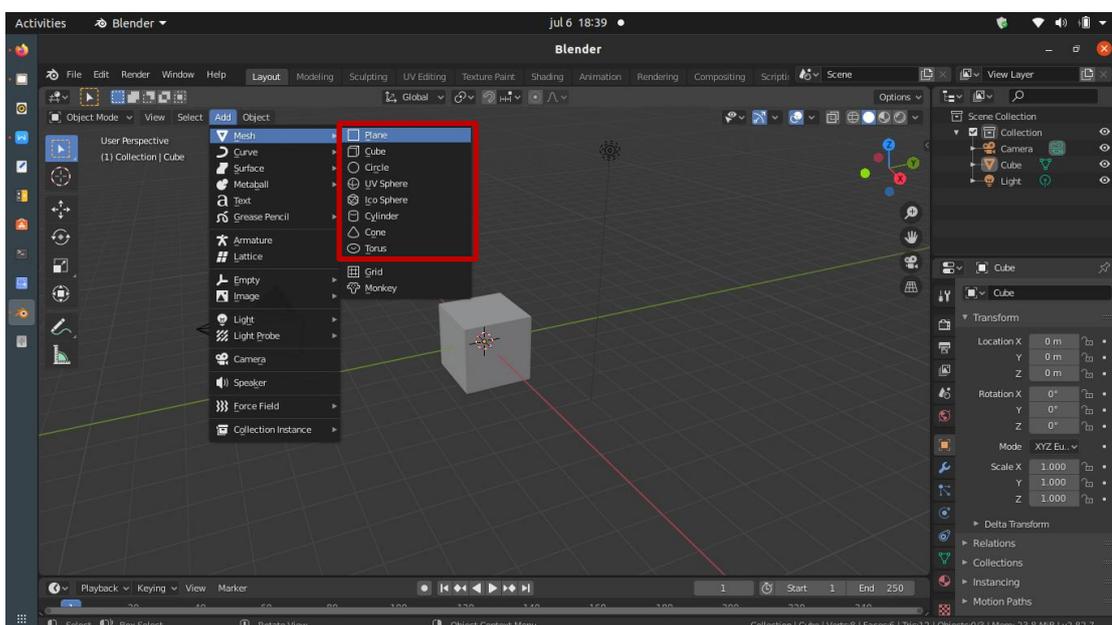
Nesta seção, são descritos os resultados obtidos. Nas seções 5.1 a 5.2.4, detalham-se os processos e resultados da construção do modelo computacional, bem como as dificuldades encontradas. A seção 5.3 aborda a preparação das malhas para algumas das situações características das simulações. Na seção 5.4, discutem-se as simulações iniciais do modelo, e na seção 5.5, são apresentados os resultados das simulações usando CFD, com base nas condições de contorno estabelecidas.

5.1 Modelagem 3D do Carneiro Hidráulico

A modelagem do carneiro hidráulico foi um processo que exigiu muitas horas para ser completado, apesar do software Blender apresentar todas as ferramentas e funções necessárias para tal, como a autora só havia tido contato com ferramentas do tipo CAD 2D, o aprendizado teve de ser obtido através da prática, da leitura do Manual do Blender (BLENDER, 2022b) e de inúmeros fóruns existentes na *internet*.

A maior dificuldade foi encontrada durante a criação de peças que não apresentam formato “tradicional”. O Blender apresenta como figuras padrão 3D o cubo, o cilindro, a esfera, o torus, o plano, o círculo, o cone e a *ico sphere* (Figura 27). Portanto, para modelar, por exemplo o *Nipple*, uma peça relativamente simples, uma série de passos complexos tiveram de ser seguidos. O próximo tópico abordará todos esses passos, isso será feito com o objetivo de demonstrar o grau de dificuldade para modelagem da bomba carneiro.

Figura 27 – Opções de figuras 3D disponíveis no Blender para modelagem.



5.1.1 Modelagem do *Nipple*

Para a modelagem do *Nipple*, tudo se iniciou com a tela padrão do Blender, que apresenta o elemento do cubo, câmera e luz, após a exclusão desses objetos é necessário estabelecer qual é a forma inicial do *Nipple*, no caso, dentre as disponíveis a que melhor se encaixa é o cilindro. Adiciona-se o cilindro a tela de trabalho (Figura 28) e em seguida, no canto inferior esquerdo, definem-se as medidas do raio e comprimento (Figura 29), também podem ser adicionadas as coordenadas (X, Y e Z) em que se deseja localizar o objeto e os graus de rotação nesses eixos. É importante destacar que o Blender apresenta vários modos de trabalhos, mas durante essa modelagem utilizam-se somente o modo objeto (*Object Mode*) e o modo edição (*Edit Mode*) (Figura 28).

Figura 28 – Adição do cilindro ao desenho.

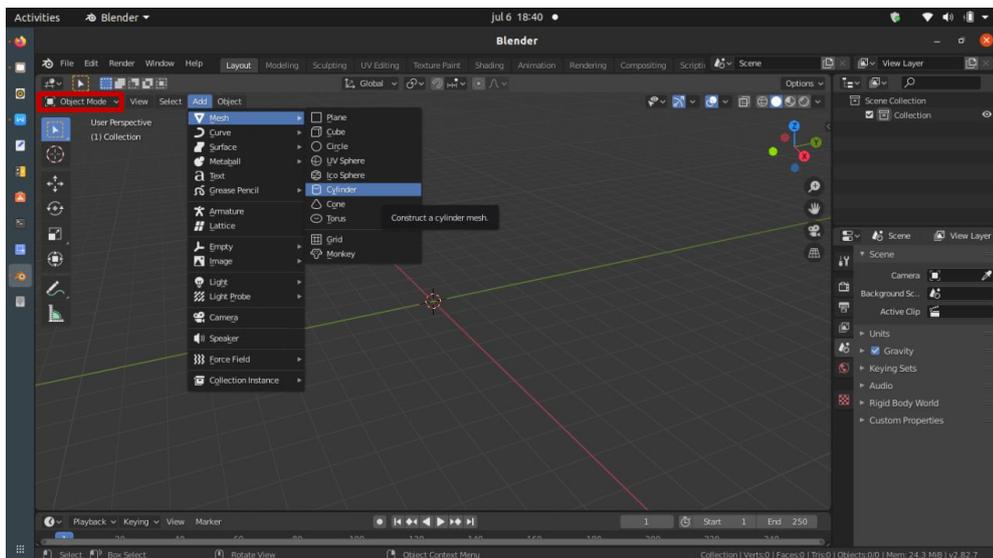
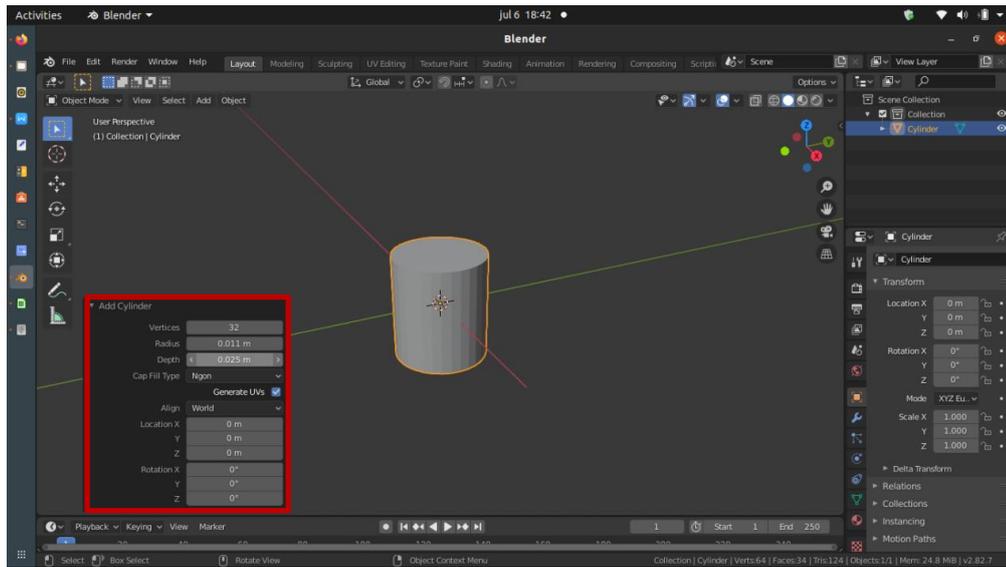


Figura 29 – Inserida as medidas para o cilindro.



Agora se observada a Figura 26 nota-se que o *Nipple* apresenta um tipo de porca no meio do seu comprimento, portanto é necessário adicioná-la ao desenho, para tal um cubo será utilizado (Figura 30). A medida do lado do cubo é estabelecida (Figura 31) e por fim, para facilitar a adaptação do cubo para um prisma retangular em volta do cilindro, coloca-se o cilindro inicial como invisível no desenho (Figura 32).

Figura 30 – Adição do cubo.

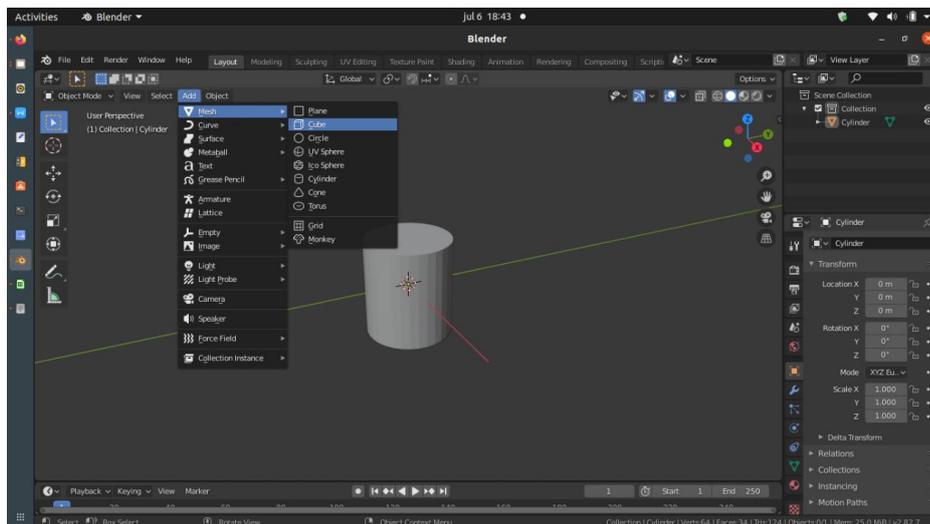


Figura 31 – Inserida medida do lado do cubo.

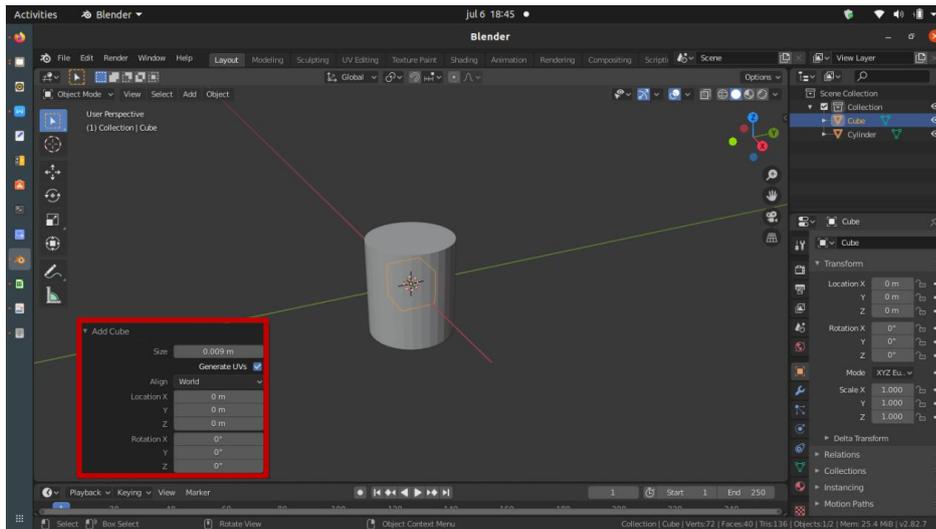
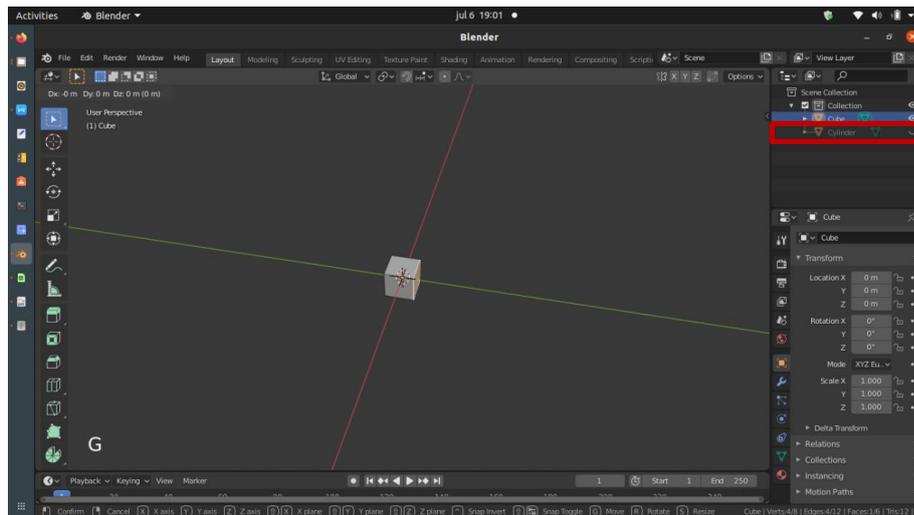


Figura 32 – Ativada propriedade “esconder” para o cilindro.



Agora, utilizando o modo edição, as quatro faces laterais do cubo são estendidas até ultrapassarem as laterais do cilindro (Figura 33), formando então um prisma retangular com comprimento menor do que o tamanho dos lados de sua base e topo (Figura 34 e Figura 35).

Figura 33 – Estendidas as faces laterais do cubo.

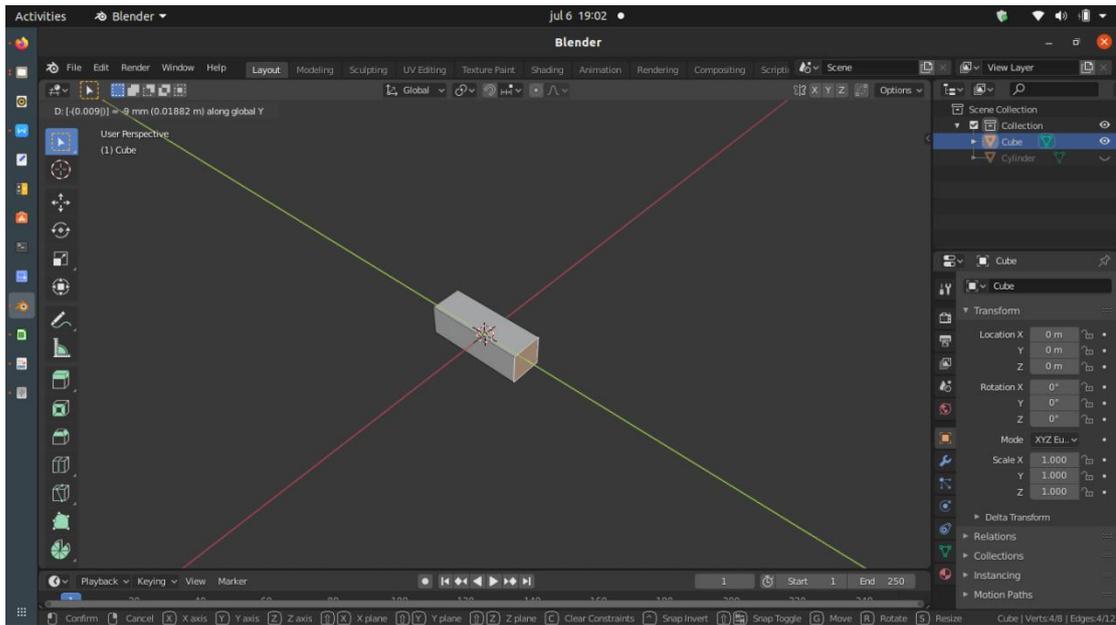


Figura 34 – O cubo é transformado em um prisma retangular.

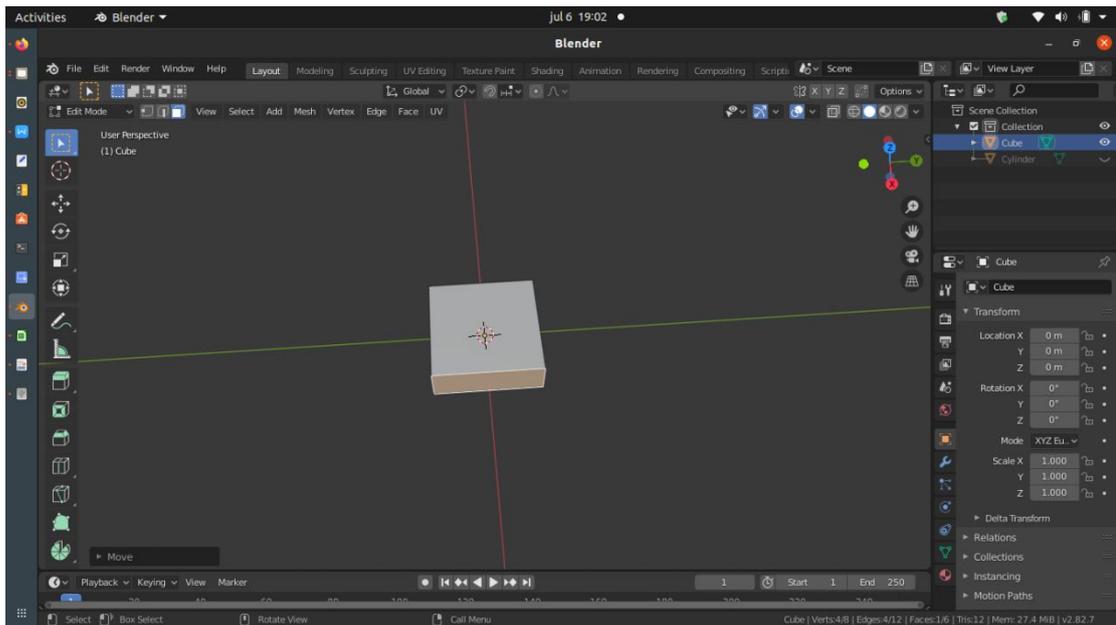
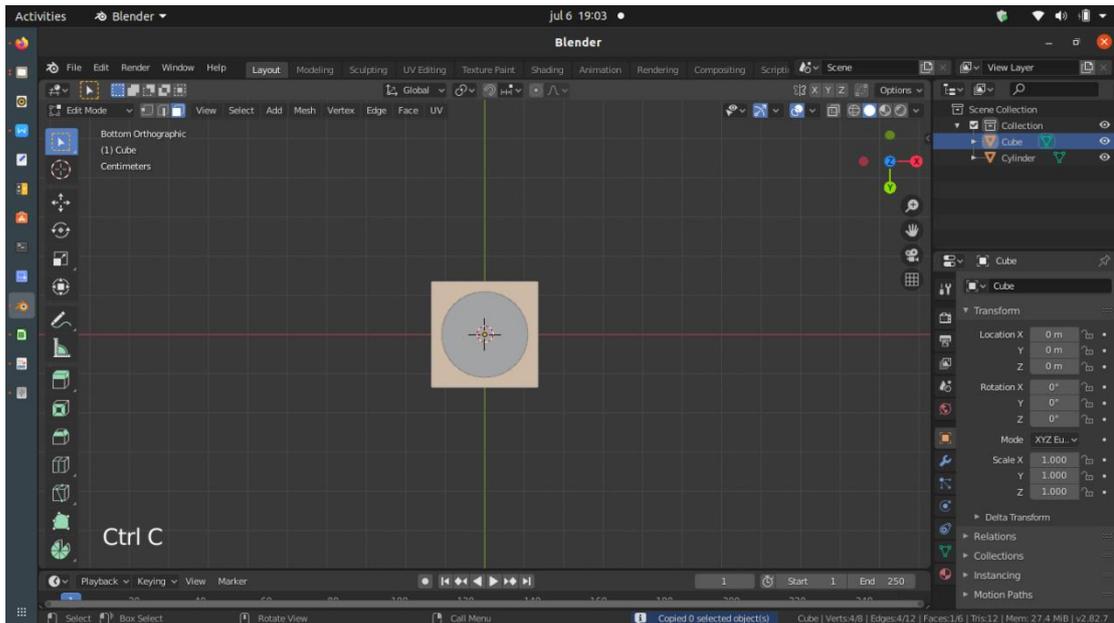


Figura 35 – A medida do lado do prisma ultrapassa a medida do diâmetro do cilindro.



Para criação da porca é necessário que as “pontas” do prisma sejam cortadas, formando então um octógono, para isso será utilizado o próprio prisma que é copiado e colado, em seguida é alterada a rotação no eixo X desse prisma para 45° (Figura 36) e esses quatro elementos são colocados um em cada ponta do prisma inicial (prismas auxiliares), todo esse processo deve ser feito no modo objeto (Figura 37).

Figura 36 – Cópia do prisma inicial e rotação em 45° .

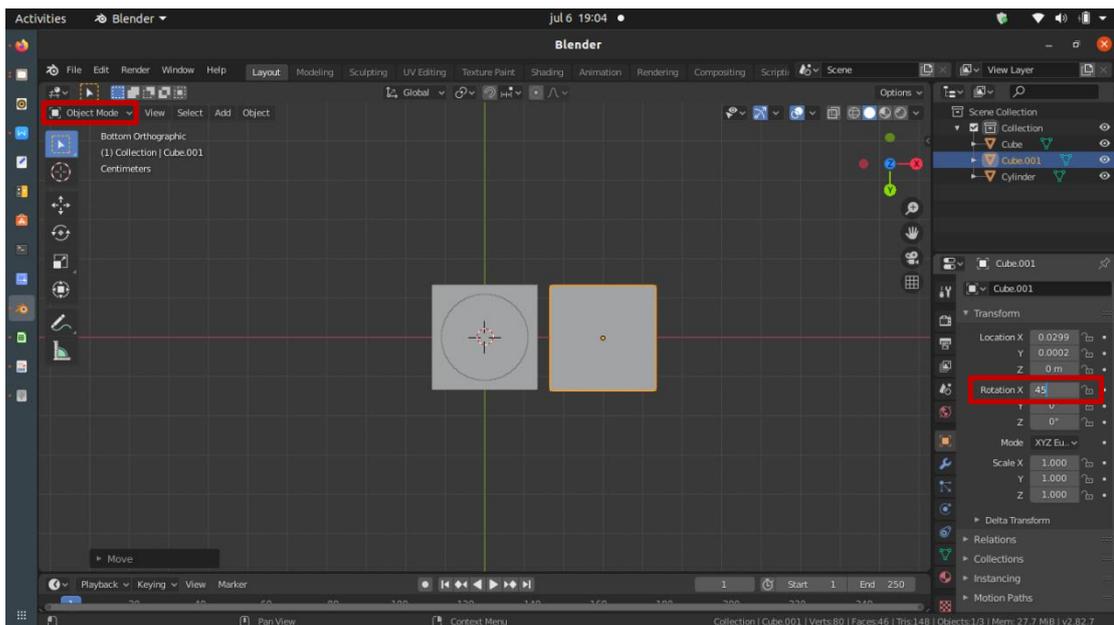
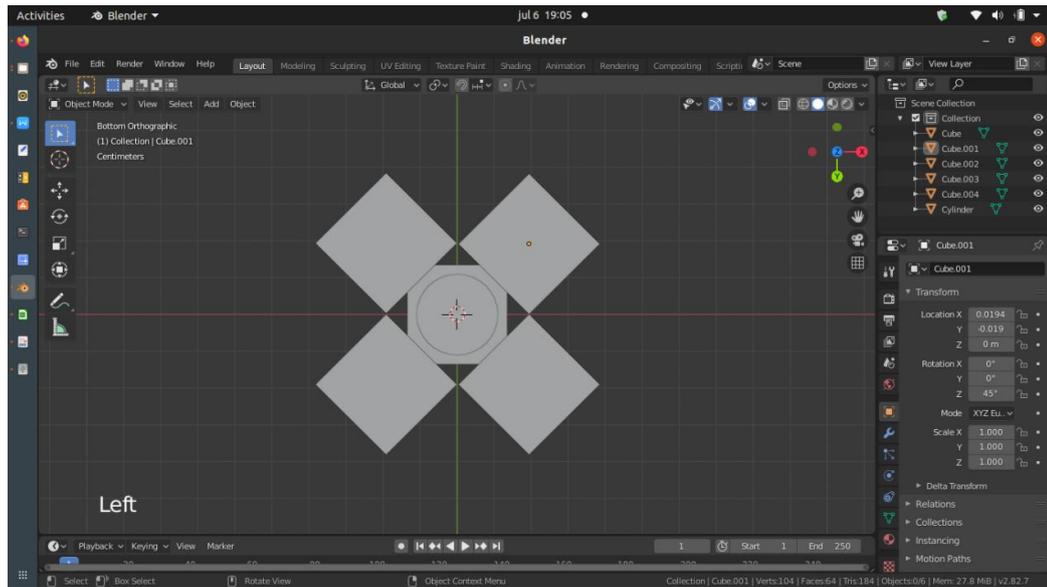
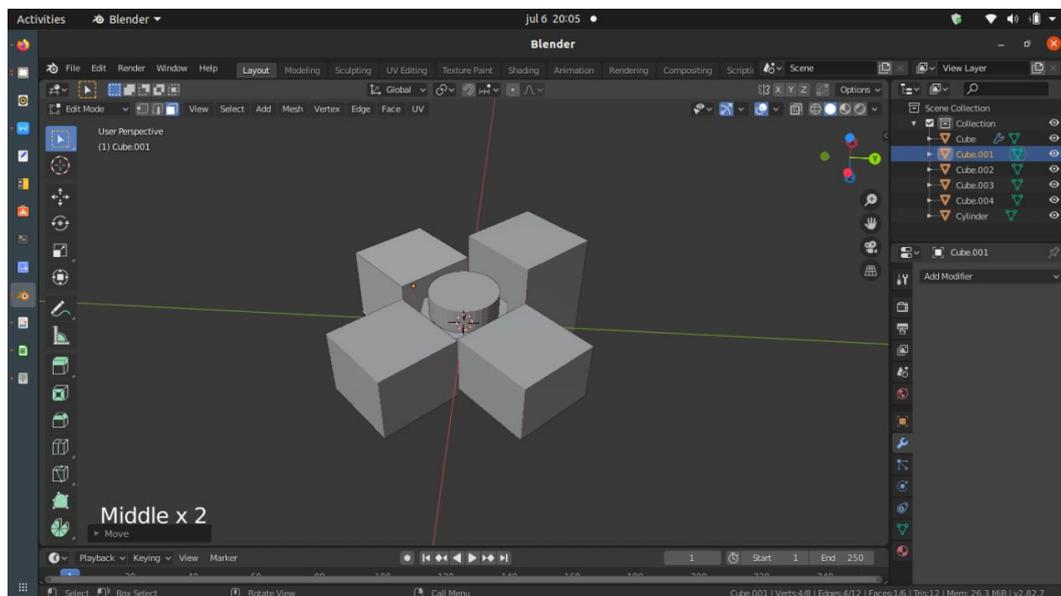


Figura 37 – Colocação de cada prisma copiado em uma extremidade.



Terminada a locação dos prismas auxiliares, recomenda-se o aumento da altura deles, para que essa medida seja superior ao comprimento da “porca”. Isso deve ser feito, pois a função booleana de diferença será usada e muitas vezes ela não opera corretamente quando existe a sobrescrita de duas figuras (Figura 38).

Figura 38 – Aumento da altura dos prismas auxiliares.



Então, para formação do octógono seleciona-se um modificador nativo do Blender, chamado *Boolean* (Figura 39), como o nome já indica ele é baseado nas operações booleanas de intersecção, união e diferença (Figura 40). Destaca-se que esse modificador só está disponível dentro do modo objeto.

Figura 39 – Seleção do modificador (modo objeto).

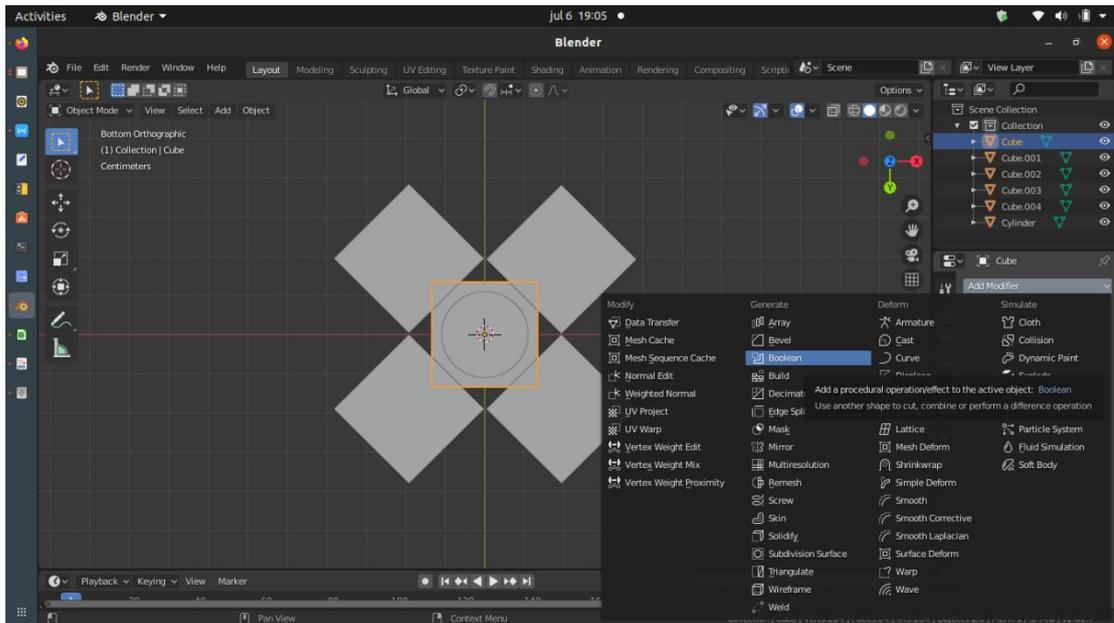
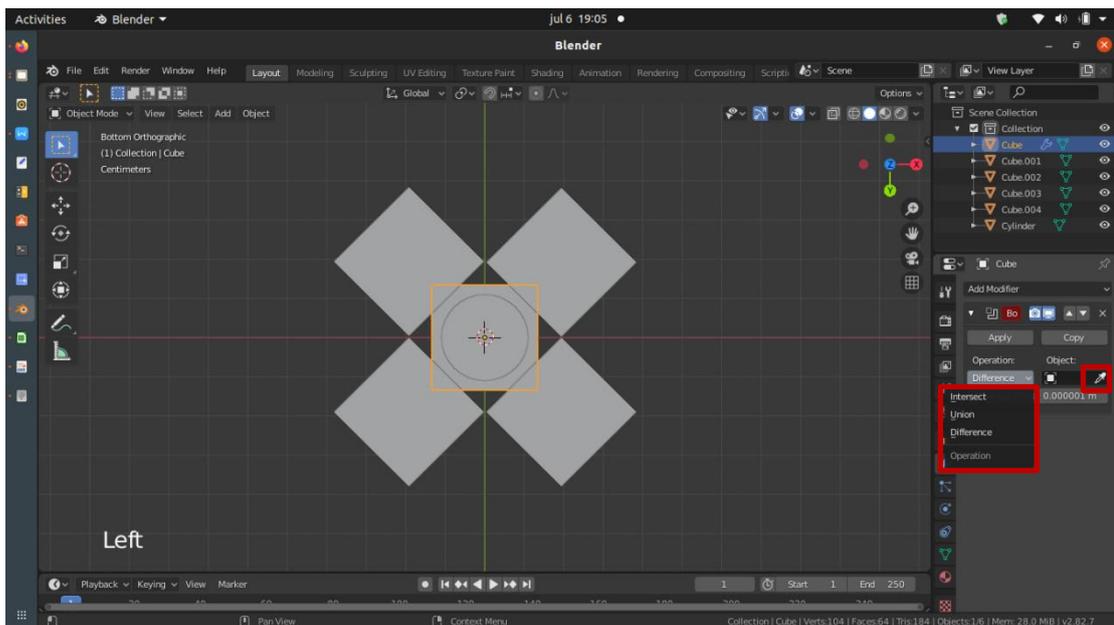


Figura 40 – Opções de operações da função *Boolean*.



Esse modificador funciona da seguinte maneira, primeiro é selecionada a figura desejada para ser alterada, nesse caso a “porca”, essa figura fica destacada no desenho com um contorno laranja (Figura 40), em seguida, opta-se pela operação de diferença, por fim, utilizando o conta-gotas (Figura 40), escolhe-se a figura desejada para realizar a “subtração”. Nota-se então que o contorno laranja muda de formato, apontando que a operação foi executada como era desejado (Figura 41). Essa rotina é repetida para todos os prismas auxiliares, formando-se o desejado octógono (Figura 42).

Figura 41 – Operação da diferença da “porca” por um dos prismas auxiliares.

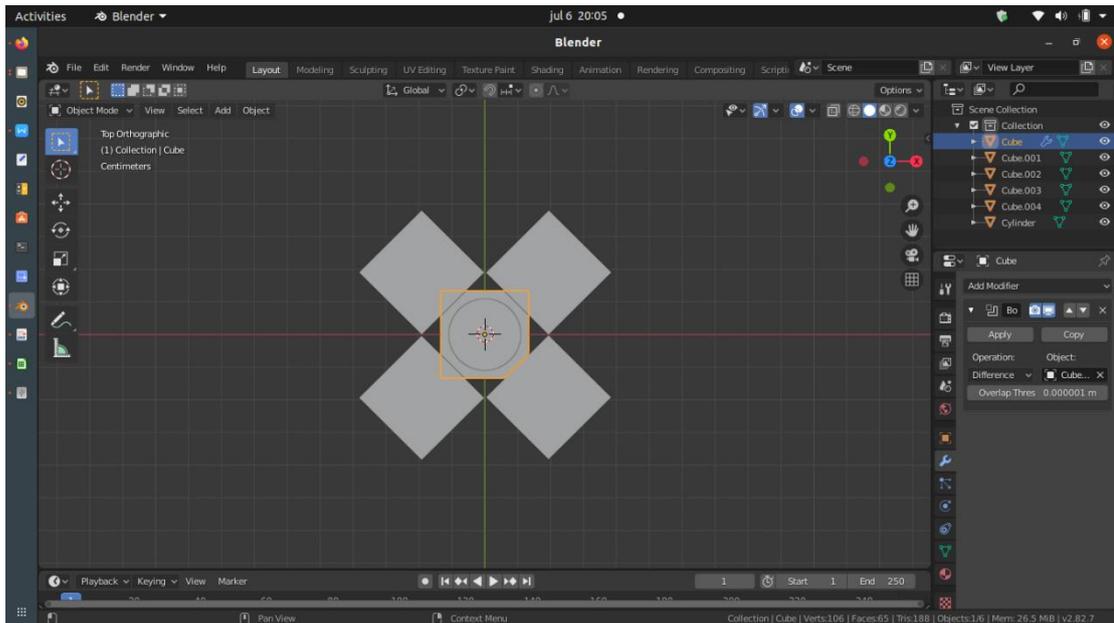
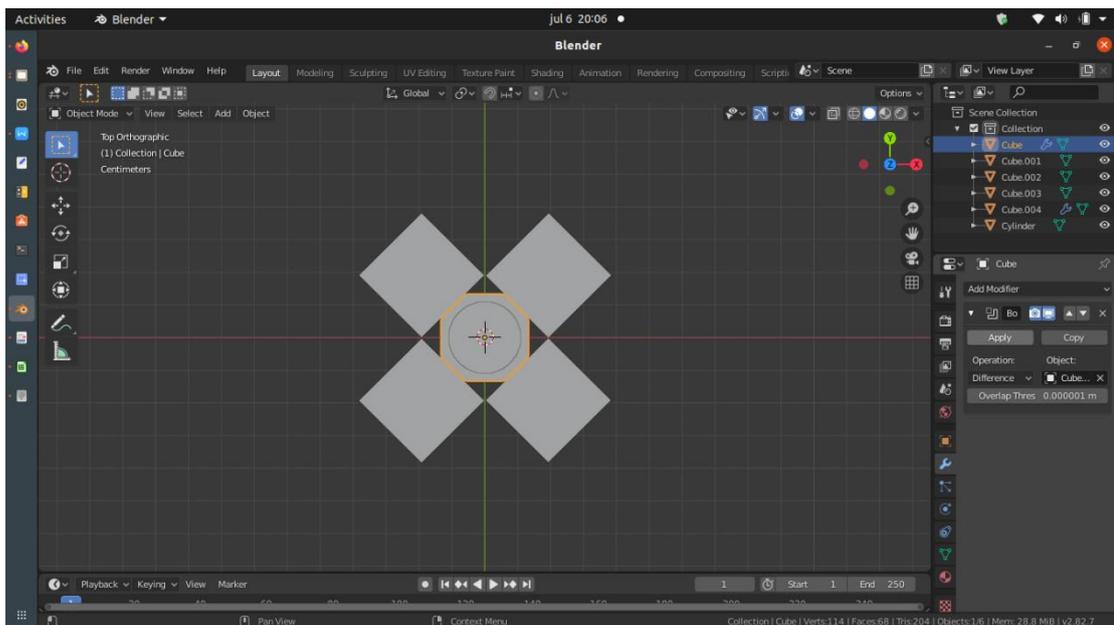


Figura 42 – Em destaque laranja nota-se que a “porca” tomou formato de um octógono.



Excluem-se então os prismas auxiliares, já que octógono foi formado. Observando a Figura 43 nota-se que o objeto resultante já está bem similar a forma final do *Nipple*, restando apenas realizar o furo no seu interior, para isso o octógono e o cilindro serão unidos utilizando o comando *Join* (Figura 44), em seguida um novo cilindro com um diâmetro inferior e maior comprimento é adicionado ao desenho (Figura 45).

Figura 43 – Figura resultante do processo descrito.

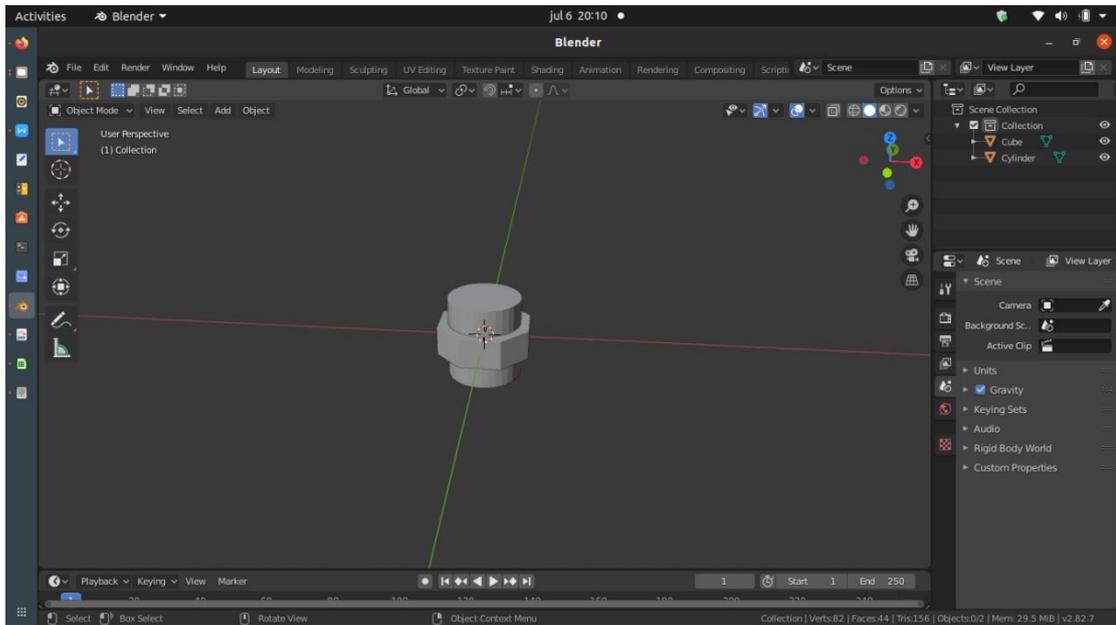


Figura 44 – União entre o octógono e o cilindro inicial utilizando o comando *Join*.

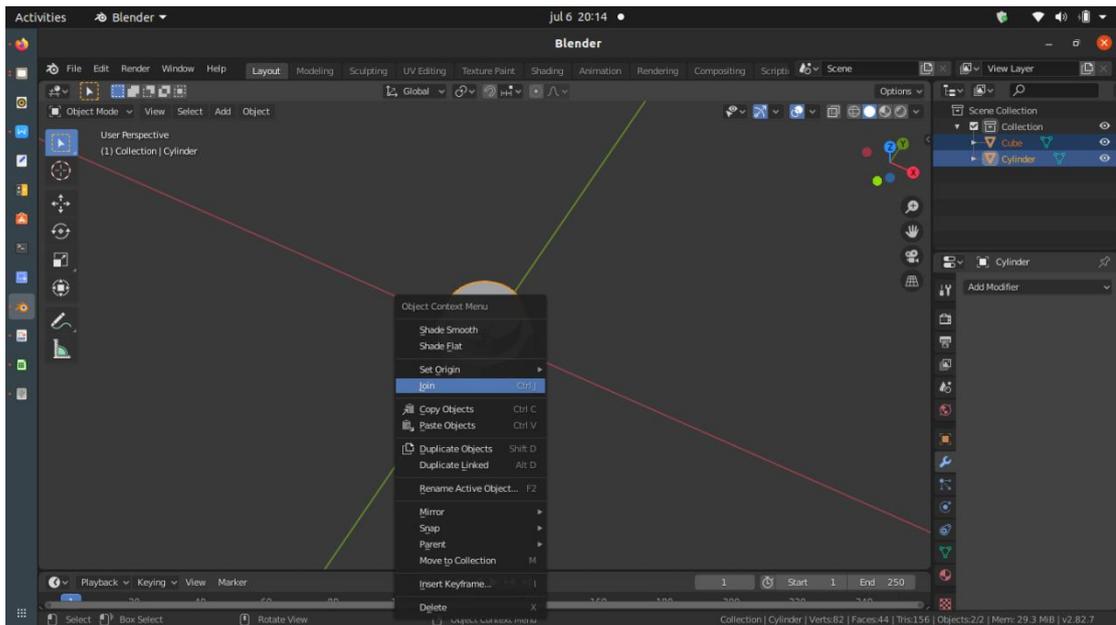
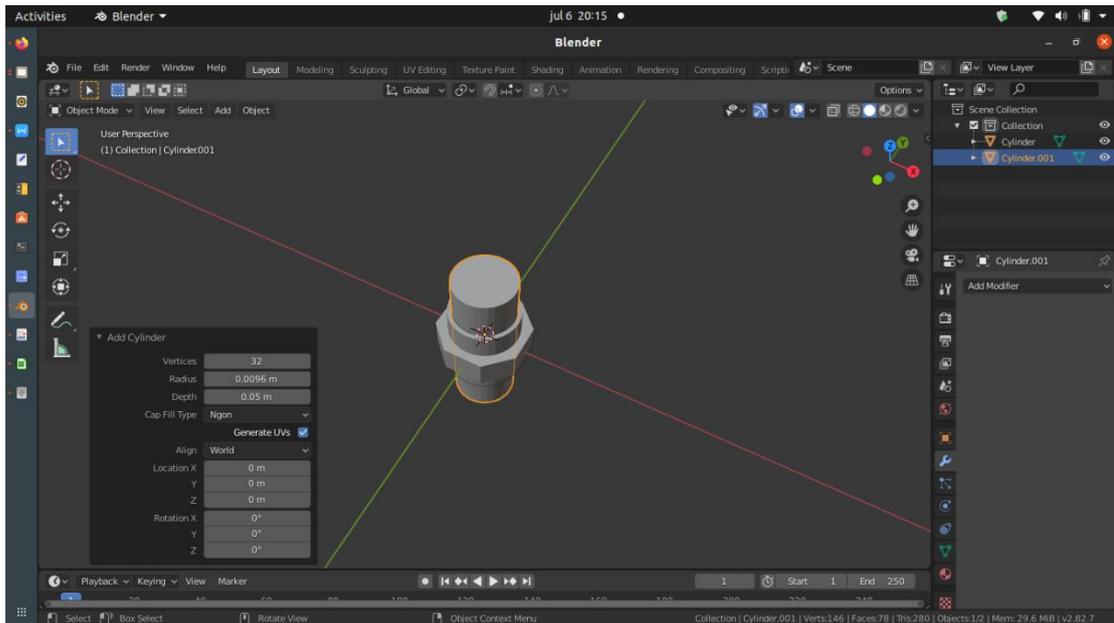


Figura 45 – Inclusão de novo cilindro para formação do “furo” no *Nipple*.



Repete-se então a mesma rotina da formação do octógono, ou seja, no modo de objeto seleciona-se a união do cilindro com o octógono, depois adiciona-se o modificador booleano, e é feita a diferença entre a figura da união com o novo cilindro, resultando na versão final do *Nipple* (Figura 46 e Figura 47).

Figura 46 – *Nipple* após a operação booleana de diferença.

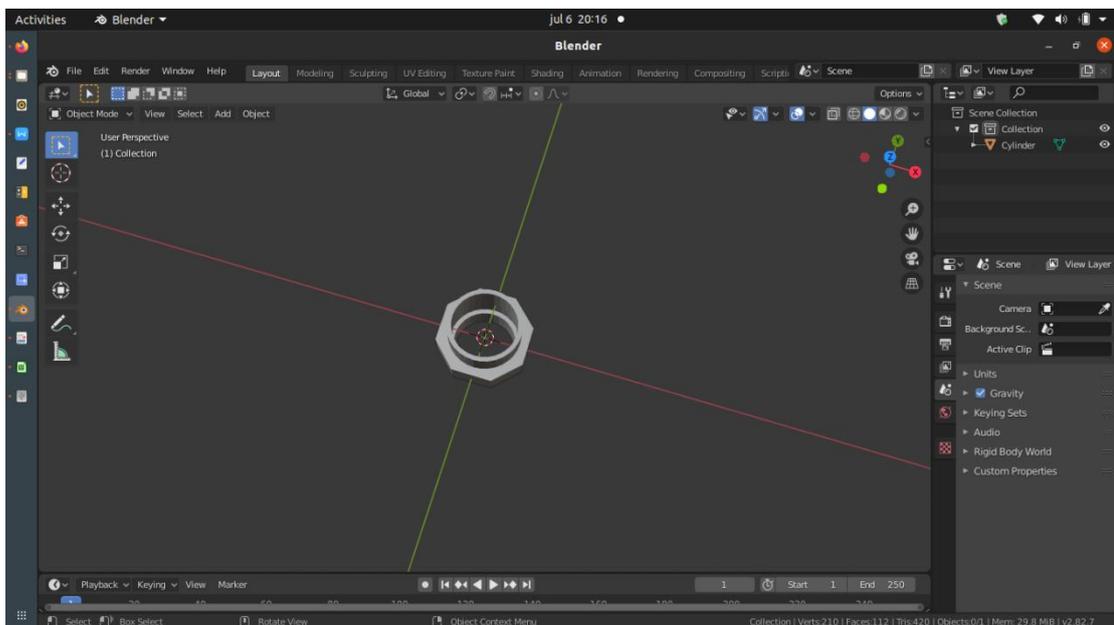
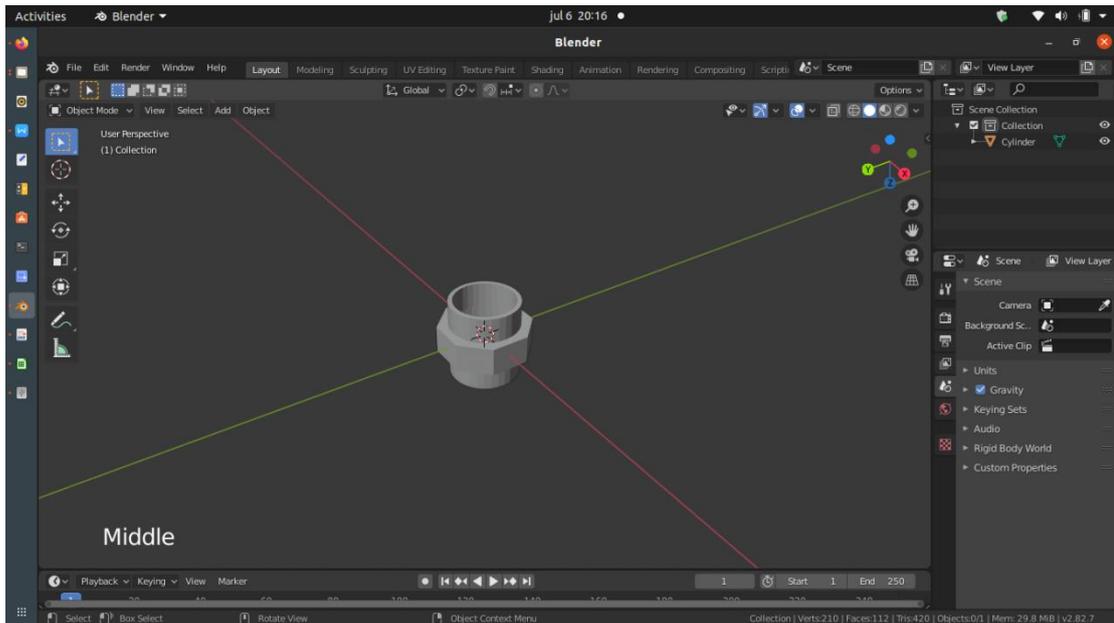


Figura 47 – Vista lateral do *Nipple*.



5.1.2 Visão 3D

Para a criação do carneiro hidráulico foram modeladas oito peças individualmente no Blender, posteriormente elas foram unidas em um único desenho (Figura 48 e Figura 49). As peças de maior complexidade para modelagem foram as válvulas de retenção e pé e crivo (Figura 50). Ambas apresentavam uma geometria diferente e possuíam elementos em seu interior que também tiveram de ser modelados.

Figura 48 – Vista lateral do carneiro.

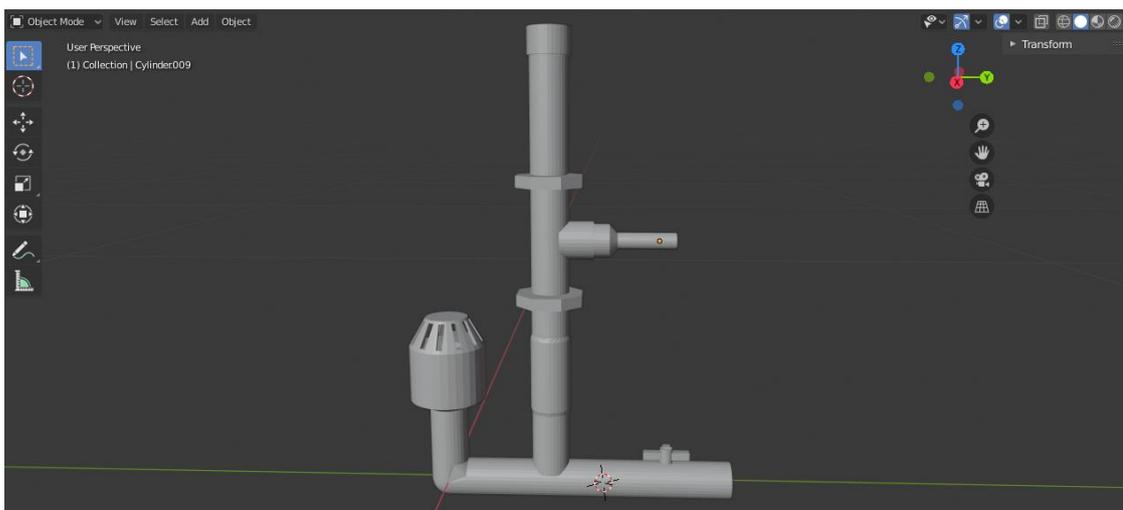


Figura 49 – Vista frontal carneiro.

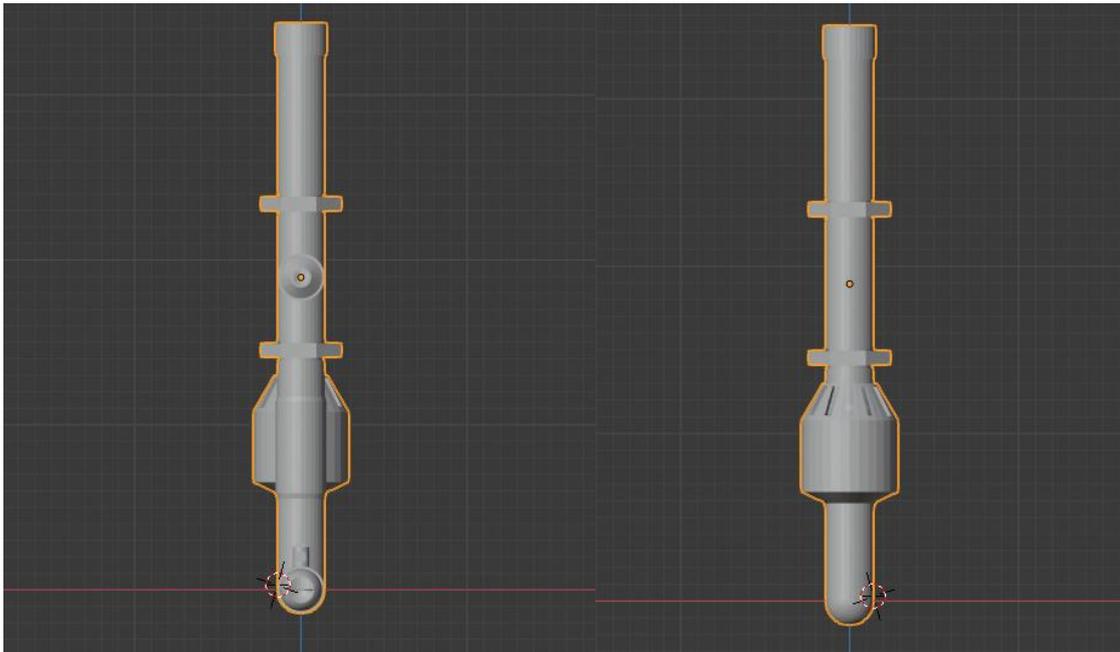
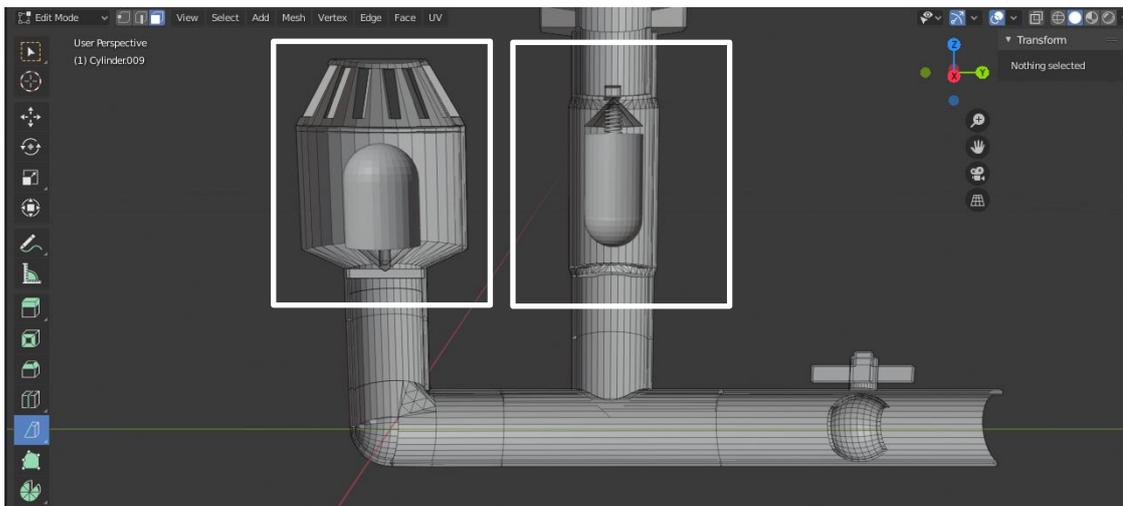
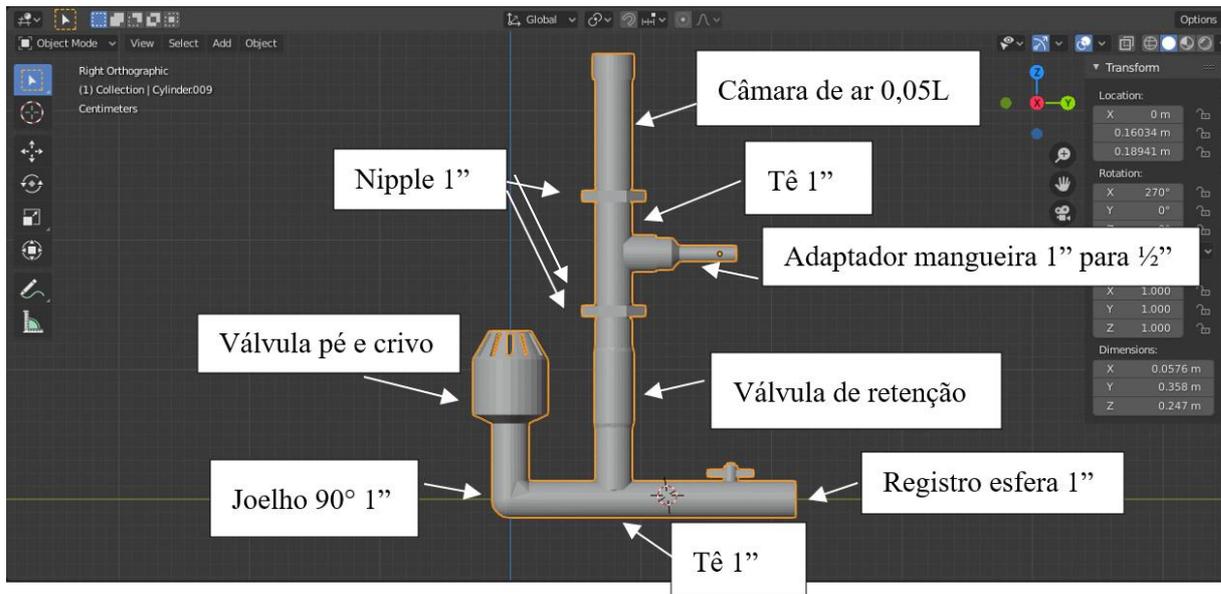


Figura 50 – Válvulas e suas estruturas internas diferenciadas.



A Figura 51 discretiza as oito peças do carneiro e suas respectivas localizações, além disso informa-se que todas as peças foram unidas utilizando a função *merge* do *Edit Mode*, dando a preferência para a opção de *merge at center*, por essa centralizar o nó na distância entre os nós de ambas as peças que serão unidas. Por fim, informa-se que em relação ao carneiro montado por Oliveira Junior *et al* (2021) houve alteração de uma peça, enquanto no carneiro modelado utilizou-se um *nipple* para ligação do Tê com a câmara de ar, Oliveira Junior *et al* (2021) usou um redutor (Figura 10 – item 9).

Figura 51 – Elementos do carneiro modelado.



Já a Figura 52 e a Figura 53 exibem a malha do desenho 3D do carneiro, evidencia-se a sua complexidade através do grande número de vértices, nós e faces, tal constatação também pode ser verificada no processo de montagem da malha para simulação no OpenFOAM, tal cenário será explicado no próximo item.

Figura 52 – Carneiro em corte com suas faces, internas e externas.

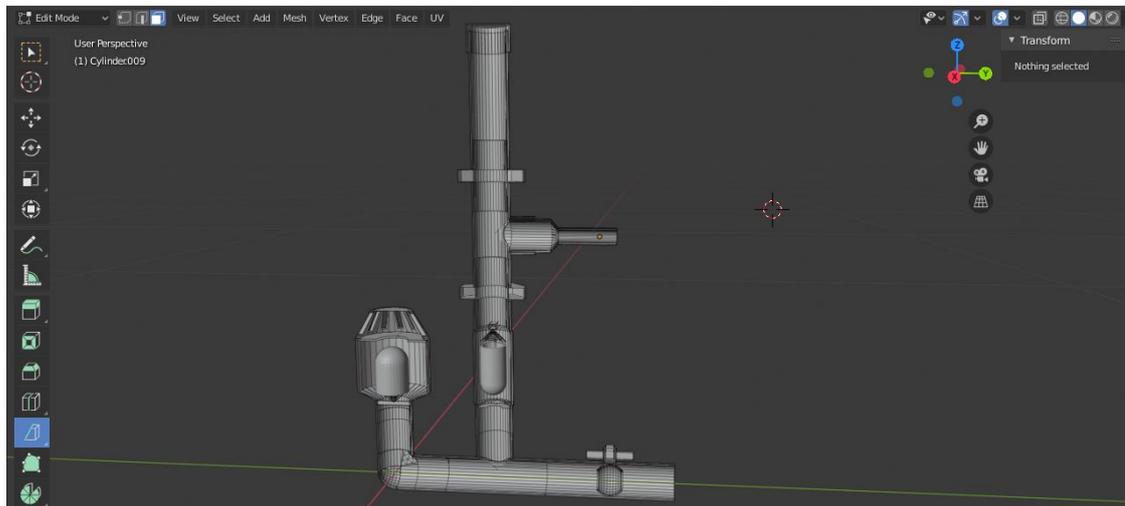
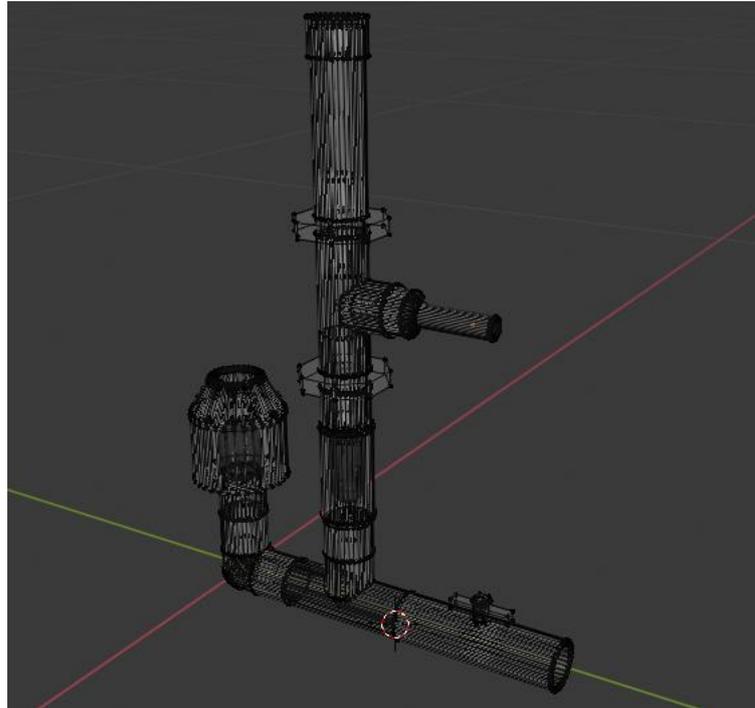


Figura 53 – Malha 3D do carneiro.

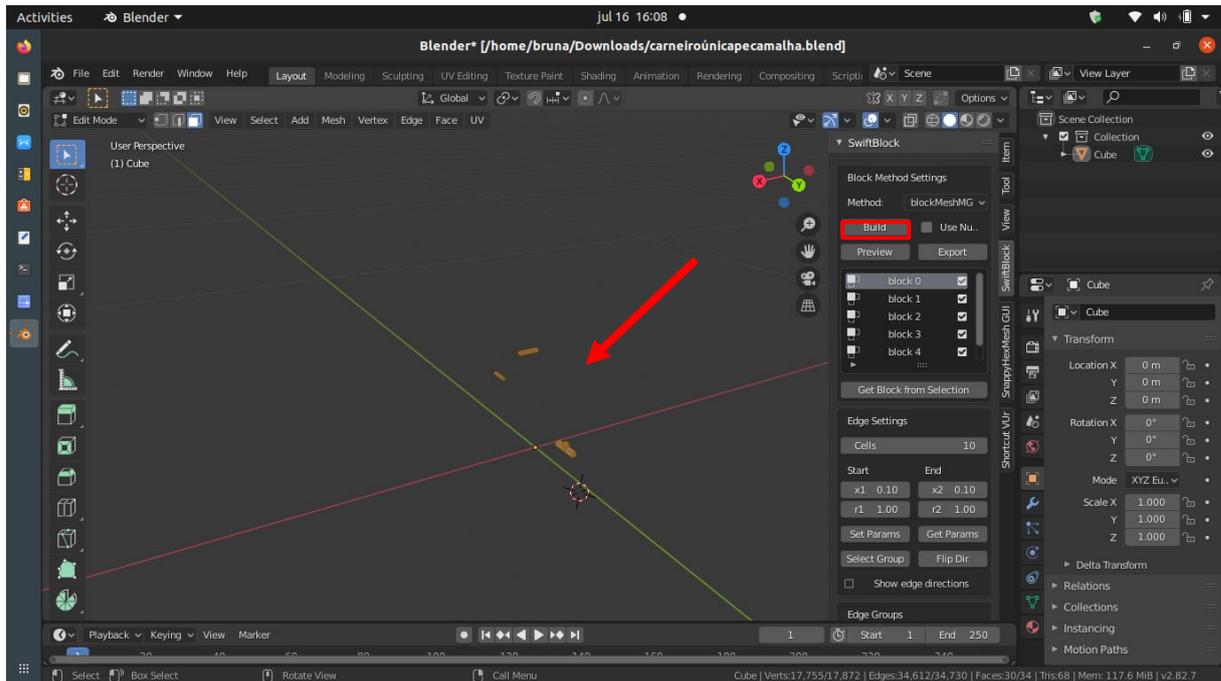


5.2 Modelagem da malha do Carneiro Hidráulico

Finalizada a modelagem 3D do carneiro, iniciou-se o processo de criação da malha para simulações no software OpenFOAM. Como a modelagem 3D foi feita junto ao software Blender, em um primeiro momento optou-se pela criação da malha nesse mesmo programa pela facilidade e principalmente para evitar o problema de interoperabilidade de formatos de arquivos. Para isso seriam utilizados o *SwiftBlock* ou o *SnappyHexMesh*.

Apesar do *SwiftBlock* e do *SnappyHexMesh* serem *add-ons* nativos ao Blender para a criação de malhas, observou-se que no caso do carneiro modelado, devido a sua complexidade, ambos apresentaram problemas na hora da renderização. No caso da utilização do *SwiftBlock*, além da demora para renderização (*build*) do *preview* da malha, o *add-on* não conseguia realizar a leitura dos elementos curvos, ou seja, após o tempo de espera somente alguns elementos retangulares foram convertidos em blocos para a malha (Figura 54).

Figura 54 – Elementos que viraram blocos após a execução do *SwiftBlock*.



Verificado esse problema, foi buscado outro *add-on* mais recente para a construção da malha, com isso, graças a grande comunidade existente para os softwares livres, encontrou-se o *SnappyHeshMesh*, esse *add-on* apresenta configurações mais interessantes para construção da malha e funciona muito bem quando da utilização para peças mais simples, entretanto quando tentava-se abrir a *view* para criação da malha do carneiro no Blender o programa congelava e após alguns segundos fechava.

Com tal cenário, optou-se então para a construção da malha em um outro software livre, o Gmsh. Esse programa foi escolhido por ser gratuito e por aceitar arquivos no formato *.stl*, o Blender exporta arquivos para o formato *.stl* sem perda de qualidade e detalhes.

5.2.1 Malha Gmsh

Para a importação do arquivo referente ao modelo 3D do carneiro, primeiro foi realizada a exportação do arquivo original no formato *.blender* para o formato *.stl*. Em seguida executou-se o Gmsh e por fim abriu-se o arquivo *.stl*, referente ao modelo do carneiro. A Figura 55 apresenta como estava o modelo na primeira abertura do desenho, analisou-se então como estavam elementos críticos (Figura 56), que exigiram uma maior atenção para modelagem no Blender, como as válvulas (pé crivo e retenção) e o registro de esfera.

Notou-se que esses acessórios continuavam com sua configuração completa, entretanto, como pode ser visto pela Figura 57, a malha estava pouco refinada, existiam muitas áreas

vazias. De acordo com Sadreghighi (2020) quando se trata de parâmetros de malha, espaçamento em torno de extremidades principais, bons fatores de ortogonalidade e assimetria, variação suave de espaçamento e um número razoável de nós geram resultados melhores. Portanto era necessário diminuir os espaçamentos, suavizar as curvas e aumentar o número de nós, para tal existe uma função nativa do Gmsh o *Refine by splitting* (Figura 58).

Figura 55 – Carneiro após primeira importação para o Gmsh.

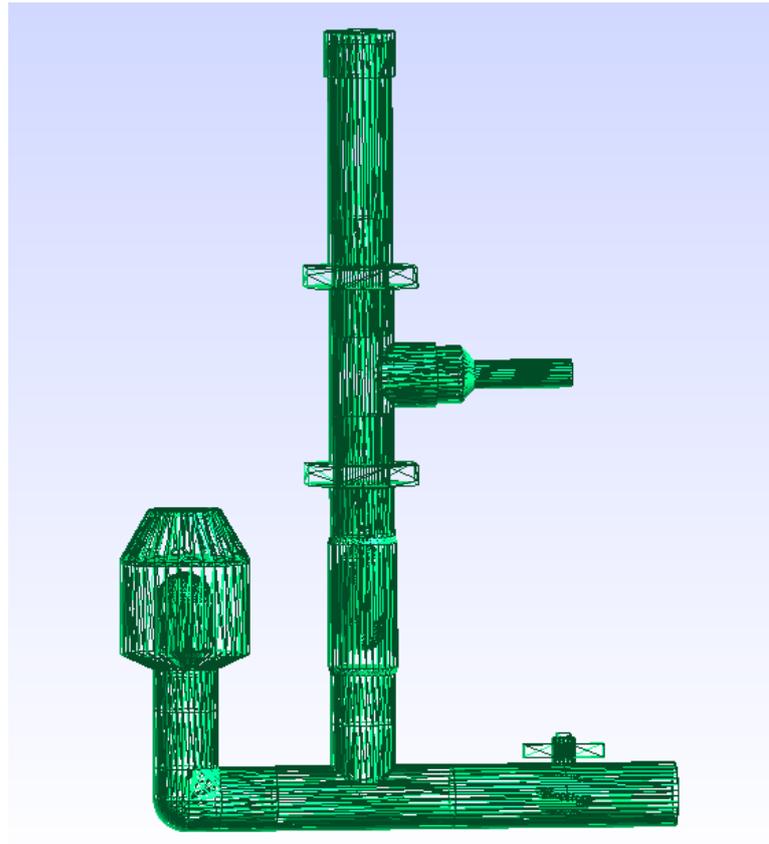


Figura 56 – Detalhe das peças mais críticas: válvulas e registro.

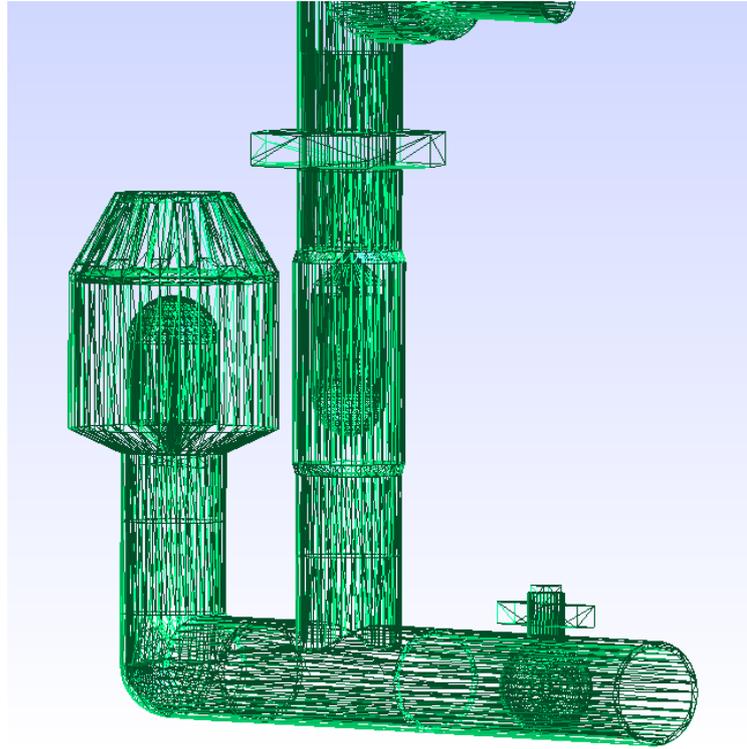
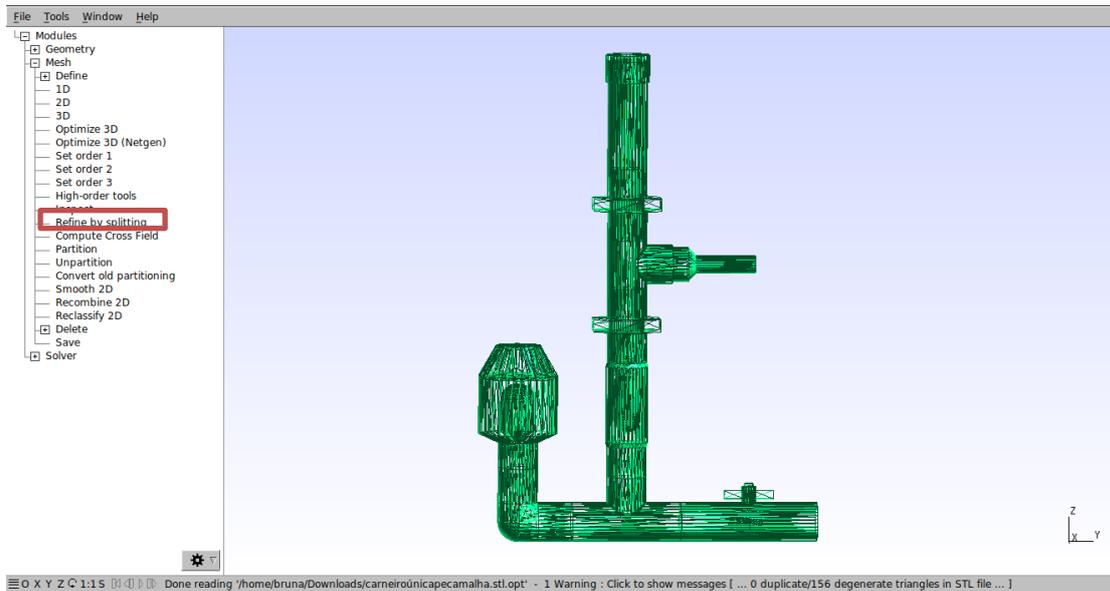


Figura 57 – A malha se encontrava com poucos nós e grandes espaços.



Figura 58 – Função utilizada para refinamento da malha.



Estabelecida a necessidade do refinamento da malha do carneiro, a função foi aplicada, contudo após a finalização do processo, verificou-se que a malha ainda apresentava consideráveis espaços vazios. Portanto optou-se por executar novamente a função, depois dessa segunda execução a malha já não apresentava muitos espaços vazios e possuía uma maior quantidade de nós (Figura 59), decidiu-se então não executar mais a função. Essa inspeção foi apenas visual contudo, destaca-se que, dependendo dos resultados obtidos futuramente na simulação, ou seja, analisando-se o resultado do residual inicial (*initial residual*) ao fim de todas as interações, pode ser que a malha tenha que ser ainda mais refinada, ou seja, a função poderá ser aplicada mais vezes. A Figura 60 mostra a malha do carneiro em sua forma “final”, enquanto a Figura 61, Figura 62, Figura 63, Figura 64 e Figura 65 apresentam detalhes de peças importantes. Já a Figura 66 mostra como ficou a malha ao fim do processo.

Figura 59 – Carneiro após duas aplicações da função *Refine by splitting*.

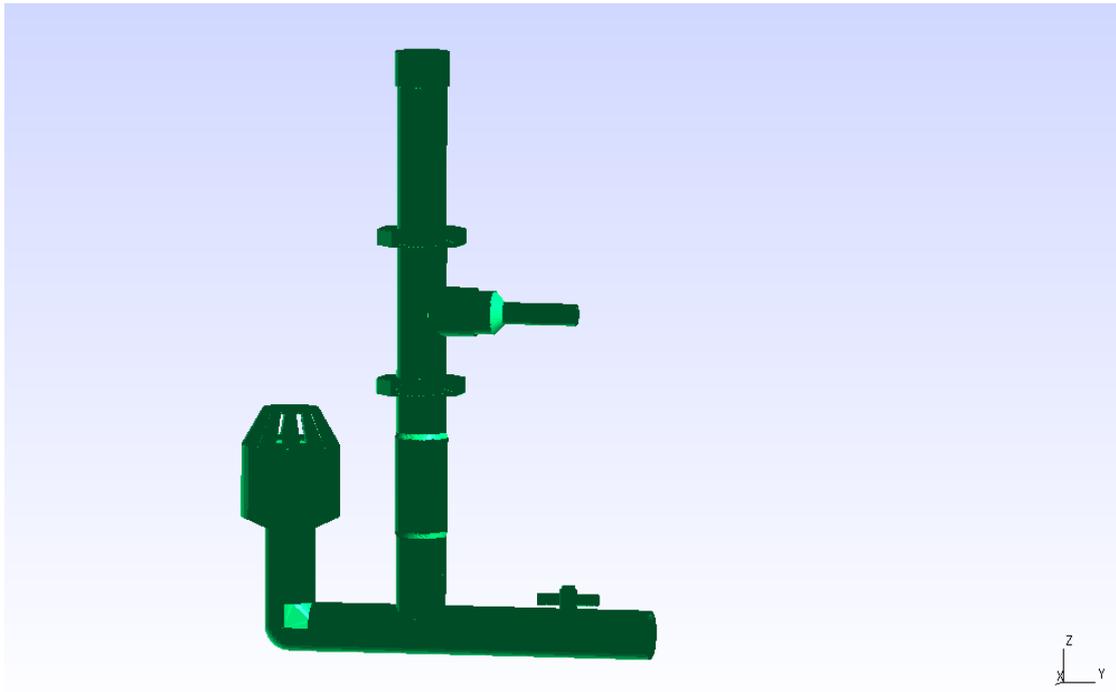


Figura 60 – Vista geral da malha do carneiro.

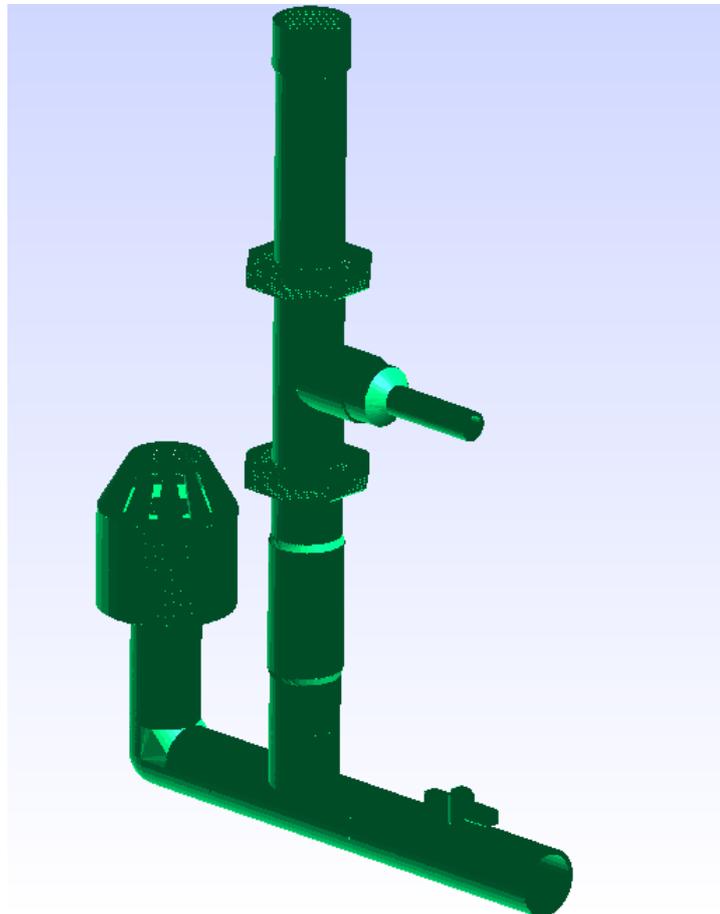


Figura 61 – Detalhes da válvula pé e crivo.

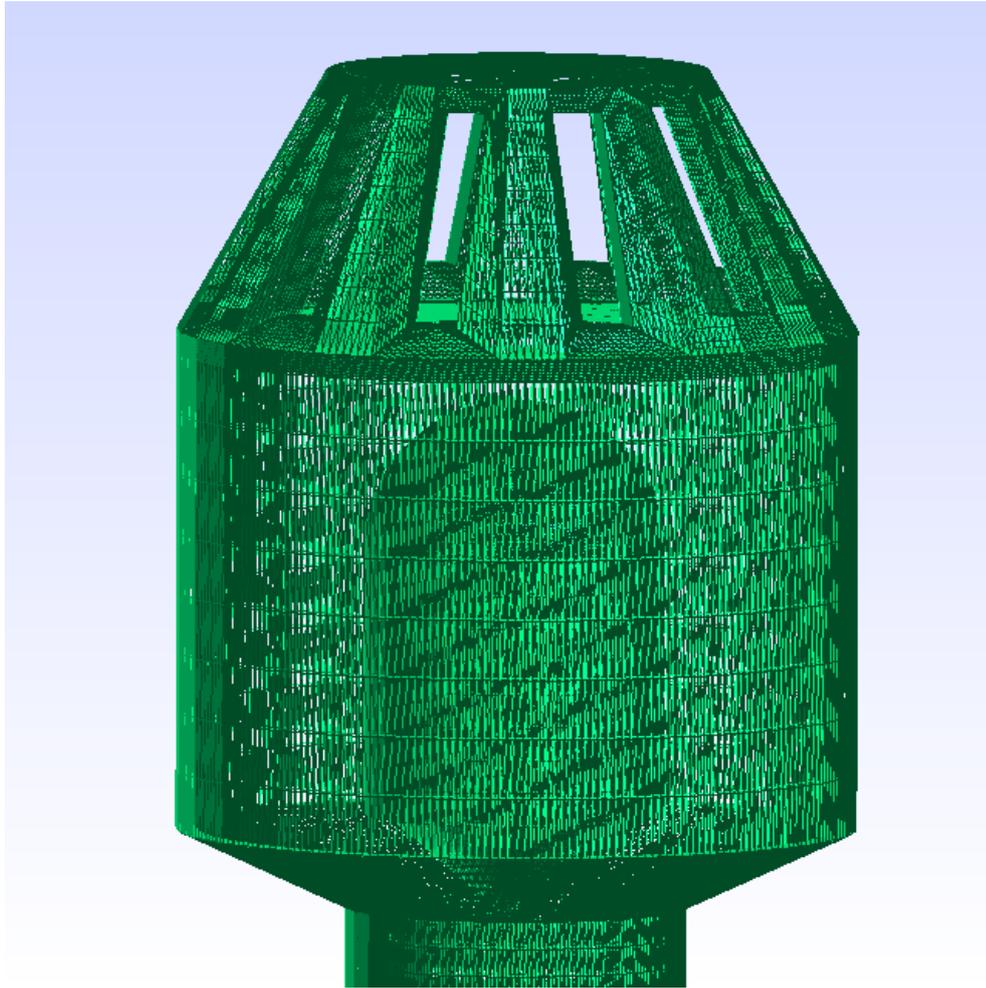


Figura 62 – Detalhes do registro de esfera, tê e joelho.

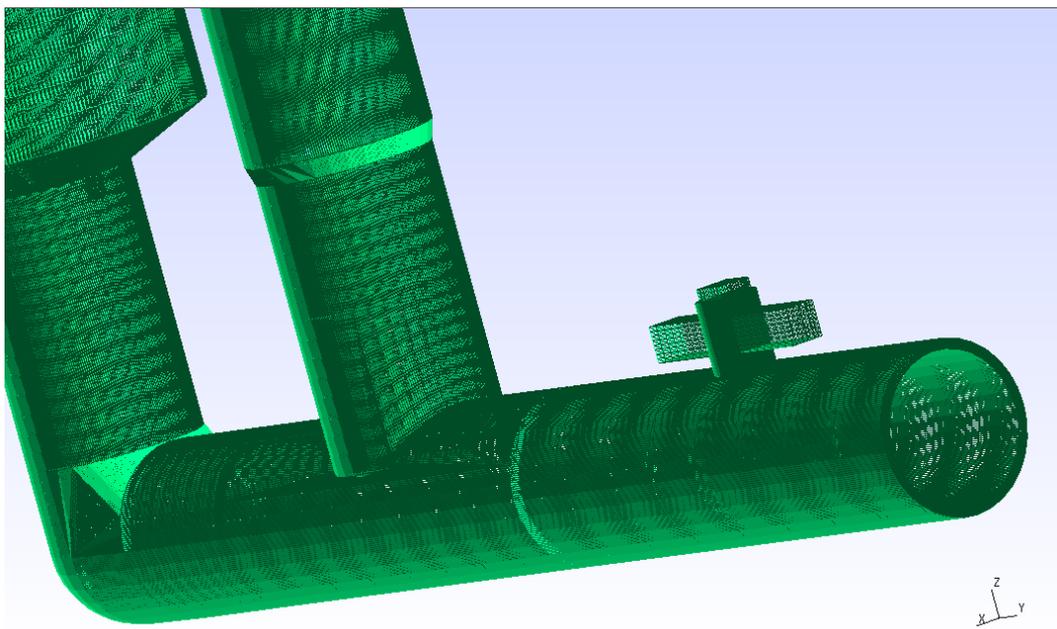


Figura 63 – Detalhes do adaptador de mangueira.

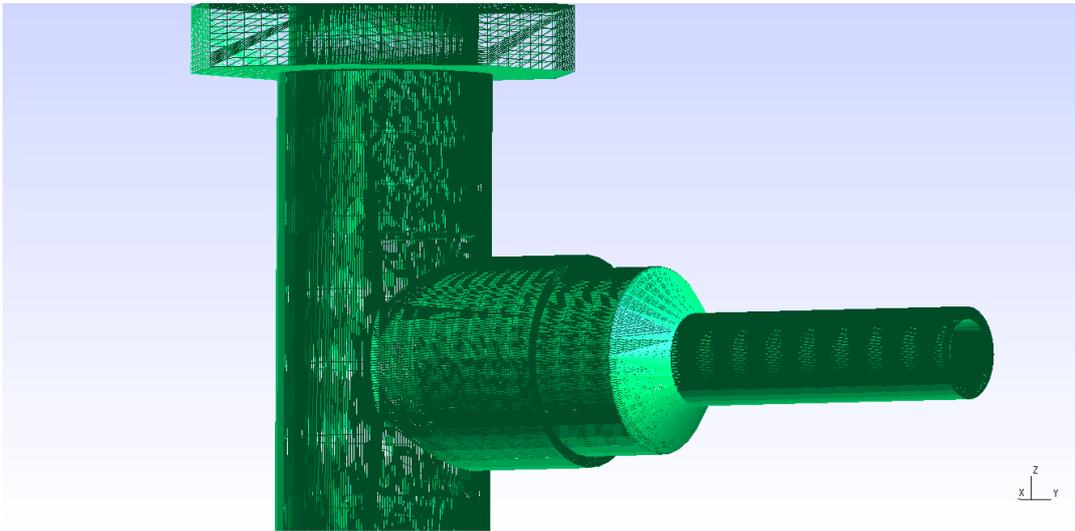


Figura 64 – Detalhes da câmara de ar.

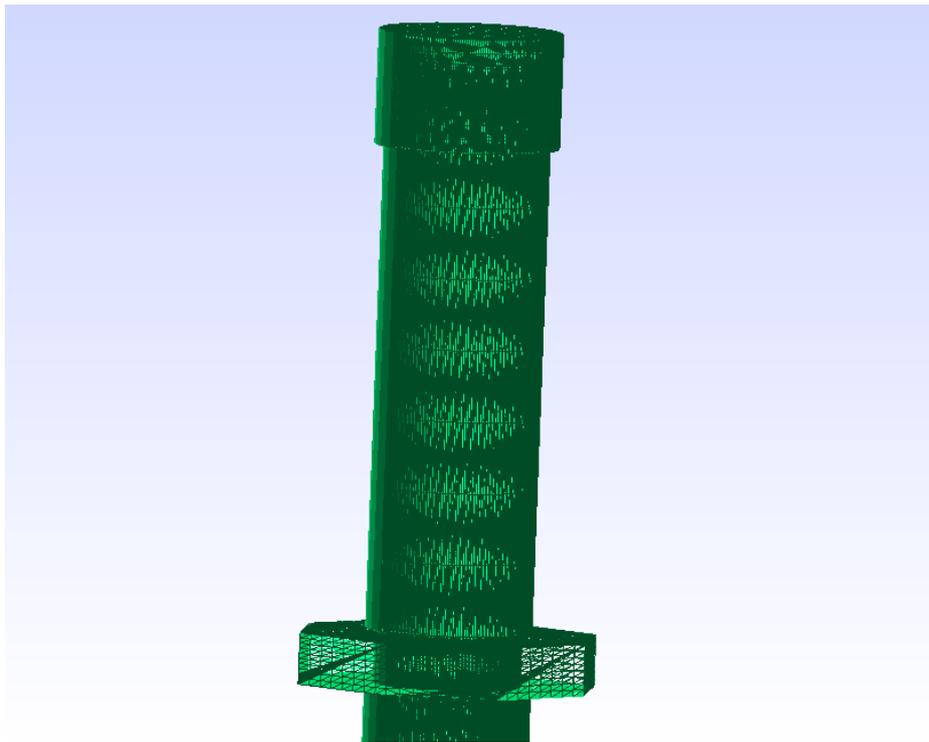


Figura 65 – Detalhe das válvulas.

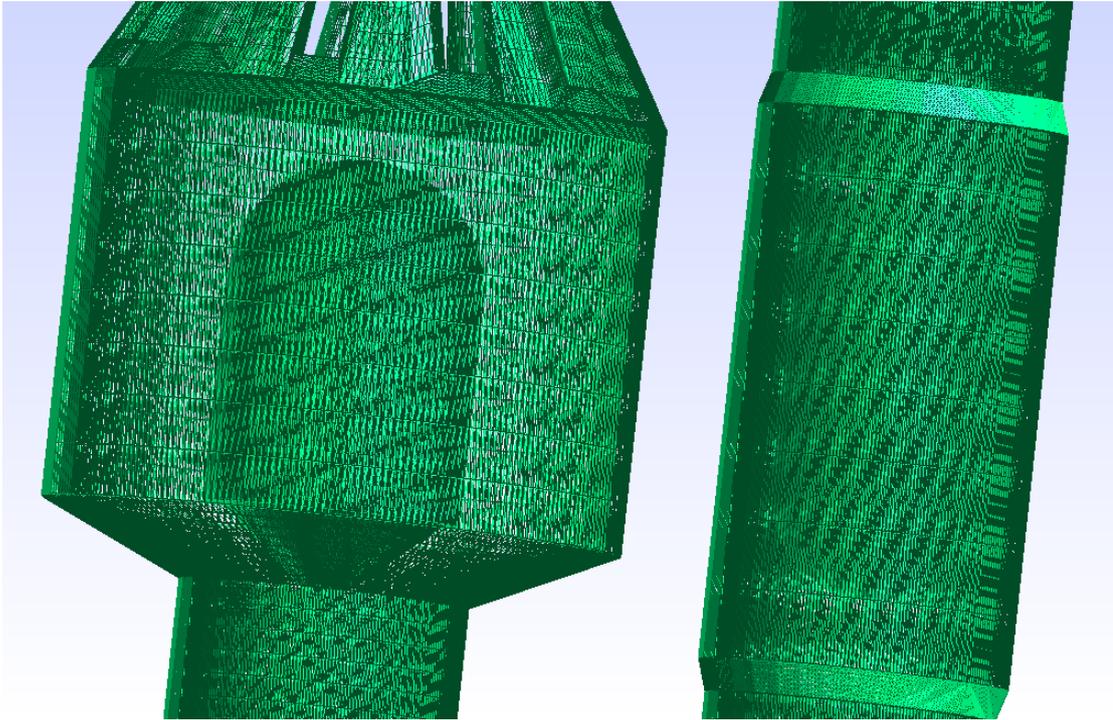
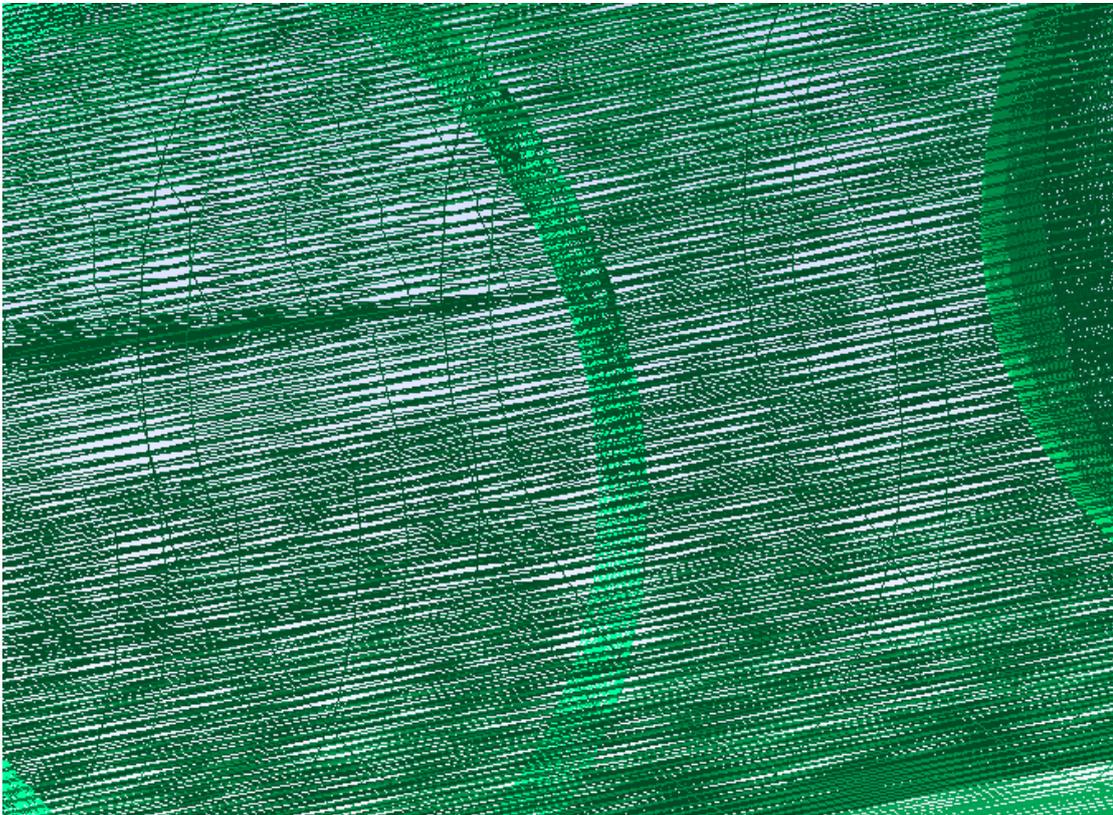


Figura 66 – Malha após o refinamento, reduziram-se os espaços e aumentaram a quantidade de nós.



Como último passo, houve a exportação do arquivo para o formato .msh, esse é o formato compatível com o OpenFOAM, para execução da função *blockMesh* (Figura 67). Destaca-se o arquivo .msh da malha, Figura 68, devido ao grande detalhamento da malha fornecido pelo Gmsh o documento apresenta mais de 4 milhões de linhas, resultado muito difícil de ser obtido de forma manual, mostrando a importância do uso de *softwares*.

Figura 67 – Processo de exportação da malha em um arquivo .msh.

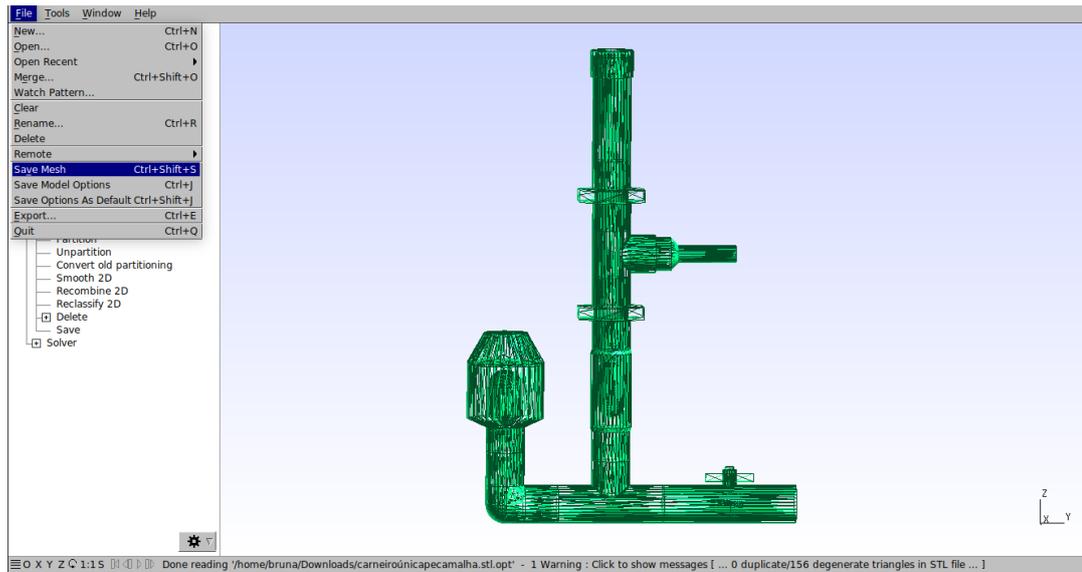
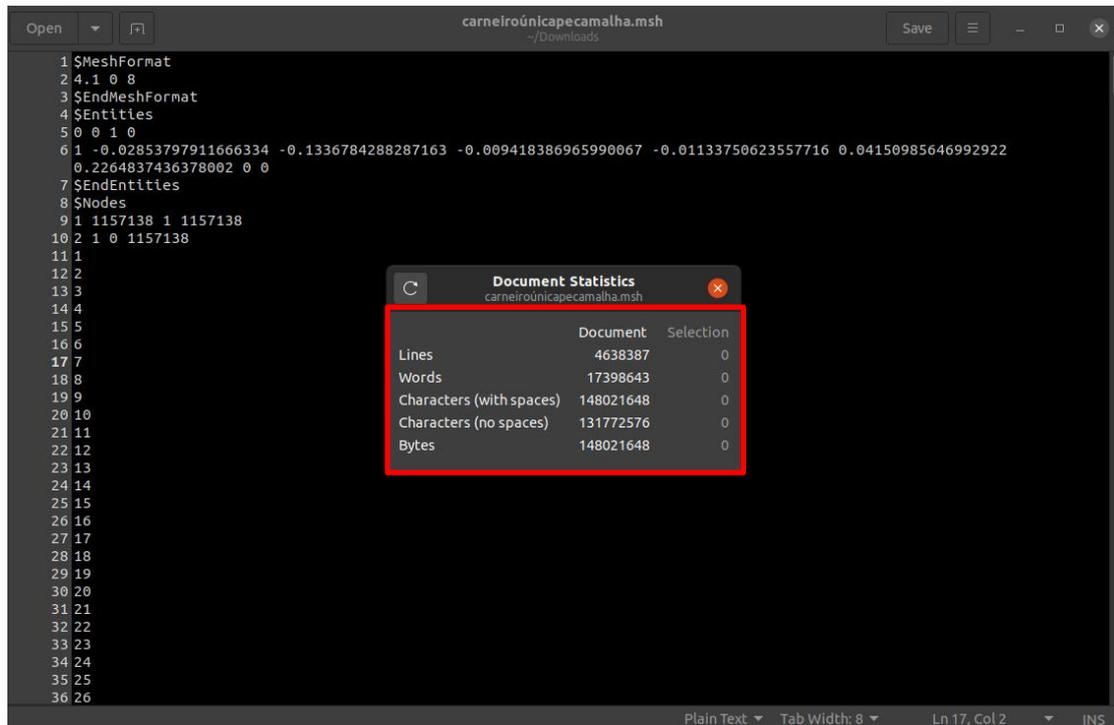


Figura 68 – Propriedades do arquivo .msh da malha.



5.2.3 Adaptações da Malha

A partir do modelo 3D gerado, iniciou-se uma nova etapa do desenvolvimento do trabalho, a adaptação da malha aos regimes hidráulicos existentes no OpenFOAM. O software de simulação do comportamento de fluidos apresenta uma série de categorias e entre elas, aquela que melhor se adapta ao que é observado em carneiros hidráulicos, é o que deve ser adotado.

Mas antes de realizar a simulação do comportamento do fluido dentro do carneiro é essencial possuir uma malha compatível e que represente como será o escoamento. Para isso é necessário utilizar uma combinação de comandos no terminal para gerar o diretório da malha e em seguida estabelecer propriedades dos fluidos como velocidade, vazão, pressão, massa específica, entre outros.

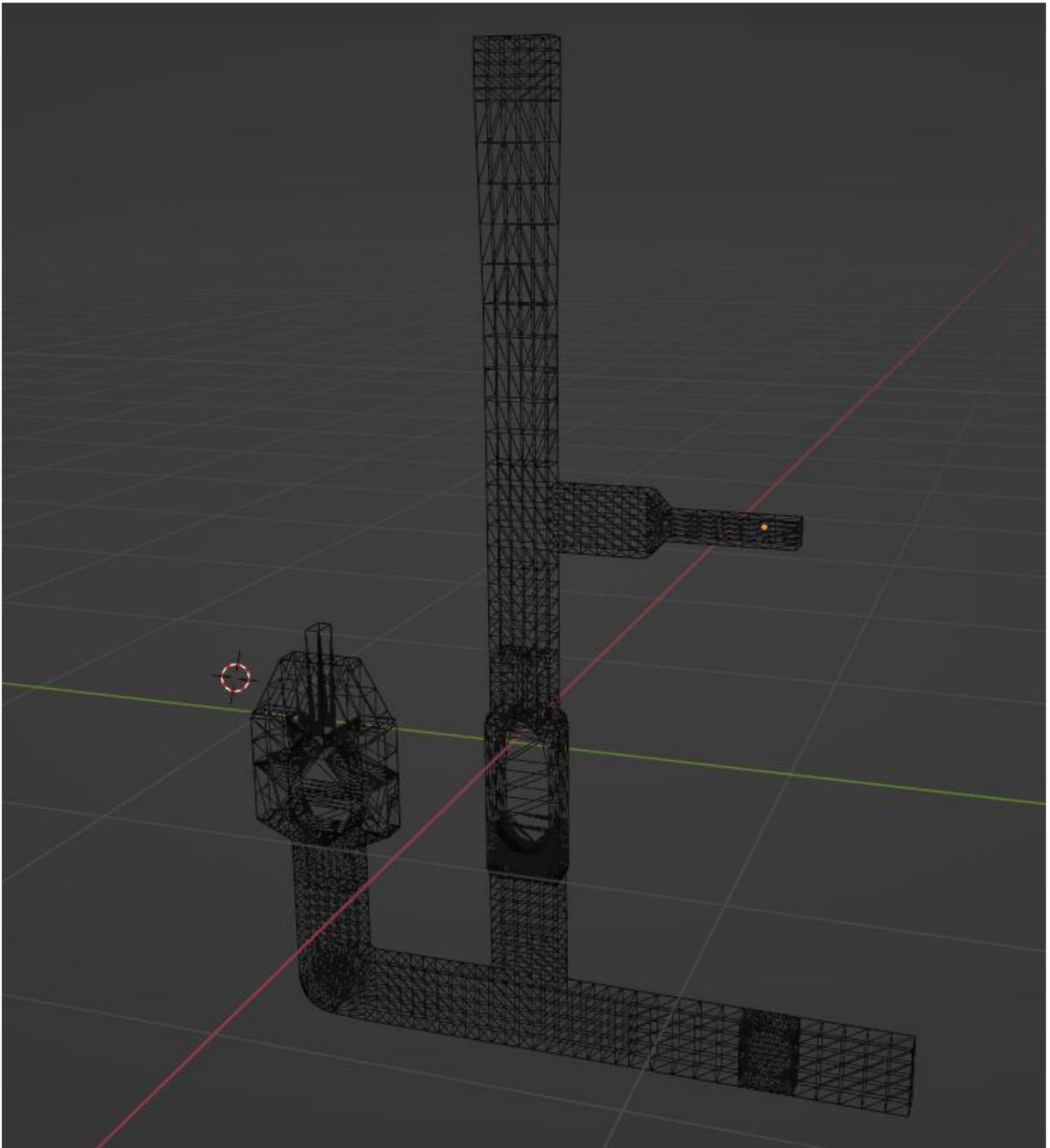
Entretanto após a execução no terminal dos comandos, recomenda-se visualizar se houve alguma mudança expressiva. Para isso se utiliza o ParaView, que é um software de visualização 3D que permite visualizar, renderizar, simular e analisar dados do modelo.

Os comandos que devem ser executados para gerar o diretório são em sua ordem *surfaceFeatures*, *blockMesh* e *snappyHexMesh*, esses têm como objetivo:

1. *surfaceFeatures*: identifica e cria características de superfície.
2. *blockMesh*: cria a malha de blocos estruturados necessária para simular fluxos em uma geometria específica.
3. *snappyHexMesh*: gera malhas refinadas, principalmente malhas hexagonais, ao redor de geometrias complexas tridimensionais.

Tendo em vista o princípio de Pascal, que diz: "Quando há um aumento na pressão em um fluido confinado, esse aumento de pressão é transmitido de maneira igual em todas as direções no fluido, sem diminuição na intensidade.", o modelo apresentado pela Figura 49 e para uma melhor visualização do que ocorre dentro do carneiro, decidiu-se fazer um corte central na malha e pegar uma pequena seção dela. Também foi adicionado um parafuso acima da válvula de pé e crivo, responsável por controlar a quantidade de água que entra no sistema, como apresentado na Figura 69.

Figura 69 – Malha após corte central.



Além disso, houve uma separação em diferentes camadas dos elementos constituintes do carneiro, eles foram divididos em parede (*wall*), entrada (*inlet*), saída (*outlet*), pé e crivo (*footvalve*) e malha2D (*mesh2D*). Isso foi feito, pois, posteriormente, quando da simulação do fluxo, para estabelecer as propriedades físicas dos constituintes, é essencial diferenciá-los de acordo com suas características e no OpenFOAM isso é possível por meio da nomenclatura dos constituintes da malha (Figura 70, Figura 71, Figura 72, Figura 73 e Figura 74).

Figura 70 – Delimitação elemento *outlet* (saída).

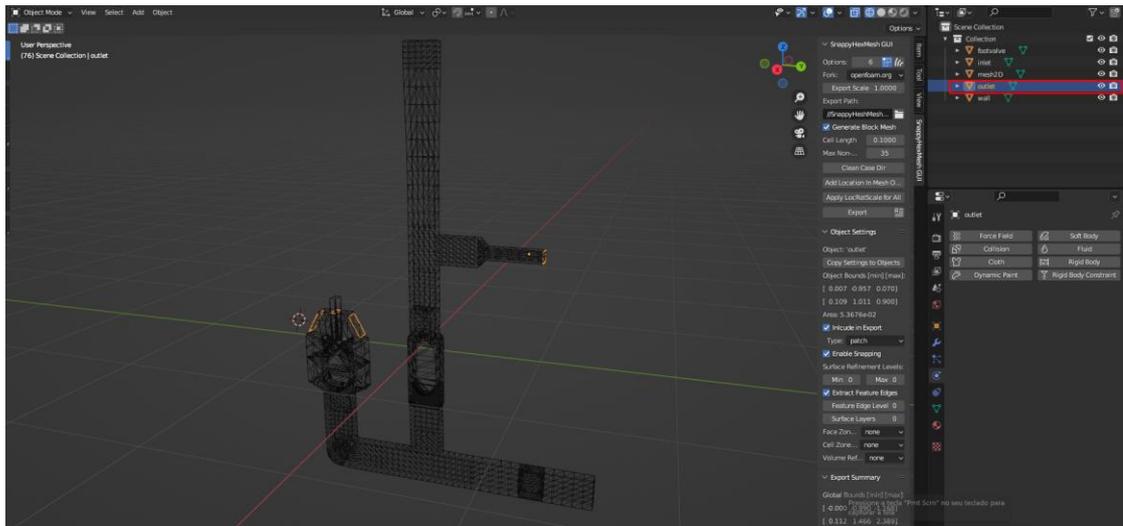


Figura 71 – Delimitação elemento *wall* (parede).

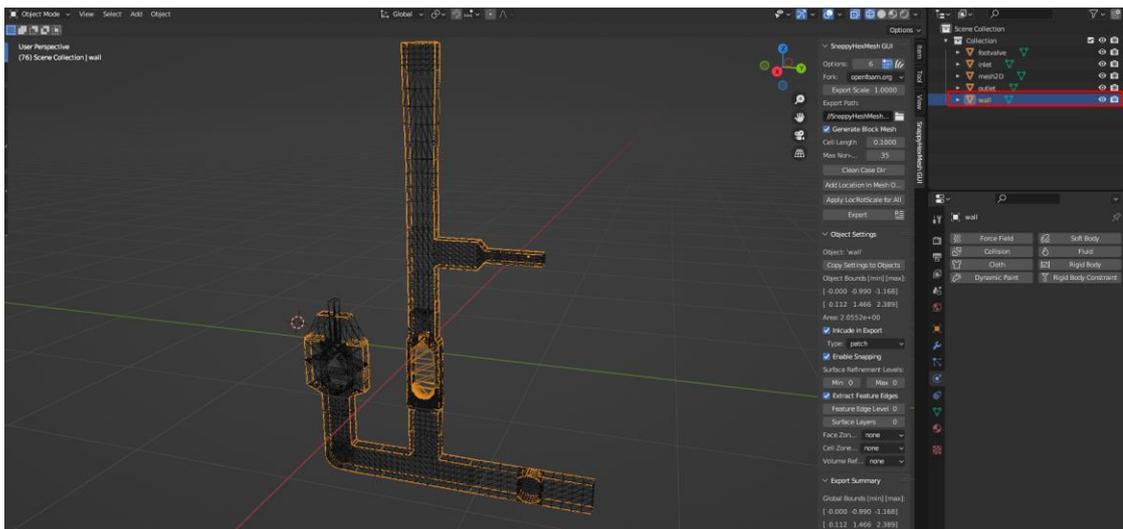


Figura 72 - Delimitação elemento *inlet* (entrada).

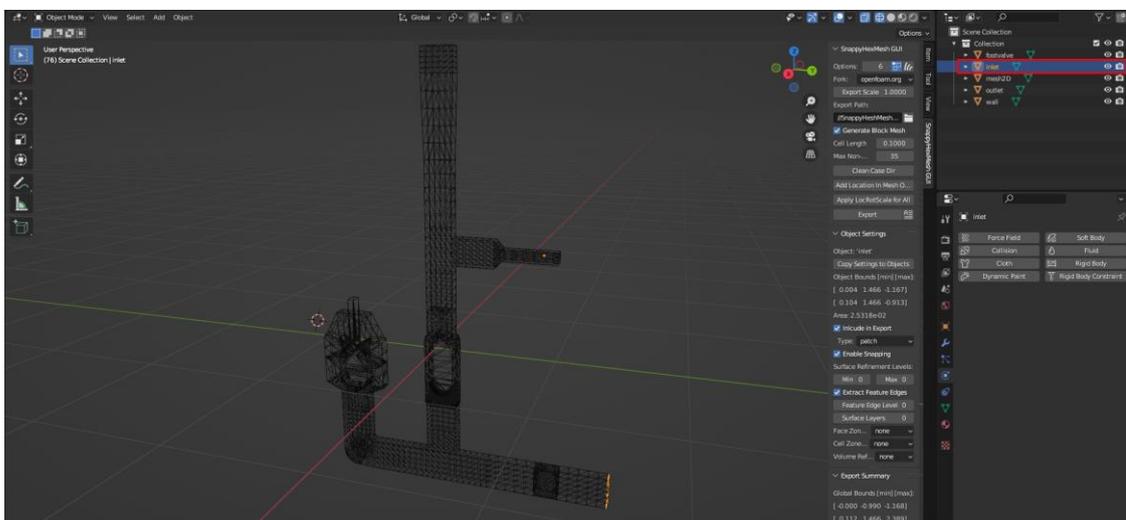


Figura 73 – Delimitação elemento *footvalve* (válvula pé e crivo).

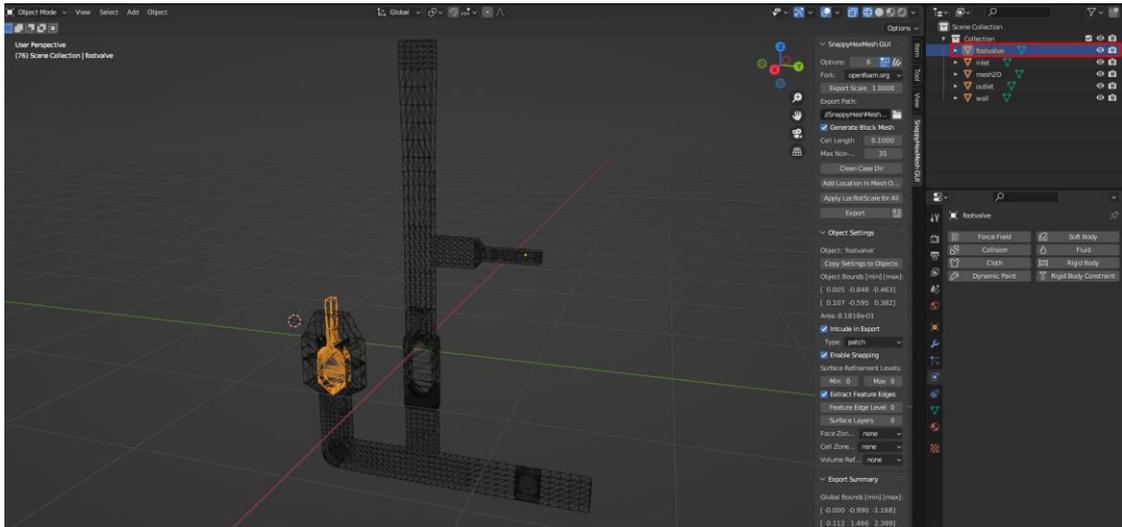
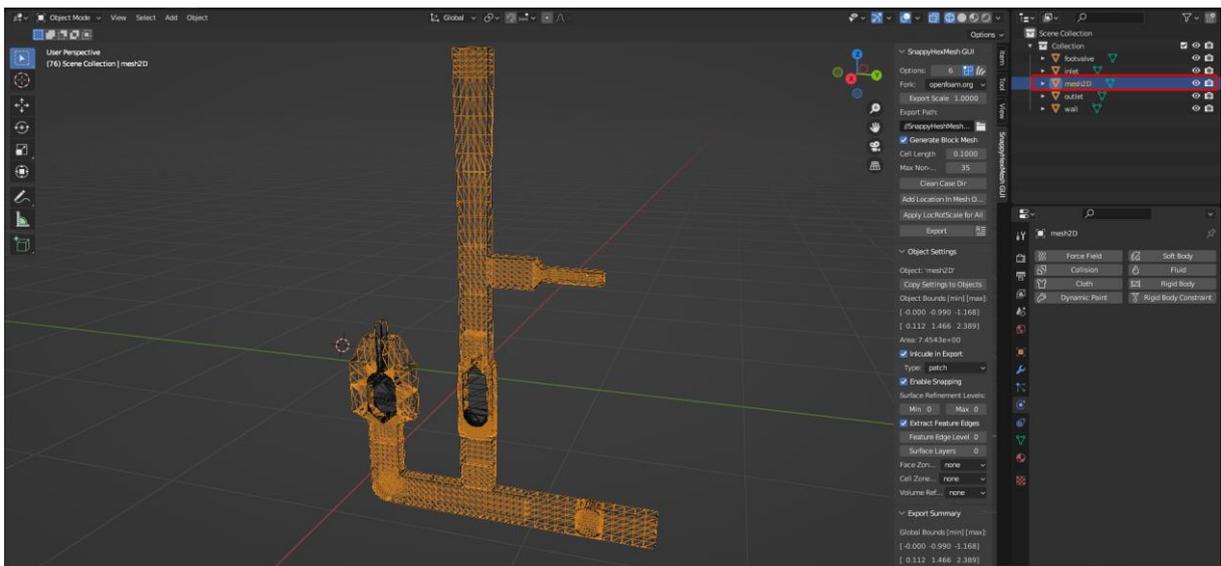
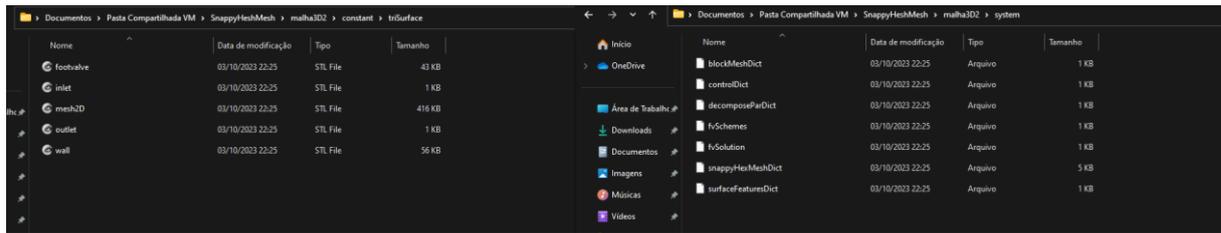


Figura 74 – Delimitação elemento mesh2D (malha 2D).



Após as modificações apontadas, e consequentemente com a menor complexidade alcançada pela malha e com a utilização de uma nova máquina com melhores especificações técnicas (Processador Intel(R) Core (TM) i7-10750H CPU @ 2.60GHz 2.59 GHz e 32gb de ram) foi possível executar o *addon SnappyHexMesh* apontado no item 5.2 do presente trabalho. E esse *addon* gerou um conjunto de arquivos necessários (Figura 75) para gerar a malha no OpenFOAM.

Figura 75 – Diretórios criados a partir do addon *SnappyHexMesh*.



Com isso, foram executados os comandos informados anteriormente no terminal (*surfaceFeatures*, *blockMesh* e *snappyHexMesh*), entretanto ao conferir a integridade da malha gerada após esses comandos (Figura 76) no ParaView notou-se a ausência de uma parte da parede inferior do carneiro (Figura 77).

Figura 76 – Malha gerada no ParaView após comandos.

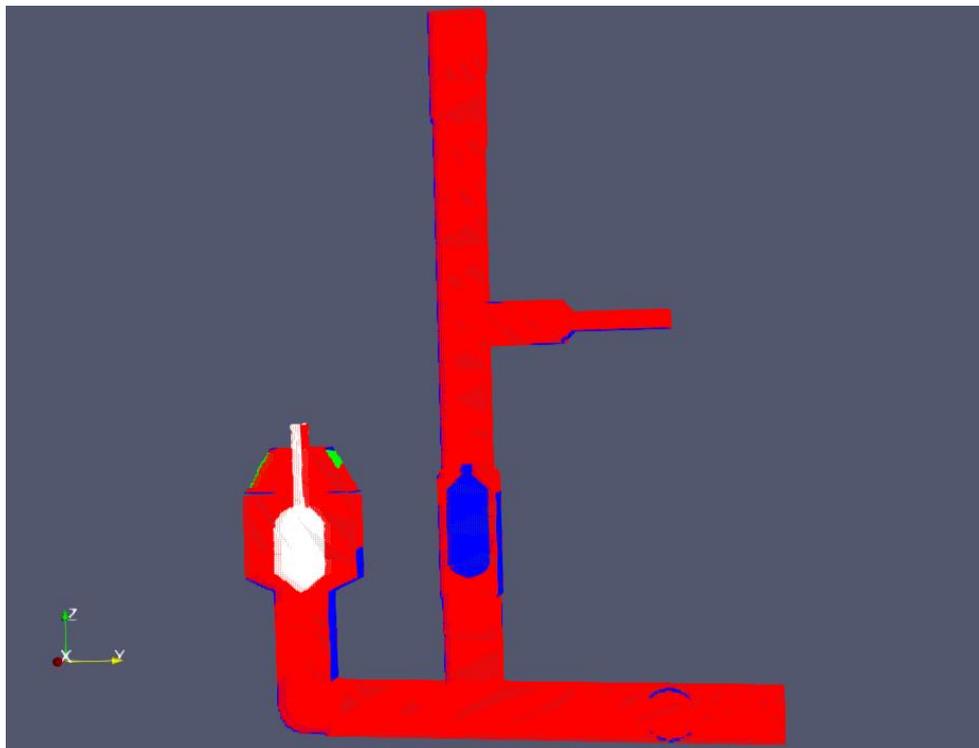
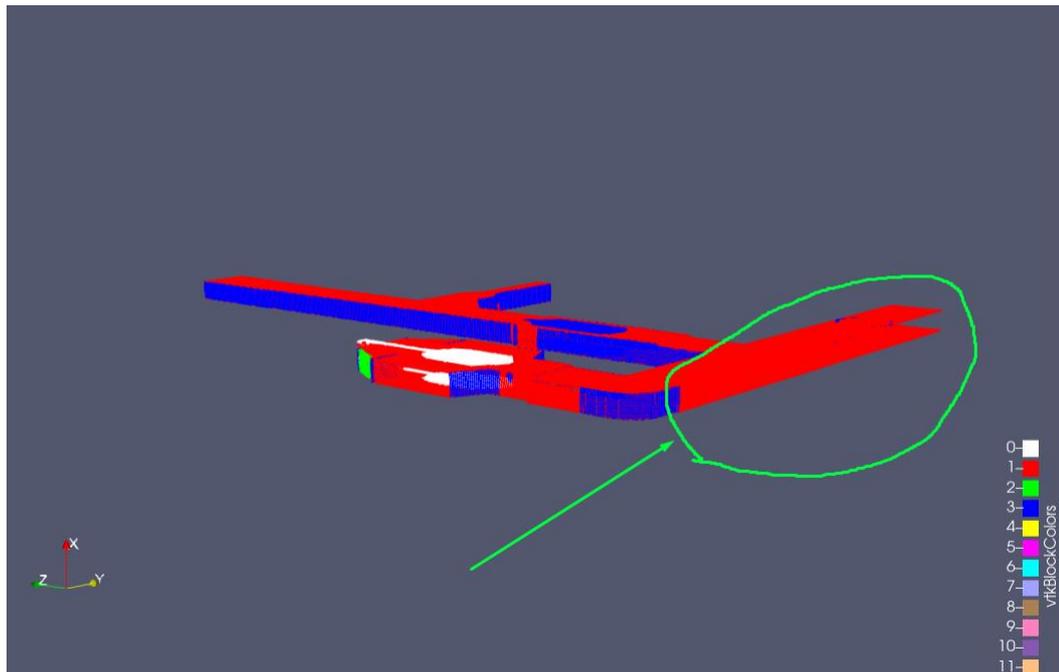


Figura 77 – Ausência da parede inferior.



Logo surgiram algumas hipóteses para correção desses problemas:

1. Problemas na Definição da Geometria: a definição da geometria no arquivo STL ou no arquivo de entrada está incorreta. Hipótese que foi descartada após uma análise do arquivo stl no ParaView e no Gmsh (Figura 78 e Figura 79).

Figura 78 – Malha no formato *.stl* no Gmsh.

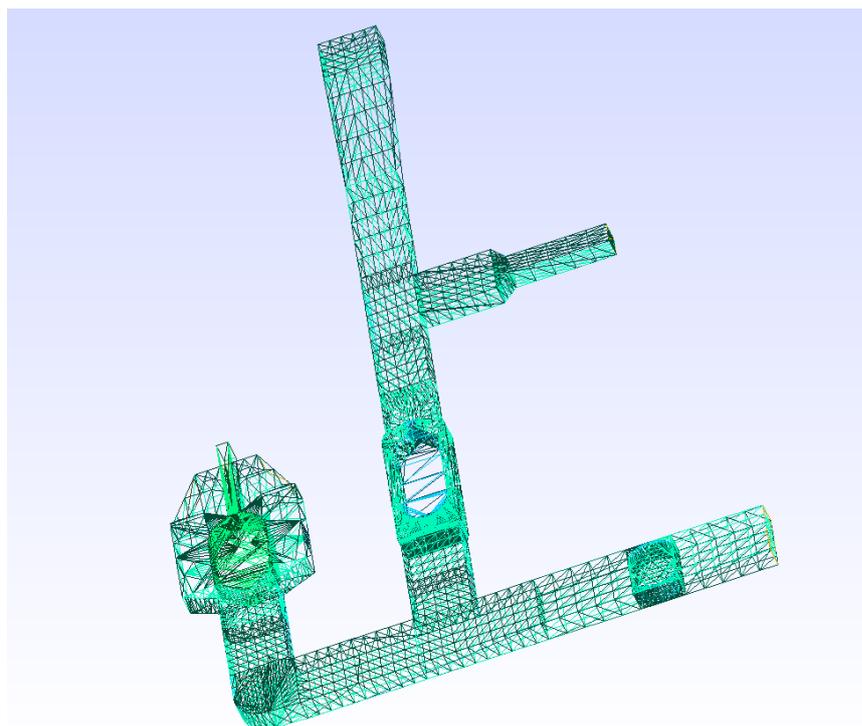
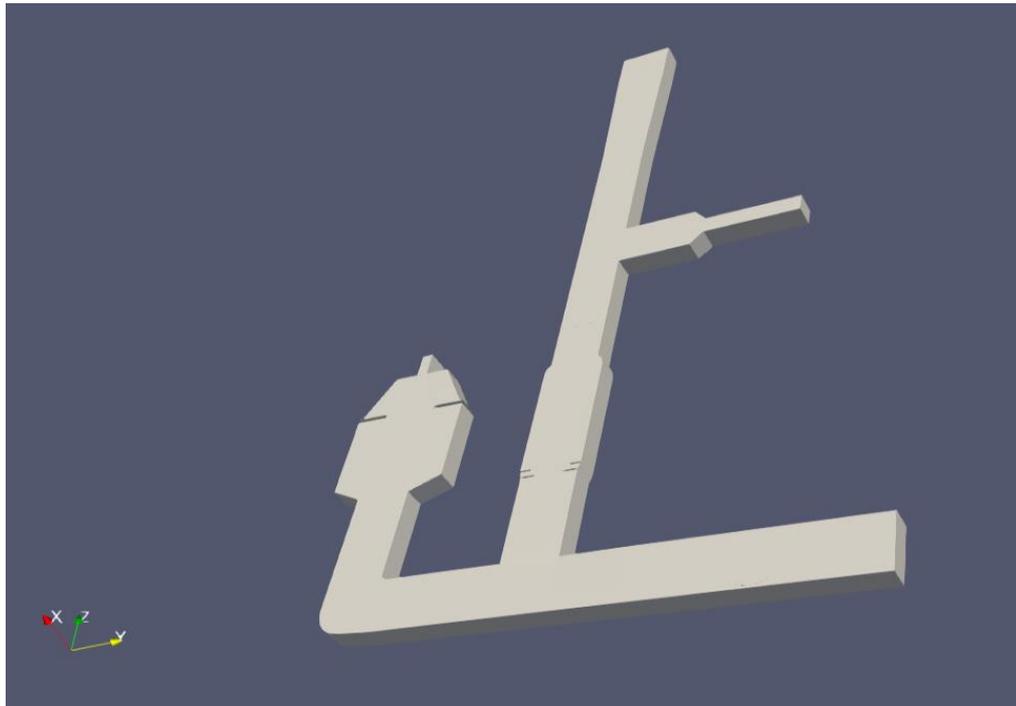


Figura 79 – Malha no formato *.stl* no ParaView.



2. Condições de Contorno Incorretas: as condições de contorno definidas no arquivo *snappyHexMeshDict* estão incorretas. Sendo necessárias alterações no código desse arquivo, o que exige um maior conhecimento da linguagem de programação utilizada no OpenFOAM.
3. Resolução da Malha Insuficiente: pode ser que a resolução da malha não seja suficiente para capturar a parede inferior de forma adequada. Ou seja, deve ser feito um refinamento da malha na área onde a parede está faltando no arquivo *snappyHexMeshDict*.

Estabelecidas as hipóteses, e tendo em perspectiva a hipótese 2 e 3, surgiu como uma possível solução o refinamento da malha e posterior execução no OpenFOAM, para isso o Gmsh retorna como um aliado por possuir o refinamento e quando exportado o arquivo em formato *.msh* e na Versão ASCII 2, a partir desse arquivo pode ser gerada a malha com o comando *gmshToFoam*.

O comando *gmshToFoam* converte malhas geradas no software Gmsh em um formato compatível com o OpenFOAM para serem usadas em simulações de dinâmica de fluidos computacional (CFD). Mas antes realizar esse comando no terminal é preciso estabelecer volumes das camadas.

5.2.4 Necessidade de mudança do software de simulação

Tendo em vista o cenário descrito no item anterior, e após a refinação da malha e posterior definição de volumes na malha: *inlet*, *outlet*, *footvalve*, *wall* e *mesh*; exportação do arquivo no formato *.msh* na Versão ASCII 2. Quando da tentativa de gerar um arquivo FOAM utilizando o comando *gmshToFoam*, continuaram ocorrendo erros. Mesmo após inúmeras alterações na malha e novas tentativas de definir volumes dentro do software Gmsh.

Por fim, decidiu-se pela mudança do software de simulação, adotando-se o ANSYS Discovery 2023, devido a sua interface mais visual e rapidez da emulação do fluxo interno do carneiro hidráulico.

5.3 Simulação utilizando o ANSYS Discovery 2023

Para simulações utilizando o ANSYS Discovery 2023, dividiu-se o processo em duas etapas. Em um primeiro momento, a malha é adaptada utilizando o Blender, em seguida essa malha é exportada em um formato *.stl* utilizando o *add-on Export OF*, a vantagem do uso desse *add-on* é que existe a separação dos componentes na exportação, ou seja, os elementos (*chamber*, *mesh*, *footvalve*, *sphere* e *wall*) são incluídos no arquivo.

Em seguida, esse arquivo *.stl*, com a malha e seus elementos, é aberto no ANSYS Discovery 2023. Entretanto, para realizar as simulações usando o *Fluid Flow*, é necessário transformar todos os elementos em sólidos e para isso, novos ajustes na malha utilizando as ferramentas de limpeza (*CLEANUP*) nativas ao ANSYS Discovery 2023. Por fim, são definidas a entrada (*flow inlet*) e as saídas (*flow outlet*) do sistema.

Destaca-se que para as simulações iniciais adotou-se a câmara de ar com o volume de 0,05L. Também foram definidas 4 malhas diferentes, referentes a forma de funcionamento do carneiro hidráulico:

- Malha 1: ambas válvulas abertas;
- Malha 2: válvula 1 fechada e válvula 2 aberta;
- Malha 3: ambas válvulas fechadas;
- Malha 4: válvula 1 aberta e válvula 2 fechada.

5.3.1 Malha 1: Ambas válvulas abertas

Esta malha (Figura 80) simula o funcionamento do carneiro hidráulico quando tanto a válvula de entrada (válvula 1) quanto a válvula de saída (válvula 2) estão abertas, permitindo um fluxo contínuo de água (Figura 81)

Figura 80 – Visão Geral da Malha 1 no Blender.

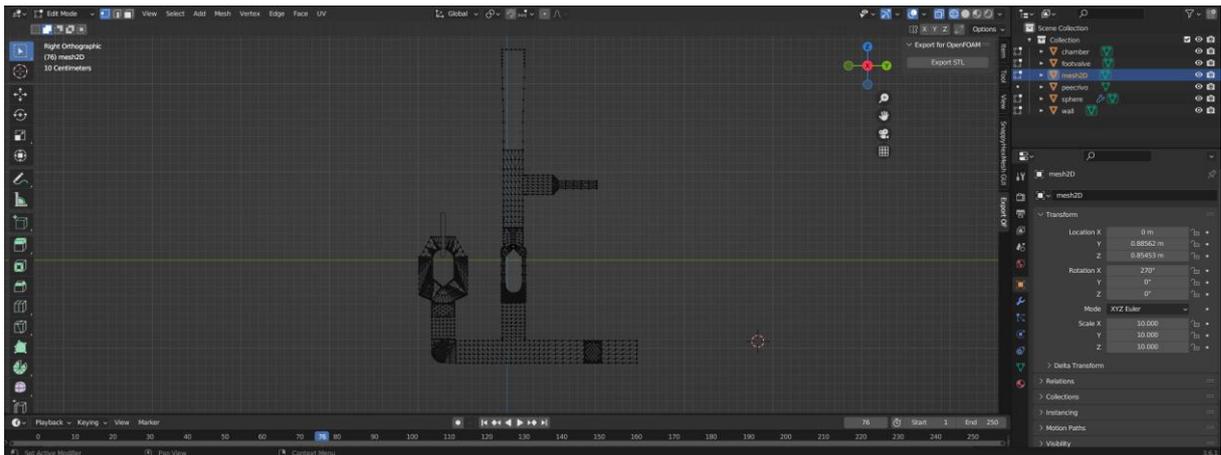
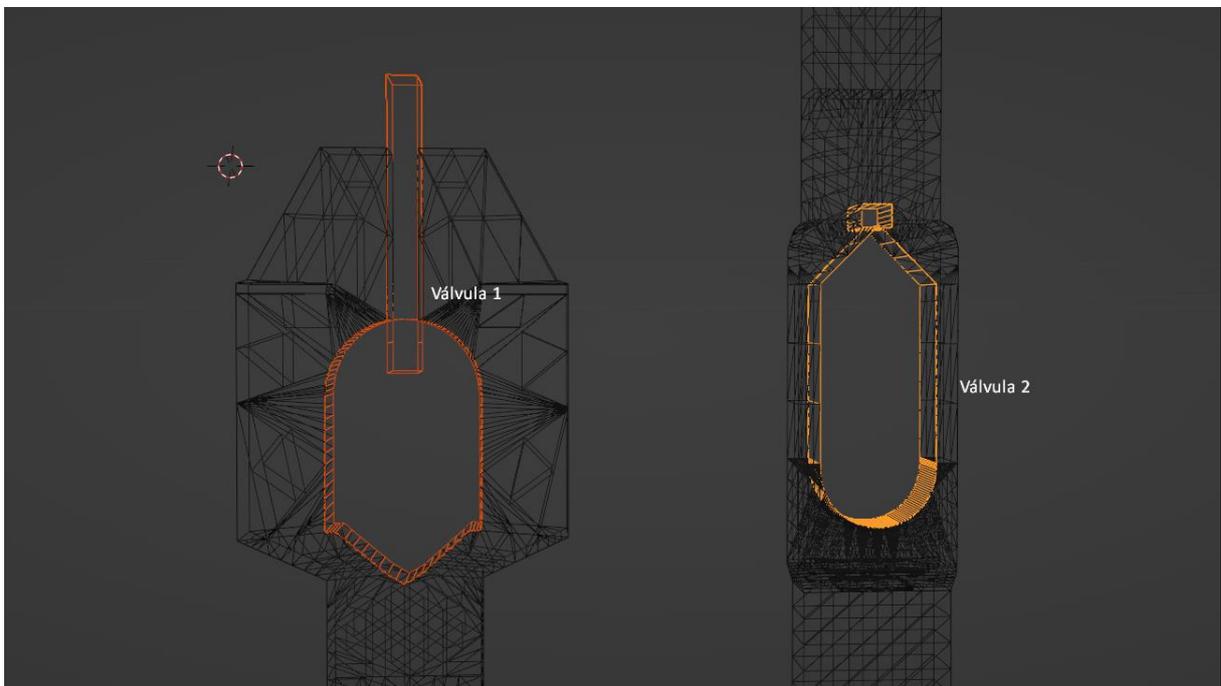


Figura 81 – Malha 1: Posição das válvulas (ambas abertas).



A Figura 82 apresenta a Malha 1 após definição dos sólidos no ANSYS Discovery 2023, posteriormente foram feitos alguns testes para verificar a adaptação do modelo para dados de entrada e saída (*flow inlet* e *outlet*) e definição de paredes (*wall*), outros dados podem ser

determinados, como temperatura, gravidade, tipo de material e parede com deslizamento ou não (*no slip* e *free slip*), Figura 83

Figura 82 – Visão Geral da Malha 1 no ANSYS Discovery 2023.

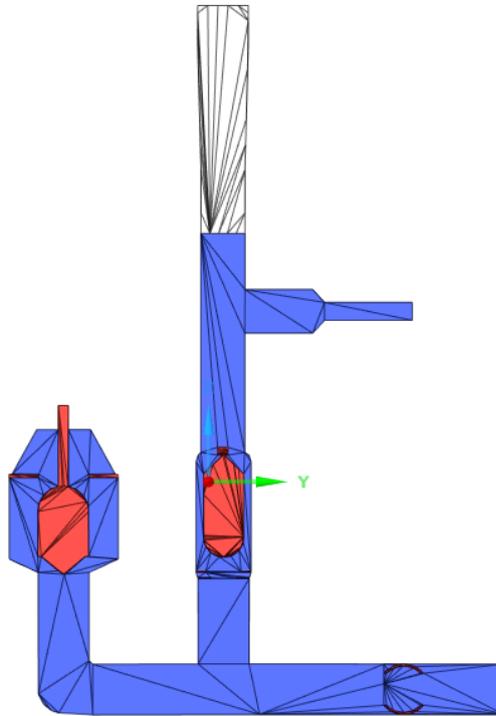
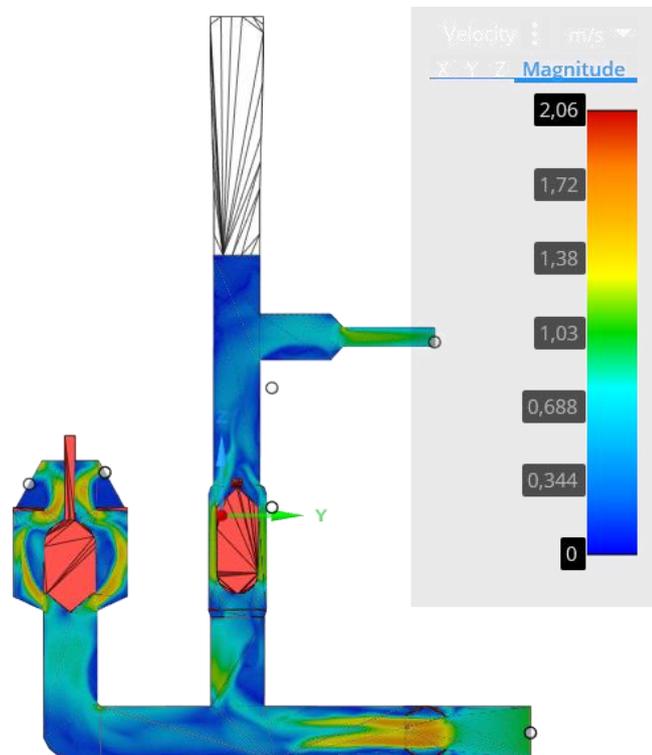


Figura 83 – Adaptação da Malha 1 aos dados de entrada.



5.3.2 Malha 2: Válvula 1 fechada e válvula 2 aberta

Nesta configuração, a válvula de entrada está fechada, enquanto a válvula de saída permanece aberta (Figura 84). Isso replica a situação em que a válvula de entrada está bloqueada, resultando na compressão do ar dentro do carneiro e no fechamento da válvula de retenção, o que leva ao início do ciclo de funcionamento do carneiro (Figura 85).

Figura 84 – Malha 2: Válvula 1 fechada e válvula 2 aberta.

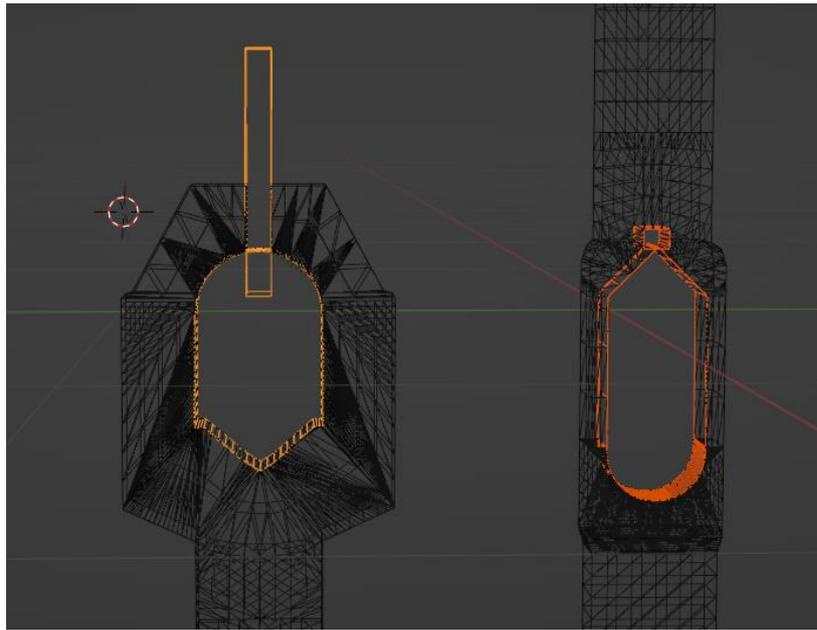
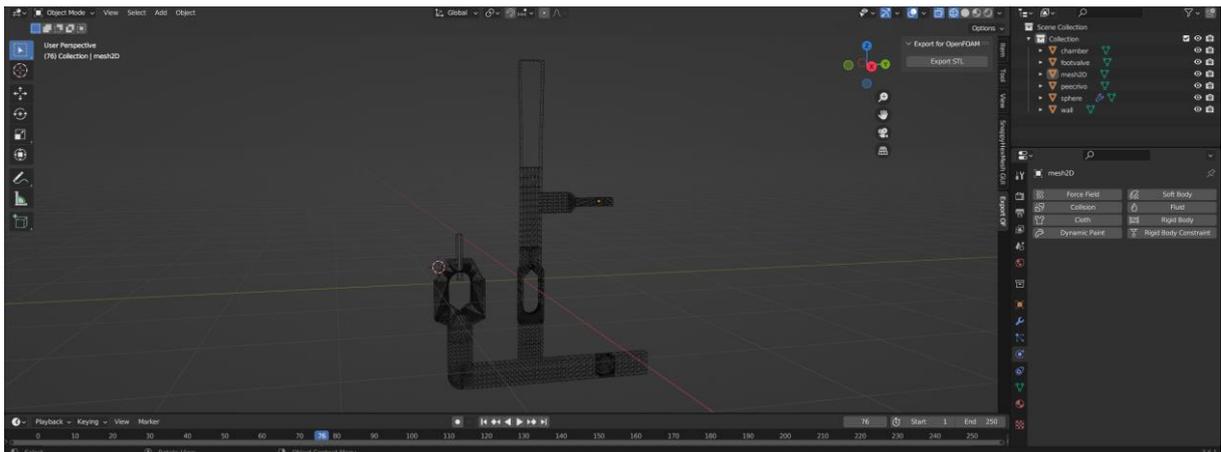


Figura 85 – Visão Geral da Malha 2 no Blender.



A Figura 86 apresenta a Malha 2 após definição dos sólidos no ANSYS Discovery 2023, posteriormente foram feitos os mesmos testes da Malha 1 para verificar a adaptação do modelo, Figura 87

Figura 86 – Visão Geral da Malha 2 no ANSYS Discovery 2023.

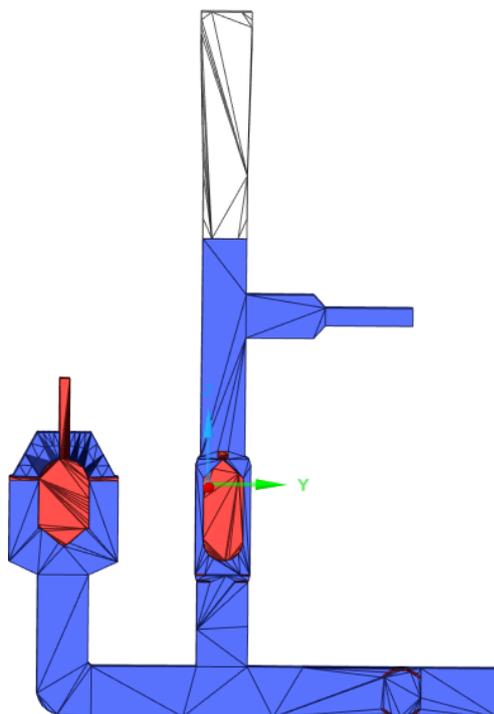
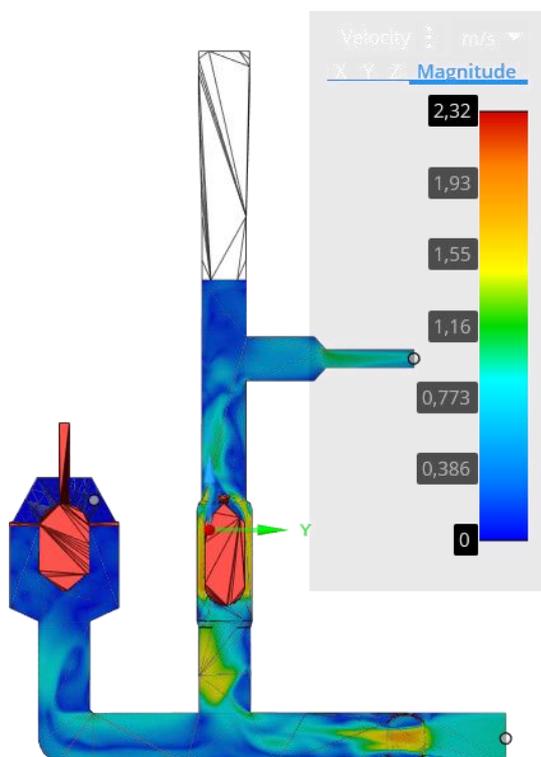


Figura 87 – Adaptação da Malha 2 aos dados de entrada.



5.3.3 Malha 3: Ambas válvulas fechadas

Aqui, tanto a válvula de entrada quanto a válvula de saída estão fechadas (Figura 88). Isso representa a condição em que o sistema está totalmente isolado do fluxo de água externo, interrompendo completamente o processo de funcionamento do carneiro hidráulico (Figura 89).

Figura 88 – Malha 3: Posição das válvulas (ambas fechadas).

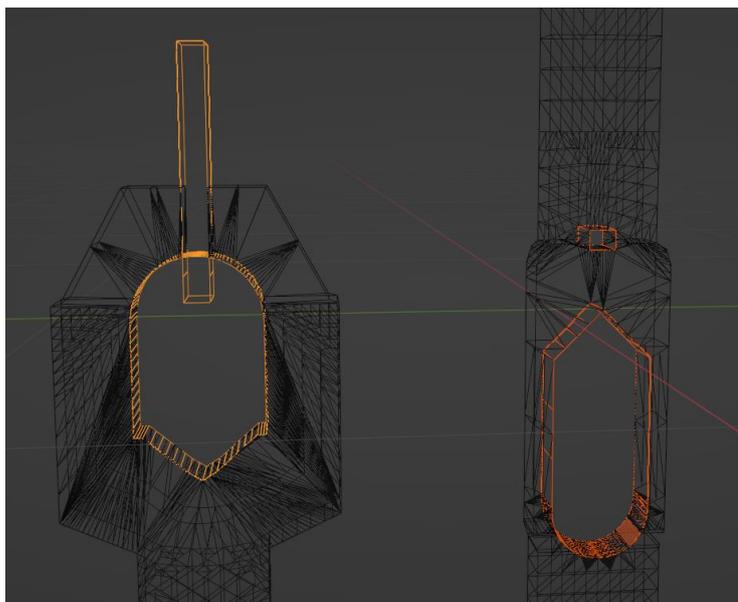
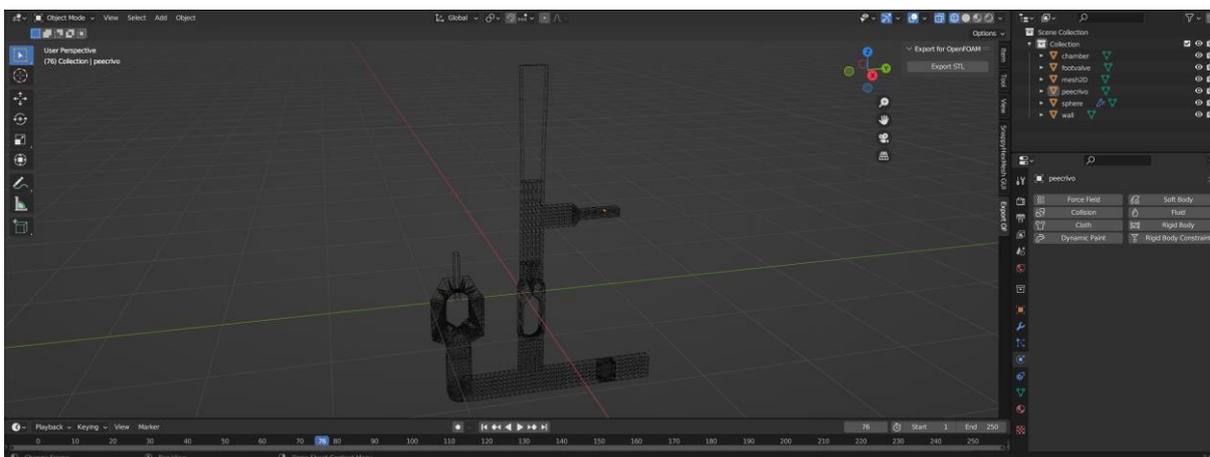


Figura 89 – Visão Geral da Malha 3 no Blender.



A Figura 90 apresenta a Malha 3 após definição dos sólidos no ANSYS Discovery 2023, posteriormente foram feitos os mesmos testes da Malha 1 para verificar a adaptação do modelo, Figura 91.

Figura 90 – Visão Geral da Malha 3 no ANSYS Discovery 2023.

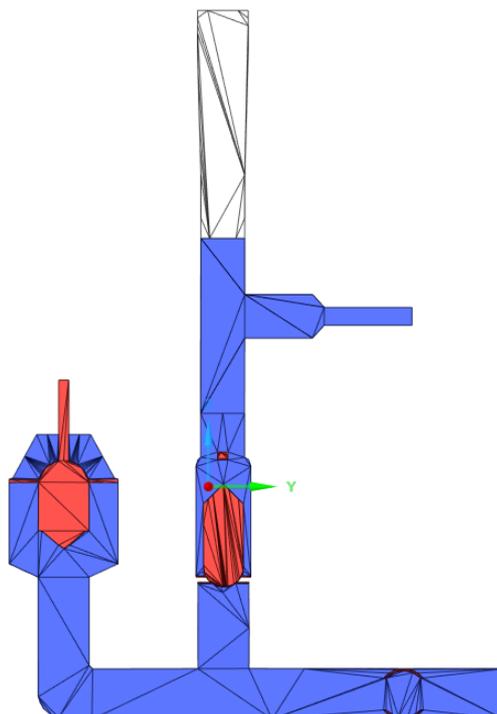
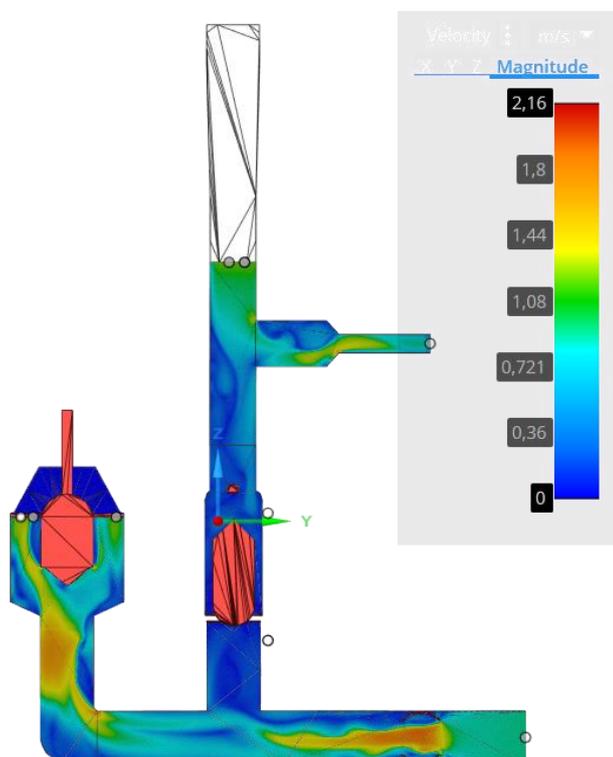


Figura 91 – Adaptação da Malha 3 aos dados de entrada.



5.3.4 Malha 4: Válvula 1 Aberta e Válvula 2 Fechada

Nesta configuração, a válvula de entrada está aberta, enquanto a válvula de saída está fechada (Figura 92). Isso imita a situação em que a válvula de entrada está aberta, permitindo

a entrada de água no carneiro, mas a válvula de saída está bloqueada, resultando na compressão do ar e no início do ciclo de funcionamento do carneiro hidráulico (Figura 93).

Figura 92 – Malha 4: Válvula 1 aberta e Válvula 2 fechada.

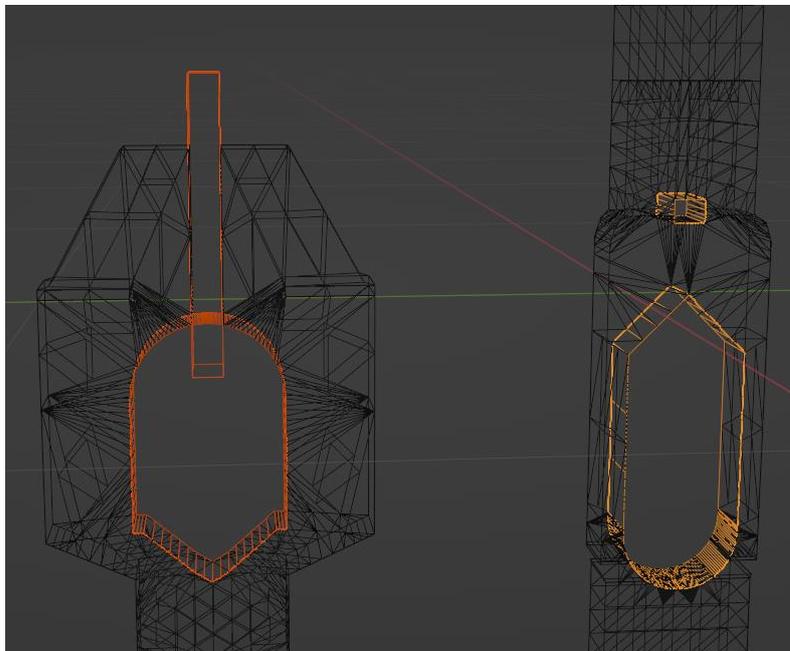
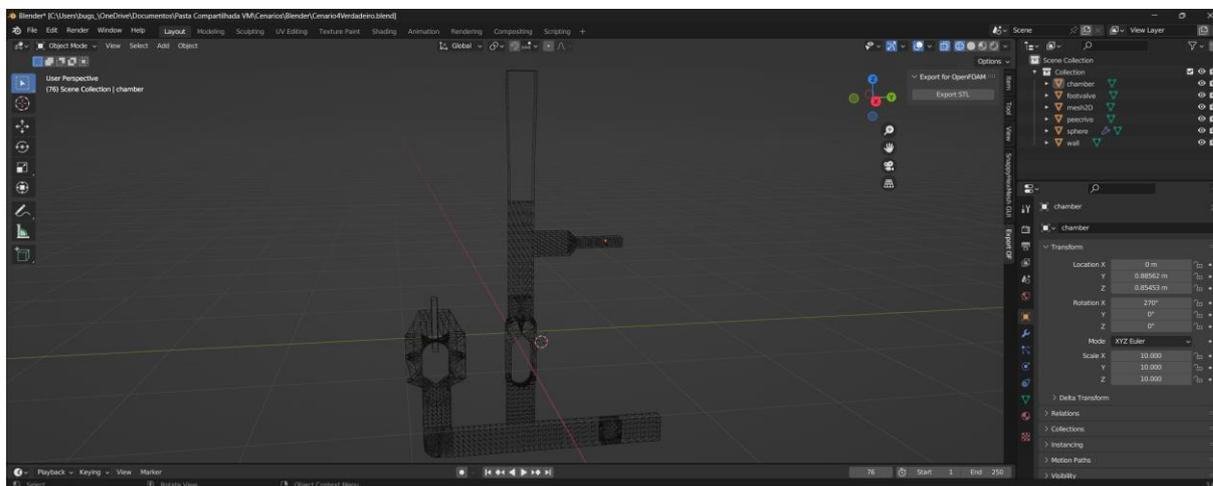


Figura 93 – Visão Geral da Malha 4 no Blender.



A Figura 94 apresenta a Malha 4 após definição dos sólidos no ANSYS Discovery 2023, posteriormente foram feitos os mesmos testes da Malha 1 para verificar a adaptação do modelo, Figura 95.

Figura 94 – Visão Geral da Malha 4 no ANSYS Discovery 2023.

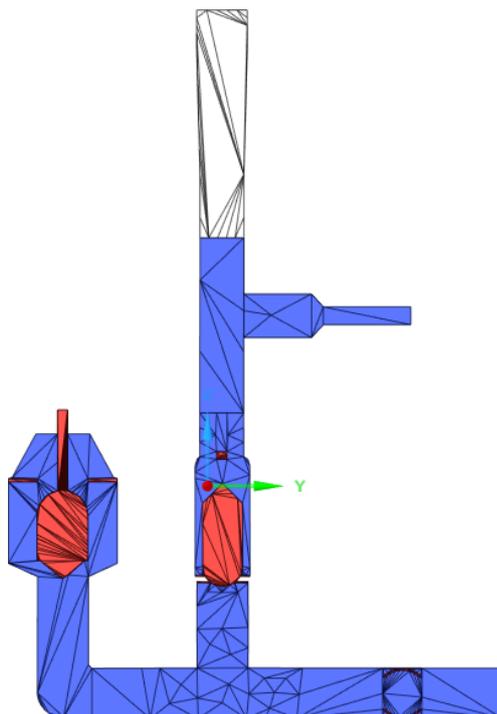
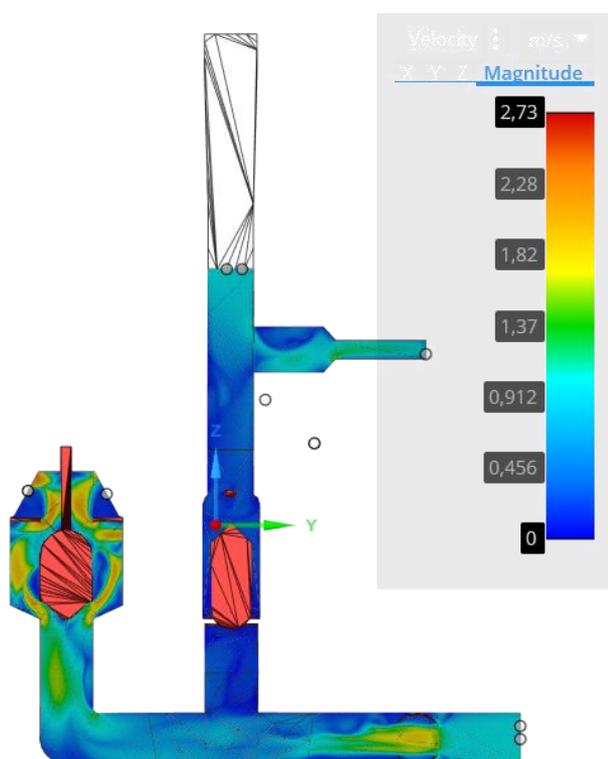


Figura 95 – Adaptação da Malha 4 aos dados de entrada.



5.4 Do Resultado das Simulações

Para a realização das simulações, para obtenção dos valores da saída do carneiro, foi utilizado como base a Malha 4 em três cenários e a Malha 1 para um cenário. A partir disso,

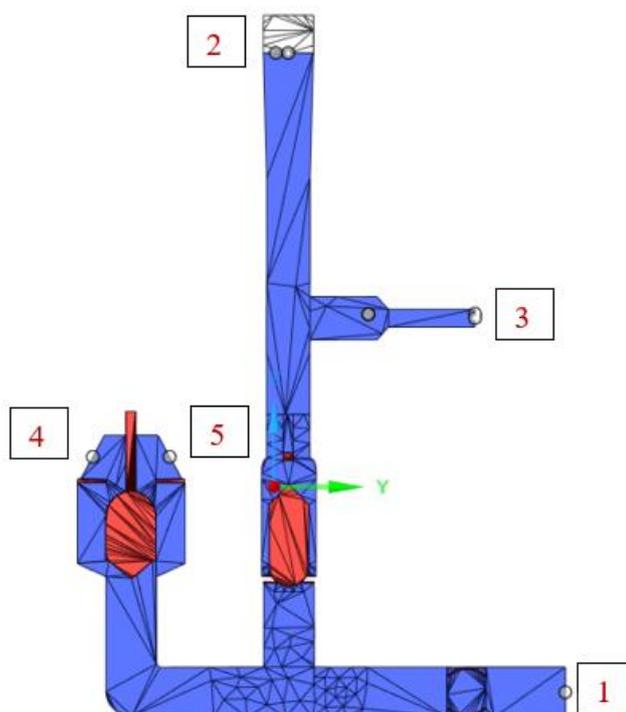
foram definidos quatro (4) cenários diferentes, cada cenário possui sete (7) simulações. Para os cenários existe uma variação do volume da Câmara de Ar e para as simulações existe uma variação na Carga de Pressão na entrada da bomba. Essas variações foram:

1. Cenário 1: Malha 4 - Câmara 20% do Volume
 - a. Variação na Carga de Pressão: 1, 2, 5, 10, 15, 20 e 40 mca.
2. Cenário 2: Malha 4 - Câmara 50% do Volume
 - a. Variação na Carga de Pressão: 1, 2, 5, 10, 15, 20 e 40 mca.
3. Cenário 3: Malha 4 - Câmara 80% do Volume
 - a. Variação na Carga de Pressão: 1, 2, 5, 10, 15, 20 e 40 mca.
4. Cenário 4: Malha 1 - Câmara 99% do Volume
 - a. Variação na Carga de Pressão: 1, 2, 5, 10, 15, 20 e 40 mca.

5.4.1 Cenário 1 - Malha 4: Câmara 20% do Volume

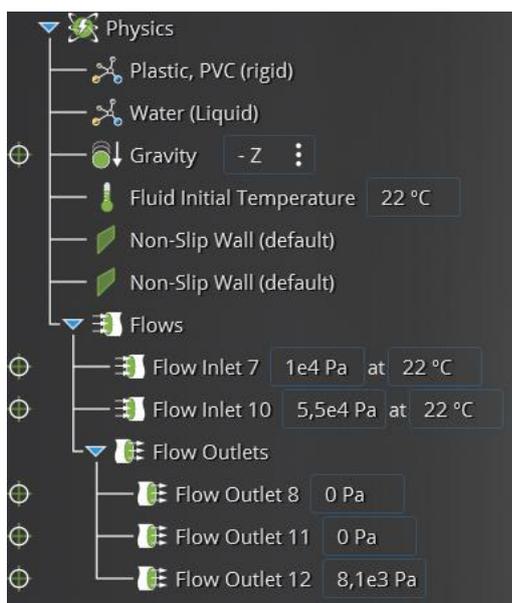
Para o Cenário 1 foi considerado o Volume de 20% da câmara de ar, como apresentado na Figura 96, além disso foram considerados fluxos de entrada os pontos 1 e 2, já os fluxos de saída são os pontos 3, 4 e 5.

Figura 96 – Visão geral da Malha 4 com Câmara com 20% do Volume ocupado por ar.



Para cada um desses pontos são atribuídos valores (Figura 97), esses valores são em Pascal (Pa), além disso considera-se a temperatura de 22°C, a ação da força gravitacional no eixo Z e os materiais: plástico PVC ($\rho = 1392 \text{ kg/m}^3$) e Água ($\rho = 997 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 0,00089 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\gamma = 0,000257 \text{ 1/}^\circ\text{C}$).

Figura 97 – Menu de configurações do ANSYS Discovery 2023.



A Tabela 5 traz os resultados obtidos nas sete simulações feitas, para cada simulação é gerada uma resposta (Figura 98). Em seguida é gerado o gráfico de pressão x tempo no fluxo de saída 3, Figura 99. Destaca-se as seguintes informações referentes a Tabela 5:

- Considerou-se o tempo de estabilização da pressão (t_{est}) o momento em que a pressão possui o seu menor valor, para isso batizou-se esse fenômeno como o “pulso” do carneiro;
- O Volume Líquido a ser deslocado (Vol_{Liq}) foi obtido utilizando da função *Mass Properties* do *Ansys Discovery 2023*, Figura 100, tem-se que é todo o volume contido desde o fim da câmara de ar (ponto 2) até a saída (ponto 3);
- Os parâmetros: vazão de entrada, pressão na câmara de ar, pressão final, vazão média de saída são calculados por meio dos outros parâmetros obtidos no modelo, o cálculo deles será explicado no próximo tópico: 5.5 Da Aplicação do Modelo;
- Foi considerado a conversão de mca para Pa: $1mca = 10.000 \text{ Pa}$.

Figura 98 – Resposta do Modelo ao Cenário 1 - Simulação 7.

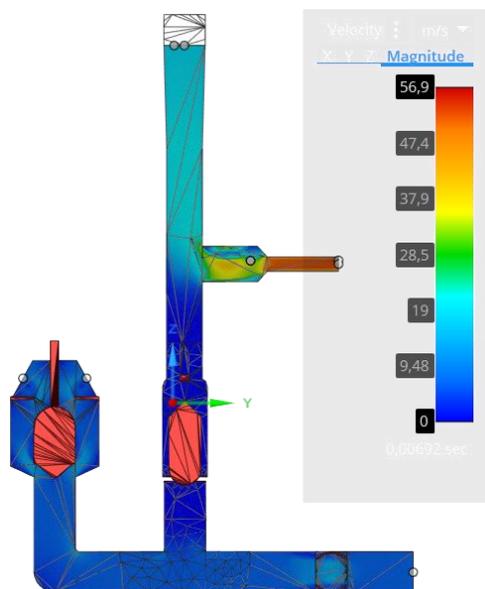


Figura 99 – Gráfico Pressão x Tempo ponto saída (*outflow*): Cenário 1 – Simulação 7.



Figura 100 – Volume Líquido a ser deslocado.

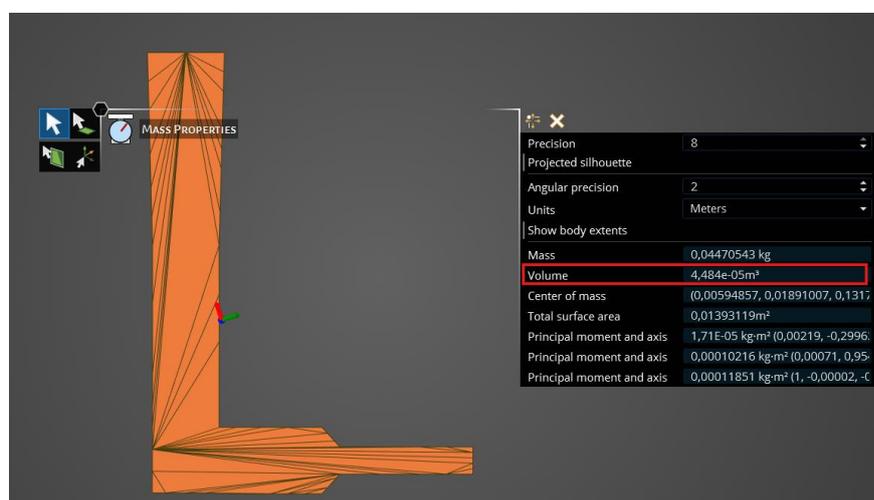


Tabela 5 – Resultados obtidos pelas Simulações do Cenário 1.

Parâmetros de ENTRADA como condição de contorno ou resultante da condição de contorno									Dados de SAIDA do modelo				
Carga de Pressão na entrada h (mca)	Volume da Câmara de Ar VCar (l)	Área tubulação de entrada (Ai) m²	Velocidade na entrada Ventrada (m/s)	Determinar a vazão de entrada Qentrada (l/s)	Fixar o volume de ar na câmara de ar (≈20%) Va (l)	Distância entre os eixos da tubulação (m)	Determinar a pressão na câmara de ar Par (mca) =(Vcar/Va)*h	Determinar a Pressão Final Pfinal (mca)	Tempo de estabilização da pressão test (s)	Volume Líquido a ser deslocado VolLiq (m³)	Área tubulação de saída (Af) m²	Vazão média de saída (m³/s)	Vazão média de saída (l/s)
1	0,0266	0,0002531	1,52	0,384712	0,0048	0,1895	5,541666667	0,8105	0,100611687	0,0000448	0,0000893	0,000445276	0,445276
2	0,0266	0,0002531	2,22	0,561882	0,0048	0,1895	11,08333333	1,8105	0,095189631	0,0000448	0,0000893	0,000470639	0,470639
5	0,0266	0,0002531	3,74	0,946594	0,0048	0,1895	27,70833333	4,8105	0,060954381	0,0000448	0,0000893	0,000734976	0,734976
10	0,0266	0,0002531	5,07	1,283217	0,0048	0,1895	55,41666667	9,8105	0,038328841	0,0000448	0,0000893	0,001168833	1,168833
15	0,0266	0,0002531	6,14	1,554034	0,0048	0,1895	83,125	14,8105	0,029871967	0,0000448	0,0000893	0,001499734	1,499734
20	0,0266	0,0002531	7,11	1,799541	0,0048	0,1895	110,8333333	19,8105	0,026452249	0,0000448	0,0000893	0,001693618	1,693618
40	0,0266	0,0002531	10	2,531	0,0048	0,1895	221,6666667	39,8105	0,019278957	0,0000448	0,0000893	0,002323777	2,323777

Considerando-se o princípio de conservação de massa - Qi = Qf

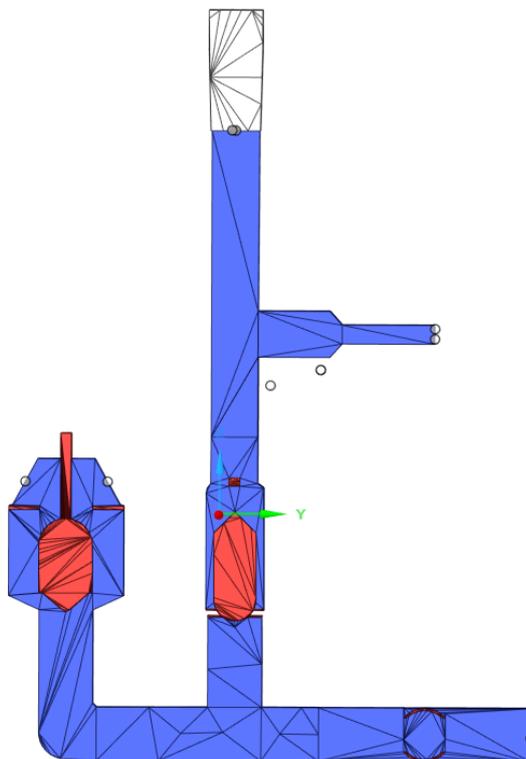
Cenário 4: Válvula 1 fechada e Válvula 2 aberta

Massa 997 kg/m³
Específica (ρ) =

5.4.2 Cenário 2 - Malha 4: Câmara 50% do Volume

Para o Cenário 2 foi considerado o Volume de 50% da câmara de ar, como apresentado na Figura 101, foram considerados os mesmos fluxos de entrada e saída do Cenário 1.

Figura 101 – Visão geral da Malha 4 com Câmara com 50% do Volume ocupado por ar.



A Tabela 6 traz os resultados obtidos nas sete simulações feitas, para cada simulação é gerada uma resposta (Figura 102). Em seguida é gerado o gráfico de pressão x tempo no fluxo de saída 3, Figura 103. Para determinação do t_{est} utilizou-se a opção de exportação dos dados para uma tabela .csv (Figura 104), com isso consultou-se o momento em que a pressão tem o menor valor e o tempo foi passado para a Tabela 6.

Figura 102 – Resposta do Modelo ao Cenário 2 - Simulação 7.

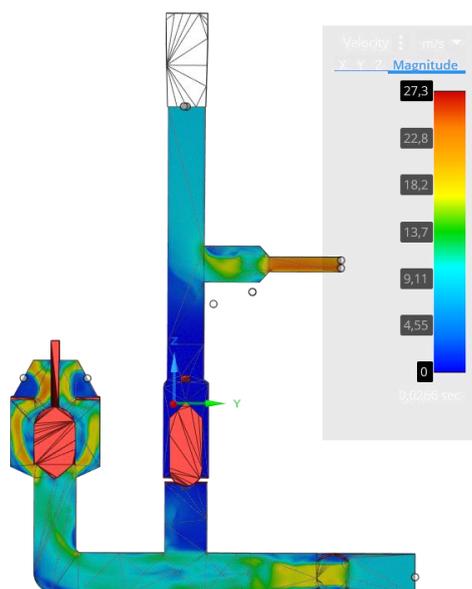


Figura 103 – Gráfico Pressão x Tempo ponto saída (*outflow*): Cenário 2 – Simulação 7.

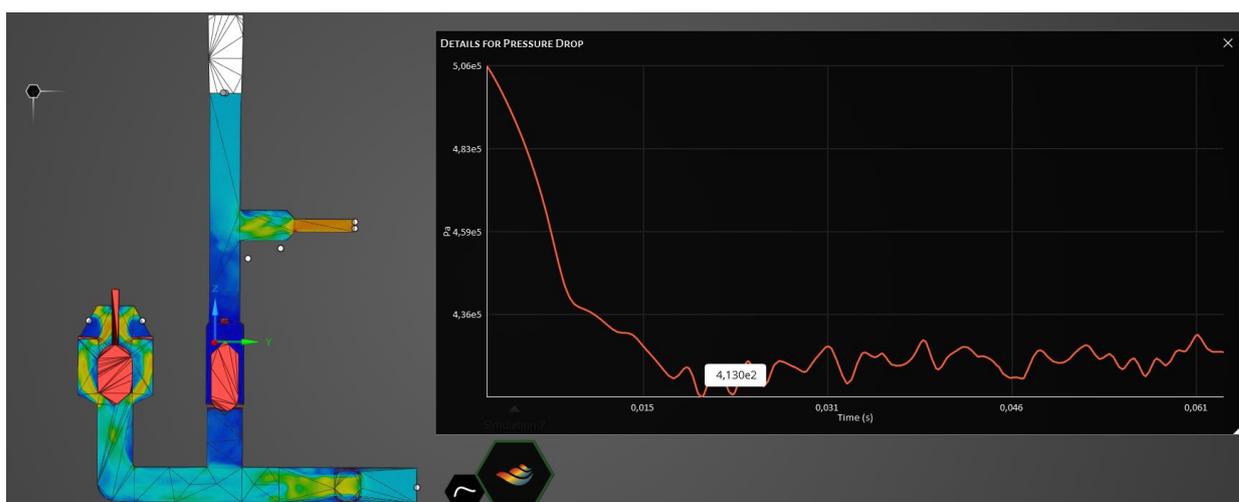


Figura 104 – Opção existente de exportar dados no formato .csv.

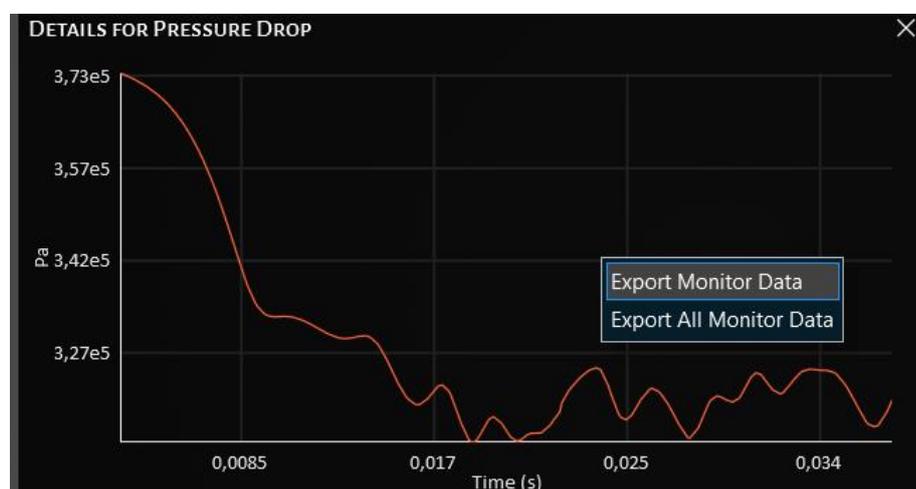


Tabela 6 – Resultados obtidos pelas Simulações do Cenário 2.

Parâmetros de ENTRADA como condição de contorno ou resultante da condição de contorno									Dados de SAIDA do modelo				
Carga de Pressão na entrada h (mca)	Volume da Câmara de Ar VCar (l)	Área tubulação de entrada (Ai) m ²	Velocidade na entrada Ventrada (m/s)	Determinar a vazão de entrada Qentrada (l/s)	Fixar o volume de ar na câmara de ar ($\approx 50\%$) Va (l)	Distância entre os eixos da tubulação (m)	Determinar a pressão na câmara de ar Par (mca) $= (Vcar/Va)*h$	Determinar a Pressão Final Pfinal (mca)	Tempo de estabilização da pressão da pressão test (s)	Volume Líquido a ser deslocado VolLiq (m ³)	Área tubulação de saída (Af) m ²	Vazão média de saída (m ³ /s)	Vazão média de saída (l/s)
1	0,0266	0,0002531	1,4	0,35434	0,014	0,1895	1,9	0,8105	0,141735777	0,0000357	0,0000893	0,000251877	0,251877
2	0,0266	0,0002531	2,06	0,521386	0,014	0,1895	3,8	1,8105	0,102779776	0,0000357	0,0000893	0,000347345	0,347345
5	0,0266	0,0002531	3,17	0,802327	0,014	0,1895	9,5	4,8105	0,056975305	0,0000357	0,0000893	0,000626587	0,626587
10	0,0266	0,0002531	4,67	1,181977	0,014	0,1895	19	9,8105	0,040289346	0,0000357	0,0000893	0,00088609	0,88609
15	0,0266	0,0002531	5,4	1,36674	0,014	0,1895	28,5	14,8105	0,032795288	0,0000357	0,0000893	0,001088571	1,088571
20	0,0266	0,0002531	6,61	1,672991	0,014	0,1895	38	19,8105	0,03023744	0,0000357	0,0000893	0,001180656	1,180656
40	0,0266	0,0002531	9,55	2,417105	0,014	0,1895	76	39,8105	0,020104915	0,0000357	0,0000893	0,001775685	1,775685

Considerando-se o princípio de conservação de massa - $Q_i = Q_f$

Cenário 4: Válvula 1 fechada e Válvula 2 aberta

997 kg/m³

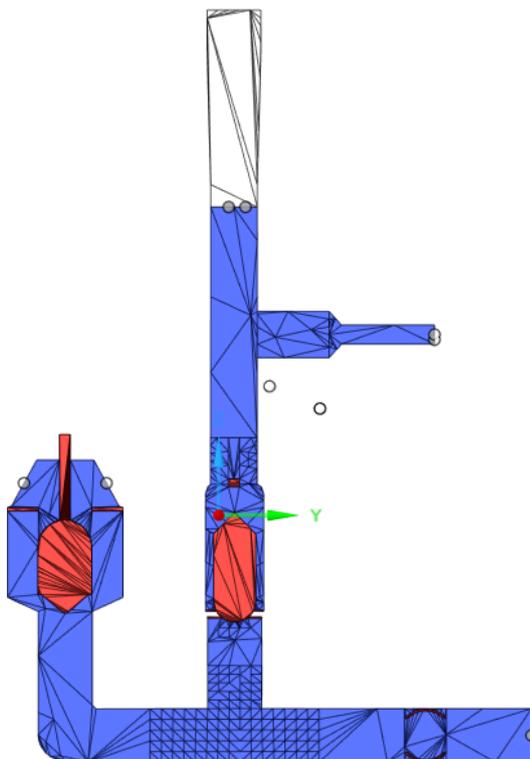
Massa

Específica (ρ) =

5.4.3 Cenário 3 - Malha 4: Câmara 80% do Volume

Para o Cenário 3 foi considerado o Volume de 80% da câmara de ar, como apresentado na Figura 105, foram considerados os mesmos fluxos de entrada e saída do Cenário 1.

Figura 105 – Visão geral da Malha 4 com Câmara com 80% do Volume ocupado por ar.

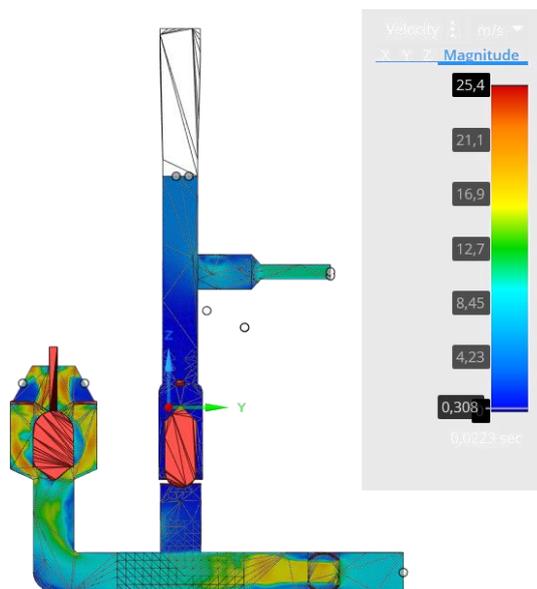


Os resultados obtidos pelas simulações (Figura 106 e Figura 107) são apresentados na Tabela 7. Assim como nos dois cenários anteriores (1 e 2), utilizou-se os mesmos pontos de entrada e saída de fluxo.

Figura 106 – Gráfico Pressão x Tempo ponto saída (*outflow*): Cenário 3 – Simulação 7.



Figura 107 – Resposta do Modelo ao Cenário 3 - Simulação 7.



5.4.4 Cenário 4 - Malha 1: Câmara 99% do Volume

Para o Cenário 3 foi considerado o Volume de 99% da câmara de ar, como apresentado na Figura 108, foram considerados os mesmos fluxos de entrada e saída do Cenário 1. Nesse cenário foi realizada uma alteração na malha, empregou-se a Malha 1 (ambas válvulas abertas).

Figura 108 – Visão geral da Malha 1 com Câmara com 99% do Volume ocupado por ar.

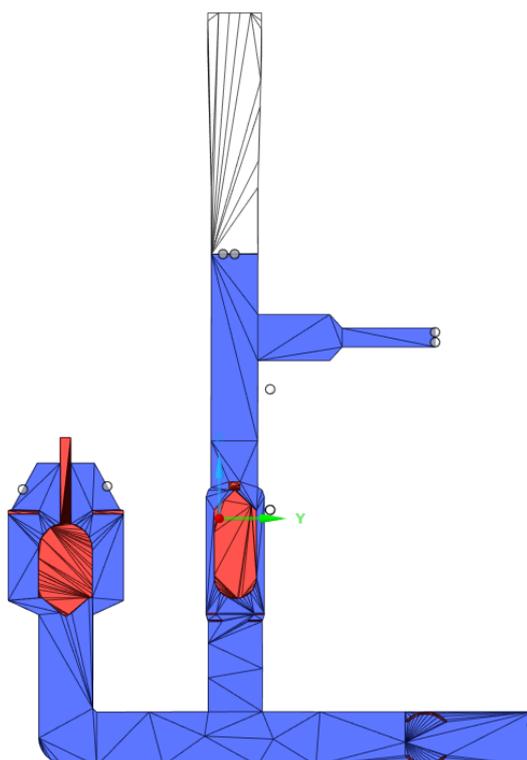


Tabela 7 – Resultados obtidos pelas Simulações do Cenário 3.

Parâmetros de ENTRADA como condição de contorno ou resultante da condição de contorno									Dados de SAIDA do modelo				
Carga de Pressão na entrada h (mca)	Volume da Câmara de Ar VCar (l)	Área tubulação de entrada (Ai) m ²	Velocidade na entrada Ventrada (m/s)	Determinar a vazão de entrada Qentrada (l/s)	Fixar o volume de ar na câmara de ar (~80%) Va (l)	Distância entre os eixos da tubulação (m)	Determinar a pressão na câmara de ar Par (mca) = (Vcar/Va)*h	Determinar a Pressão Final Pfinal (mca)	Tempo de estabilização da pressão test (s)	Volume Líquido a ser deslocado VolLiq (m ³)	Área tubulação de saída (Af) m ²	Vazão média de saída (m ³ /s)	Vazão média de saída (l/s)
1	0,0266	0,0002531	1,41	0,356871	0,022	0,1895	1,209090909	0,8105	0,119014442	0,0000276	0,0000893	0,000231905	0,231905
2	0,0266	0,0002531	1,98	0,501138	0,022	0,1895	2,418181818	1,8105	0,092963107	0,0000276	0,0000893	0,000296892	0,296892
5	0,0266	0,0002531	3,14	0,794734	0,022	0,1895	6,045454545	4,8105	0,052580297	0,0000276	0,0000893	0,000524911	0,524911
10	0,0266	0,0002531	4,4	1,11364	0,022	0,1895	12,09090909	9,8105	0,037314631	0,0000276	0,0000893	0,000739656	0,739656
15	0,0266	0,0002531	5,49	1,389519	0,022	0,1895	18,13636364	14,8105	0,030522864	0,0000276	0,0000893	0,00090424	0,90424
20	0,0266	0,0002531	6,45	1,632495	0,022	0,1895	24,18181818	19,8105	0,026423674	0,0000276	0,0000893	0,001044518	1,044518
40	0,0266	0,0002531	9,14	2,313334	0,022	0,1895	48,36363636	39,8105	0,018670203	0,0000276	0,0000893	0,001478291	1,478291

Considerando-se o princípio de conservação de massa - $Q_i = Q_f$

Cenário 4: Válvula 1 fechada e Válvula 2 aberta

Massa 997 kg/m³
Específica (ρ)
=

Nesse cenário a câmara está preenchida em 99% por ar, com isso procura-se um cenário com um golpe de aríete amplificado. Além disso, trocou-se a malha para que a combinação de ambas as válvulas abertas e a câmara preenchida com ar permita que o golpe de aríete seja mais eficaz, resultando em uma elevação maior da água. As respostas obtidas pelo modelo são mostradas na Figura 109 e Figura 110. Os resultados das sete simulações estão na Tabela 8.

Figura 109 – Resposta do Modelo ao Cenário 4 - Simulação 7.

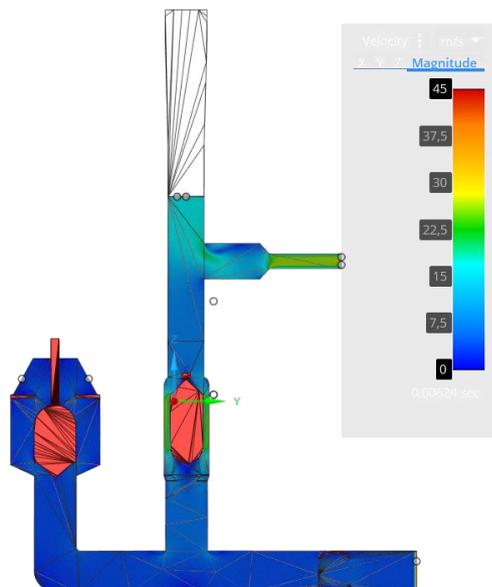


Figura 110 – Gráfico Pressão x Tempo ponto saída (*outflow*): Cenário 4 – Simulação 7.

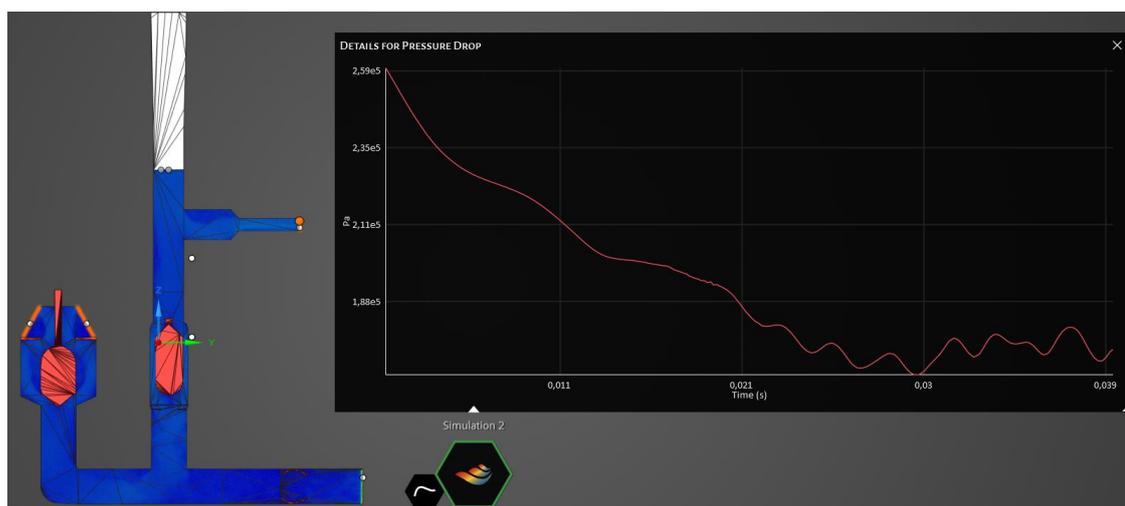


Tabela 8 – Resultados obtidos pelas Simulações do Cenário 4.

Parâmetros de ENTRADA como condição de contorno ou resultante da condição de contorno											Dados de SAIDA do modelo				
Carga de Pressão na entrada h (mca)	ΔP (mca)	Volume da Câmara de Ar VCar (l)	Área tubulação de entrada (Ai) m ²	Velocidade na entrada Ventrada (m/s)	Determinar a vazão de entrada Qentrada (l/s)	Fixar o volume de ar na câmara de ar ($\approx 99,8\%$) Va (l)	Distância entre o ar e o eixo da tubulação de saída x (m)	Distância entre os eixos da tubulação y (m)	Determinar a Pressão Final Pfinal (mca)	Determinar h-y+ ΔP (mca)	Tempo de estabilização da pressão test (s)	Área tubulação de saída (Af) m ²	Velocidade na saída Vsaída (m/s)	Vazão média de saída (m ³ /s)	Vazão média de saída (l/s)
1	38	0,0266	0,0002531	121	30,6251	0,026556995	0,03936	0,1895	0,8105	38,8105	0,036125112	0,0000893	22,2	0,0019824	1,98246
2	55,5	0,0266	0,0002531	155	39,2305	0,026556995	0,03936	0,1895	1,8105	57,3105	0,029605923	0,0000893	26,9	0,0024021	2,40217
5	93,5	0,0266	0,0002531	186	47,0766	0,026556995	0,03936	0,1895	4,8105	98,3105	0,020271078	0,0000893	38,4	0,0034291	3,42912
10	126,8	0,0266	0,0002531	213	53,9103	0,026556995	0,03936	0,1895	9,8105	136,6105	0,017220443	0,0000893	46	0,0041078	4,1078
15	153,5	0,0266	0,0002531	267	67,5777	0,026556995	0,03936	0,1895	14,8105	168,3105	0,0174968	0,0000893	48,7	0,0043489	4,34891
20	177,8	0,0266	0,0002531	270	68,337	0,026556995	0,03936	0,1895	19,8105	197,6105	0,016016923	0,0000893	51,8	0,0046257	4,62574
40	257,7	0,0266	0,0002531	282	71,3742	0,026556995	0,03936	0,1895	39,8105	297,5105	0,016094092	0,0000893	63,6	0,0057948	5,67948

Considerando-se o princípio de conservação de massa - $Q_i = Q_f$

Cenário 1: Válvula 1 aberta e Válvula 2 aberta

Massa Específica (ρ) = 997 kg/m³

5.5 Da Aplicação do Modelo Gerado

Após a construção do modelo da bomba carneiro, procedeu-se a simulação do funcionamento da bomba, fixando-se a carga de pressão na entrada (h) e o volume da Câmara (V_C).

Na sequência foram avaliados o comportamento de alguns parâmetros característicos decorrentes do volume da Câmara ($V_{Câmara}$) e da carga de pressão na entrada (h).

Uma vez construído o modelo computacional da bomba carneiro, fixou-se conjuntos de parâmetros referentes ao volume da câmara e carga de pressão na entrada da bomba. O modelo após aplicação da técnica CFD, resultou os valores da velocidade média de escoamento na entrada, os volumes de ar e água no interior da câmara, assim como a variação do volume de água armazenado, tanto na condição inicial, quanto na condição após o transitório.

A vazão foi expressa externamente ao modelo, aplicando-se a equação da continuidade Equação (17).

$$Q_e = v \cdot A_e \quad (17)$$

Sendo Q_e a vazão de entrada (m^3/s); v a velocidade média do escoamento (m/s); A_e a área da seção transversal da tubulação de entrada da bomba carneiro (m^2).

Os resultados das simulações estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros de saída obtido após a simulação por CFD da bomba carneiro, em função dos parâmetros carga de pressão na entrada (h) e do volume da Câmara ($V_{Câmara}$).

Parâmetros de Entrada		Parâmetros de Saída							
V_C (l)	h (mca)	v (m/s)	Q_e^* (l/s)	Condição Inicial		Condição após transiente			
				Vol. Ar (l)	Vol. Água (l)	Vol. Ar (l)	Vol. Água (l)	H (mca)	$\Delta V_{água}^*$ (l)
0,200	1	1,52	0,38	0,19974	0,00026	0,02053	0,17947	19,8	0,1792
	2	2,22	0,56	0,19974	0,00026	0,02726	0,17274	29,6	0,1725
	5	3,74	0,95	0,19974	0,00026	0,03674	0,16326	51,6	0,1630
	10	5,07	1,28	0,19974	0,00026	0,04757	0,15243	73,2	0,1522
	15	6,14	1,55	0,19974	0,00026	0,05439	0,14561	91,6	0,1454
	20	7,11	1,80	0,19974	0,00026	0,05922	0,14078	108,7	0,1405
	40	10,3	2,51	0,19974	0,00026	0,07125	0,12875	168,6	0,1285
	0,267	1	1,52	0,38	0,26665	0,00035	0,02740	0,23960	19,8
2		2,22	0,56	0,26665	0,00035	0,03640	0,23060	29,6	0,2303
5		3,74	0,95	0,26665	0,00035	0,04905	0,21795	51,6	0,2176
10		5,07	1,28	0,26665	0,00035	0,06350	0,20350	73,2	0,2032
15		6,14	1,55	0,26665	0,00035	0,07260	0,19440	91,6	0,1941
20		7,11	1,80	0,26665	0,00035	0,07906	0,18794	108,7	0,1876
40		10,3	2,51	0,26665	0,00035	0,09512	0,17188	168,6	0,1715

Continua...

Tabela 9 (Continuação) – Parâmetros de saída obtido após a simulação por CFD da bomba carneiro, em função dos parâmetros carga de pressão na entrada (h) e do volume da Câmara ($V_{\text{Câmara}}$).

Parâmetros de Entrada		Parâmetros de Saída							
V_c (l)	h (mca)	v (m/s)	Q_e^* (l/s)	Condição Inicial		Condição após transiente			
				Vol. Ar (l)	Vol. Água (l)	Vol. Ar (l)	Vol. Água (l)	H (mca)	$\Delta V_{\text{água}}^*$ (l)
0,300	1	1,52	0,38	0,29961	0,00039	0,03079	0,26921	19,8	0,2688
	2	2,22	0,56	0,29961	0,00039	0,04089	0,25911	29,6	0,2587
	5	3,74	0,95	0,29961	0,00039	0,05511	0,24489	51,6	0,2445
	10	5,07	1,28	0,29961	0,00039	0,07135	0,22865	73,2	0,2283
	15	6,14	1,55	0,29961	0,00039	0,08158	0,21842	91,6	0,2180
	20	7,11	1,80	0,29961	0,00039	0,08883	0,21117	108,7	0,2108
	40	10,3	2,51	0,29961	0,00039	0,10688	0,19312	168,6	0,1927
0,500	1	1,52	0,38	0,49935	0,00065	0,05132	0,44868	19,8	0,4480
	2	2,22	0,56	0,49935	0,00065	0,06816	0,43184	29,6	0,4312
	5	3,74	0,95	0,49935	0,00065	0,09185	0,40815	51,6	0,4075
	10	5,07	1,28	0,49935	0,00065	0,11891	0,38109	73,2	0,3804
	15	6,14	1,55	0,49935	0,00065	0,13596	0,36404	91,6	0,3634
	20	7,11	1,80	0,49935	0,00065	0,14805	0,35195	108,7	0,3513
	40	10,3	2,51	0,49935	0,00065	0,17813	0,32187	168,6	0,3212

Notas: * A vazão de entrada foi calculada a partir da equação da continuidade

** A variação do volume de água na Câmara foi calculada pela diferença dos volumes obtidos após e antes do transiente hidráulico.

5.5.1 Avaliação da vazão de entrada (Q_e)

A partir dos resultados obtidos e apresentados na Tabela 9, verificou-se que as velocidades de escoamento no corpo da bomba, variaram em função das cargas de pressão na entrada, condição de contorno imposta para as simulações. Com os dados da velocidade, calculou-se as vazões de entrada a partir da equação da continuidade.

A Figura 111 apresenta a variação dos resultados da vazão em função das cargas de pressão (h) fixadas para o ponto de entrada da bomba.

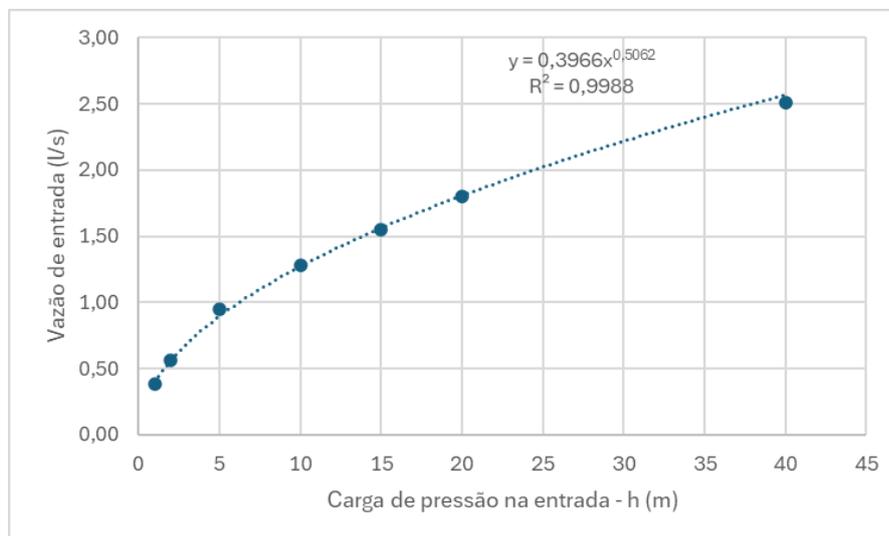
Ao analisar o comportamento da variação da vazão de entrada com a carga de pressão, determinou-se um ajuste potencial da curva, a qual assemelha-se a lei geral dos orifícios, conforme Equação (18).

$$Q_e = C_d \cdot A_e \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{\frac{1}{2}} \cong 0,000397 \cdot h^{0,5061} \quad (18)$$

Sendo C_d o coeficiente de descarga (adim.); A_e a área da seção transversal da tubulação de entrada (m^2); g a aceleração devido a gravidade (m/s^2).

Considerando que a área da seção transversal da tubulação com diâmetro de 17,95mm é de 0,000253m², resultou coeficiente de descarga (C_d) de 0,354.

Figura 111 – Variação da vazão de entrada em função da carga de pressão na entrada da bomba.



Segundo Porto (2006), o coeficiente de descarga (C_d) tem valor médio prático igual a 0,61 para orifícios circulares de parede fina, variando com a forma geométrica e dimensões.

A diferença entre o valor mencionado por Porto (2006) e o observado nas simulações podem estar relacionados à forma do orifício. Enquanto num orifício comum a forma da seção livre é circular, na bomba carneiro modelada a seção livre é toroidal, além disso, como modelo fornece a vazão de saída é possível que a perda de carga esteja influenciando a vazão liberada.

5.5.2 Verificação da Carga de Pressão na Saída (H)

As cargas de pressão obtidas para a saída da bomba (H) foram oriundas da sobrepressão resultante do transiente hidráulico. Dessa maneira, analisou-se os valores obtidos com aqueles estimados pelas equações de Joukowski e Jouguet.

Segundo Rosich (1987), a equação de Joukowski (Equação (11)) é empregada quando ocorre a rápida interrupção do fluxo; já a equação de Jouguet (Equação (12)) é empregada quando se tem a interrupção lenta do fluxo.

Antes da análise propriamente dita dos valores das sobrepressões obtidas, deve-se atentar para os conceitos de período da tubulação (T) e de celeridade da propagação das ondas de choque ao longo da tubulação (a).

Segundo Azevedo Netto (1998), a fase ou período da tubulação (T) refere-se ao tempo que a onda de sobrepressão leva para ir e voltar de uma extremidade à outra da canalização, conforme Equação (10).

Assim, quanto a interrupção do fluxo provocado, por exemplo, pelo fechamento de uma válvula, ocorre em tempo menor que o período (T), tem-se um fechamento rápido, quando se aplica a equação de Joukowski; já quando o tempo para o fechamento da válvula é superior ao período (T), tem-se o fechamento lento, quando se aplica a equação de Jouguet.

A pressão resultante devido ao transitório hidráulico é, portanto, estimada pela Equação (19):

$$P = p + \Delta H \quad (19)$$

Sendo P a pressão resultante do transiente hidráulico (mca); p é a pressão em um determinado ponto instante antes da ocorrência do transiente hidráulico (mca); ΔH é a sobrepressão ocasionada pelo transiente hidráulico (mca).

Já a velocidade de propagação das ondas de pressão, denominada celeridade pode ser estimada pela fórmula de Allievi (Equação (8)), conforme mencionado por Azevedo Netto (1998).

Nas simulações foi considerado o emprego da tubulação PEAD PE80 SDR1³ com DE20, espessura da parede e=2,3mm, Di=15,4mm.

De acordo com a ABPE (2013) estimou-se que o coeficiente K para a tubulação considerada é 130⁴. Dessa maneira, a celeridade estimada foi de 326 m/s.

Assim, para cada velocidade de entrada considerada, calculou-se as sobrepressões pelas Equações de Joukowski e Jouguet. Os resultados obtidos foram somados as pressões de entrada e calculadas as pressões máximas estimadas e comparadas com aquelas obtidas na simulação por CFD, estando os resultados apresentados na Tabela 10 e no gráfico apresentado na Figura 112.

³ Os tubos PEAD são designados pelo seu Diâmetro Externo Nominal (DE) e seu SDR (Standard Dimension Ratio) e/ou Classe de Pressão (PN) e espessura mínima (e). No caso, $SDR = DE/e$.

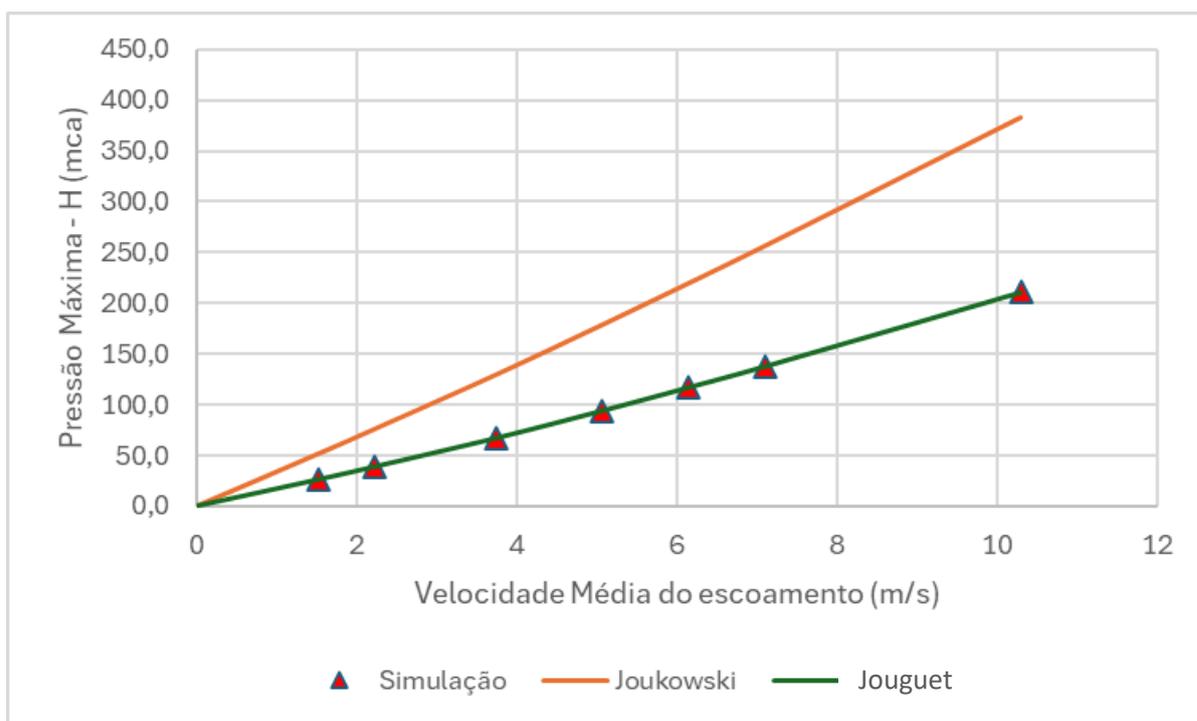
⁴ A ABPE (2013) sugere que a celeridade para tubulações PEAD seja estimada pela equação $a = \frac{10335}{\sqrt{SDR-1}}$. Assim, ao igualar-se tal equação àquela proposta por Allievi e, considerando-se os valores do diâmetro interno e da espessura, obtém-se K=130.

Tabela 10 – Valores da pressão máxima da saída obtidas pela simulação CFD e pelas Equações de Joukowski e Jouguet.

Dados de Entrada		Sobrepessão Estimada- ΔH		Pressão Máxima Resultante		Dado de saída
Carga de Pressão (mca)	Velocidade (m/s)	Joukowski (mca)	Jouguet (mca)	Joukowski (mca)	Jouguet (mca)	Carga de Pressão obtida pela Simulação - H (mca)
1,0	1,52	50,5	25,3	51,5	26,3	26,1
2,0	2,22	73,8	36,9	75,8	38,9	38,8
5,0	3,74	124,3	62,1	129,3	67,1	67,1
10,0	5,07	168,5	84,2	178,5	94,2	94,3
15,0	6,14	204,0	102,0	219,0	117,0	117,1
20,0	7,11	236,3	118,1	256,3	138,1	138,3
40,0	10,3	342,3	171,1	382,3	211,1	211,5

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 10, assim como no gráfico apresentado na Figura 112, é possível verificar visualmente a proximidade entre os resultados obtidos pela simulação em CFD com aqueles estimados pela equação de Jouguet, indicando que a bomba carneiro simulada tende a apresentar o fechamento lento da válvula de escape.

Figura 112 – Relação entre as cargas de Pressão Máximas obtidas pela simulação em CFD e pelas equações de Joukowski e Jouguet.

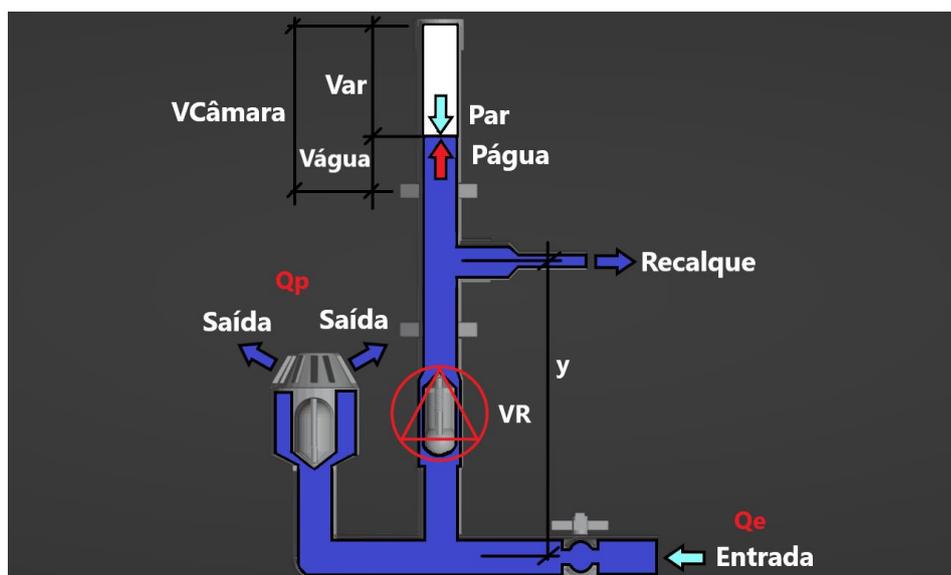


5.5.3 Verificação do Volume de Água Deslocado (V_D)

A fim de analisar o volume de água deslocado pela linha de recalque, procedeu-se a análise do volume acumulado na câmara de ar quando da ocorrência do transitório hidráulico.

A Figura 113 apresenta o desenho esquemático da bomba carneiro empregada na simulação em CFD, sendo indicada algumas grandezas características: Q_e a vazão de entrada (l/s); Q_D a vazão deslocada no recalque (l/s); Q_p a vazão perdida (l/s); $V_{Câmara}$ o volume da câmara (m^3); $V_{água}$ o volume da câmara ocupado por água (m^3); V_{ar} o volume da câmara ocupado por ar (m^3); P_{ar} a pressão exercida pelo ar no interior da câmara (mca); $P_{água}$ a pressão exercida pela água no interior da câmara (mca); y é o desnível entre o eixo da tubulação de entrada da bomba até o eixo da tubulação de saída e que representa o início da câmara (m).

Figura 113 – Desenho esquemático da bomba carneiro empregada na simulação.



A câmara de ar não possui orifício, permitindo o confinamento do ar que está inicialmente em seu interior.

Em um primeiro momento, antes do início do movimento transitório, ocorre apenas a carga de pressão (h) na entrada da bomba carneiro.

Nesse momento, a Pressão do ar (P_{ar}) se iguala a Pressão da água ($P_{água}$) no interior da câmara, mantendo em equilíbrio a interface ar-água e resultando em volumes iniciais ocupados tanto pelo ar quanto pela água no interior da câmara, conforme indicado pelas Equações (20) e (21).

$$P_{ar} = P_{\acute{a}gua}$$

$$\frac{F_{ar}}{A} = \frac{F_{\acute{a}gua}}{A} \rightarrow m_{ar} \cdot g = m_{\acute{a}gua} \cdot g$$

$$m_{ar} = m_{\acute{a}gua}$$

$$V_{ar} \cdot \rho_{ar} = V_{\acute{a}gua} \cdot \rho_{\acute{a}gua}$$

$$V_{ar} = V_{\acute{a}gua} \cdot \frac{\rho_{\acute{a}gua}}{\rho_{ar}} \quad (20)$$

Sendo $\rho_{\acute{a}gua}$ a massa específica da água (kg/m³); ρ_{ar} a massa específica do ar (kg/m³); $V_{\acute{a}gua}$ o volume da câmara ocupado por água (m³) na condição inicial; V_{ar} o volume da câmara ocupado por ar (m³) na condição inicial.

Tem-se que: $V_{c\grave{a}mara} = V_{ar} + V_{\acute{a}gua}$, assim:

$$V_{c\grave{a}mara} = V_{\acute{a}gua} \cdot \frac{\rho_{\acute{a}gua}}{\rho_{ar}} + V_{\acute{a}gua} \rightarrow V_{c\grave{a}mara} = V_{\acute{a}gua} \cdot \left(1 + \frac{\rho_{\acute{a}gua}}{\rho_{ar}}\right)$$

$$V_{\acute{a}gua} = \frac{V_{c\grave{a}mara}}{\left(1 + \frac{\rho_{\acute{a}gua}}{\rho_{ar}}\right)} \quad (21)$$

Sendo $V_{c\grave{a}mara}$ o volume da câmara (m³); ρ_{ar} a massa específica do ar (kg/m³) e $\rho_{\acute{a}gua}$ a massa específica da água (kg/m³).

Conhecido o volume da câmara de ar ($V_{c\grave{a}mara}$) e as densidades da água e do ar, é possível determinar o volume de água na câmara ($V_{\acute{a}gua}$) e, posteriormente o volume de ar na câmara (V_{ar}).

Assim, para a situação inicial, onde $P_{ar-1} = h-y$, tem-se V_{ar-1} e $V_{\acute{a}gua-1}$

O segundo momento ocorre com o movimento transitório, quando a pressão na interface ar-água na câmara de ar, é acrescida da sobrepressão proposta por Jouguet (Equação (12)).

Sendo ΔH a sobrepressão produzida pelo transitório hidráulico (mca); v a velocidade média de escoamento no corpo da bomba carneiro (m/s); a é a celeridade de propagação da onda pela linha de recalque (m/s); g é a aceleração devido a gravidade (m/s²).

Assim, a pressão da água ($P_{\text{água}}$) na interface ar-água na câmara de ar, pode ser aproximada conforme Equação (22):

$$P_{\text{água}-2} = h - y + \Delta H = h - y + \frac{v \cdot a}{2 \cdot g} \quad (22)$$

Como o ar não é um gás ideal, aplica-se a Lei dos gases politrópicos, conforme Equação (16), já o n adotado será aquele determinado por Magalhães, Arens e Porto (2003), $n=1,34$.

Assim, na ocorrência da sobrepressão, o volume de ar na câmara de ar pode ser estimado pela Equação (23):

$$\begin{aligned} \frac{P_{ar-1}}{P_{ar-2}} &= \left(\frac{V_{ar-2}}{V_{ar-1}} \right)^n \\ \frac{h - y}{h - y + \Delta H} &= \frac{(V_{ar-2})^n}{\left[V_{\text{água}} \cdot \frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_{ar}} \right]^n} \\ V_{ar-2} &= \left[V_{\text{água}} \cdot \frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_{ar}} \right] \cdot \left(\frac{h - y}{h - y + \Delta H} \right)^{\frac{1}{n}} \\ V_{ar-2} &= \left[\frac{V_{\text{câmara}}}{\left(1 + \frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_{ar}} \right)} \cdot \frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_{ar}} \right] \cdot \left(\frac{h - y}{h - y + \Delta H} \right)^{\frac{1}{n}} \end{aligned} \quad (23)$$

Sendo $V_{\text{câmara}}$ o volume da câmara (m^3); V_{ar-2} o volume de câmara ocupado pelo ar na situação do transitório (m^3); $\rho_{\text{água}}$ a massa específica da água (kg/m^3); ρ_{ar} a massa específica do ar (kg/m^3); h a carga de pressão na entrada da bomba (mca); y a distância vertical entre os eixos das tubulações de entrada e de saída; ΔH a sobrepressão produzida pelo transitório hidráulico (mca).

Já o volume de água no interior da câmara, na ocorrência do transitório, pode ser determinada pela Equação (24):

$$V_{\text{água}-2} = V_{\text{câmara}} - \left[\frac{V_{\text{câmara}}}{\left(1 + \frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_{ar}} \right)} \cdot \frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_{ar}} \right] \cdot \left(\frac{h - y}{h - y + \Delta H} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (24)$$

$$V_{\acute{a}gua-2} = V_{C\grave{a}mara} - \left[\frac{V_{C\grave{a}mara} \cdot \rho_{\acute{a}gua}}{(\rho_{ar} + \rho_{\acute{a}gua})} \right] \cdot \left(\frac{h - y}{h - y + \Delta H} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$V_{\acute{a}gua-2} = V_{C\grave{a}mara} \cdot \left[1 - \frac{\rho_{\acute{a}gua}}{(\rho_{ar} + \rho_{\acute{a}gua})} \cdot \left(\frac{h - y}{h - y + \Delta H} \right)^{\frac{1}{n}} \right]$$

Sendo $V_{C\grave{a}mara}$ o volume da c\^amara (m^3); V_{ar-2} o volume de c\^amara ocupado pelo ar na situa\c{c}\~ao do transit\~orio (m^3); $\rho_{\acute{a}gua}$ a massa espec\^fica da \c{a}gua (kg/m^3); ρ_{ar} a massa espec\^fica do ar (kg/m^3); h a carga de press\~ao na entrada da bomba (mca); y a dist\^ancia vertical entre os eixos das tubula\c{c}\~oes de entrada e de sa\^ida; ΔH a sobrepress\~ao produzida pelo transit\~orio hidr\~aulico (mca).

Ap\~os o movimento transit\~orio, ocorre a expans\~ao do volume da \c{a}gua na c\^amara de ar ($V_{\acute{a}gua-2}$), retornando, na sequ\^encia, para a condi\c{c}\~ao de equil\^brio inicial com o volume ($V_{\acute{a}gua-1}$).

Com isso, o volume deslocado (V_D) entre o per\^iodo (T) da tubula\c{c}\~ao, \c{e} estimado pela Equa\c{c}\~ao (25) ou diretamente pela Equa\c{c}\~ao (26):

$$V_D = V_{\acute{a}gua-2} - V_{\acute{a}gua-1} \quad (25)$$

$$V_D = V_{C\grave{a}mara} \cdot \left[1 - \frac{\rho_{\acute{a}gua}}{(\rho_{ar} + \rho_{\acute{a}gua})} \cdot \left(\frac{h - y}{h - y + \Delta H} \right)^{\frac{1}{n}} \right] - \frac{V_{C\grave{a}mara}}{\left(1 + \frac{\rho_{\acute{a}gua}}{\rho_{ar}} \right)}$$

$$V_D = V_{C\grave{a}mara} \cdot \left[1 - \frac{\rho_{\acute{a}gua}}{(\rho_{ar} + \rho_{\acute{a}gua})} \cdot \left(\frac{h - y}{h - y + \Delta H} \right)^{\frac{1}{n}} - \frac{\rho_{ar}}{(\rho_{ar} + \rho_{\acute{a}gua})} \right] \quad (26)$$

Sendo V_D o volume de \c{a}gua deslocado durante o per\^iodo (T) da tubula\c{c}\~ao (m^3); $V_{C\grave{a}mara}$ o volume da c\^amara (m^3); $\rho_{\acute{a}gua}$ a massa espec\^fica da \c{a}gua (kg/m^3); ρ_{ar} a massa espec\^fica do ar (kg/m^3); h a carga de press\~ao na entrada da bomba (mca); y a dist\^ancia vertical entre os eixos das tubula\c{c}\~oes de entrada e de sa\^ida; ΔH a sobrepress\~ao produzida pelo transit\~orio hidr\~aulico (mca).

No entanto, deve-se lembrar que a sobrepressão ΔH é função da celeridade, o volume de ar na câmara, que afeta o volume deslocado, é função do coeficiente politrófico (n).

Dessa maneira, simulou-se um conjunto de cenários de maneira a determinar o volume de água deslocado, variando o volume da câmara ($V_{Câmara}$), a celeridade (a), o coeficiente politrófico (n), e a relação entre as cargas de pressão de saída e de entrada (R), estando os resultados apresentados nas Tabela 11, Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14, assim como nas Figura 114, Figura 115 e Figura 116.

Como o valor de y , que representa a distância vertical entre os eixos das tubulações de entrada e saída do carneiro hidráulico é muito menor que os valores h e ΔH , a Equação (26) pode ser simplificada, conforme Equação (27).

$$V_D = V_{Câmara} \cdot \left[1 - \frac{\rho_{água}}{(\rho_{ar} + \rho_{água})} \cdot \left(\frac{h}{h + \Delta H} \right)^{\frac{1}{n}} - \frac{\rho_{ar}}{(\rho_{ar} + \rho_{água})} \right] \quad (27)$$

Sendo V_D o volume de água deslocado durante o período (T) da tubulação (m^3); $V_{Câmara}$ o volume da câmara (m^3); $\rho_{água}$ a massa específica da água (kg/m^3); ρ_{ar} a massa específica do ar (kg/m^3); h a carga de pressão na entrada da bomba (mca); ΔH a sobrepressão produzida pelo transitório hidráulico (mca).

Ao observar os resultados dos volumes deslocados apresentados nas Tabela 11 a Tabela 14, percebeu-se que:

- a) Quanto maior o volume da câmara ($V_{Câmara}$) maior o volume deslocado;
- b) Há aumento do volume deslocado com o aumento da relação (R) entre a carga de pressão de saída e a de entrada;
- c) O volume deslocado tende a uma assíntota quando a relação R é maior que 25.
- d) Quanto maior a celeridade (a) maior é carga de pressão na saída e, conseqüentemente, maior é a relação R .
- e) Quanto menor o coeficiente politrófico (n) maior é o volume de água deslocado.

A partir dessas observações iniciais e com os dados simulados constantes das Tabela 11, Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14, procedeu-se ao tratamento estatístico e encontrou-se a Equação (28) que representa o Volume Deslocado de água (V_D) em função das variáveis Volume da Câmara ($V_{Câmara}$), celeridade (a), Relação entre a carga de pressão na saída e na entrada (R) e coeficiente politrófico (n).

$$V_D = \alpha \cdot V_{\text{Câmara}} \cdot R^{\beta \cdot \gamma} \quad (28)$$

Sendo:

$$\alpha = (1,0761 - 0,3825 \cdot n) \cdot (0,82762 + 0,0005497 \cdot a)$$

$$\beta = (-142,82 \cdot n^2 + 297,73 \cdot n - 122,52)$$

$$\gamma = a^{(1,1 \cdot n^2 - 2,095 \cdot n + 0,006)}$$

V_D o volume deslocado de água (l); $V_{\text{Câmara}}$ o volume da Câmara (l).

Assim, considerando-se $V_{\text{Câmara}} = 0,267 \text{ l}$, coeficiente politrópico $n = 1,4$ e celeridade $a = 326,6 \text{ m/s}$, tem-se:

$$\alpha = (1,0761 - 0,3825 \cdot 1,4) \cdot (0,82762 + 0,0005497 \cdot 326,6) = 0,544$$

$$\beta = (-142,82 \cdot 1,4^2 + 297,73 \cdot 1,4 - 122,52) = 14,37$$

$$\gamma = 326,6^{(1,1 \cdot 1,4^2 - 2,095 \cdot 1,4 + 0,006)} = 0,0115$$

$$V_D = 0,544 \cdot 0,267 \cdot R^{14,37 \cdot 0,0115} = 0,145 \cdot R^{0,1653}$$

A Figura 117 apresenta o gráfico da variação do volume deslocado em função das relações R de carga de pressão da saída e entrada previstos pela Equação (28), nas condições impostas, e os valores obtidos pela simulação do modelo em CFD.

Tabela 11 – Valores dos volumes deslocados (V_D) obtidos por simulação, para câmara de 0,200l. variando a celeridade, o coeficiente politrópico e a relação entre a pressão de saída e a de entrada.

$V_{câmara}$ (l)	Celeridade (a) (m/s)	Coeficiente politrópico (n)	$R = \frac{h - y + \Delta H}{h - y}$	V_D (l)
0,200	326,6	1,4	26	0,18290
			19	0,17729
			13	0,16931
			9	0,16005
			8	0,15412
			7	0,14988
		5	0,13913	
		1,2	26	0,18859
			19	0,18414
			13	0,17750
			9	0,16942
			8	0,16407
			7	0,16017
		1,0	26	0,19348
			19	0,19038
			13	0,18540
			9	0,17894
			8	0,17447
	7		0,17112	
	369,5	1,4	5	0,16213
			29	0,18428
			22	0,17910
			15	0,17171
			11	0,16308
			9	0,15753
		1,2	8	0,15353
			6	0,14336
			29	0,18965
			22	0,18560
			15	0,17953
			11	0,17210
		1,0	9	0,16716
			8	0,16353
			6	0,15408
			29	0,19418
			22	0,19142
			15	0,18696
	761,9	1,4	11	0,18113
			9	0,17707
			8	0,17401
			6	0,16575
			60	0,19042
			44	0,18724
		1,2	30	0,18262
			21	0,17710
			17	0,17346
			15	0,17080
			11	0,16384
60			0,19415	
1		44	0,19187	
		30	0,18837	
		21	0,18399	
		17	0,18100	
		15	0,17877	
		11	0,17277	
60	0,19701			
44	0,19562			
30	0,19333			
21	0,19026			
17	0,18806			
15	0,18638			
11	0,18167			

Tabela 12 – Valores dos volumes deslocados (V_D) obtidos por simulação, para câmara de 0,2671. variando a celeridade, o coeficiente politrópico e a relação entre a pressão de saída e a de entrada.

$V_{câmara}$ (l)	Celeridade (a) (m/s)	Coeficiente politrópico (n)	$R = \frac{h - y + \Delta H}{h - y}$	V_D (l)	
0,267	326,6	1,4	26	0,24417	
			19	0,23668	
			13	0,22603	
			9	0,21366	
			8	0,20575	
		7	0,20008		
		5	0,18575		
		1,2	26	0,25176	
			19	0,24583	
			13	0,23696	
			9	0,22617	
			8	0,21904	
		1,0	7	0,21383	
			5	0,20033	
			26	0,25829	
	19		0,25415		
	13		0,24751		
	369,5	1,4	9	0,23889	
			8	0,23292	
			7	0,22844	
			5	0,21644	
			29	0,24601	
		1,2	22	0,23910	
			15	0,22923	
			11	0,21771	
			9	0,21030	
			8	0,20496	
		1,0	6	0,19139	
			29	0,25318	
			22	0,24778	
			15	0,23968	
			11	0,22976	
	761,9	1,4	9	0,22316	
			8	0,21832	
			6	0,20570	
			29	0,25924	
			22	0,25554	
		1,2	15	0,24959	
			11	0,24181	
			9	0,23639	
			8	0,23230	
			6	0,22128	
		1	1,4	60	0,25422
				44	0,24997
				30	0,24380
				21	0,23642
				17	0,23157
	1,2		15	0,22802	
11			0,21873		
60			0,25919		
44			0,25614		
30			0,25148		
1	21		0,24562		
	17		0,24163		
	15		0,23865		
	11		0,23065		
	60		0,26300		
	1	44	0,26115		
		30	0,25810		
		21	0,25400		
		17	0,25107		
		15	0,24881		
			11	0,24253	

Tabela 13 – Valores dos volumes deslocados (V_D) obtidos por simulação, para câmara de 0,300l. variando a celeridade, o coeficiente politrópico e a relação entre a pressão de saída e a de entrada.

$V_{câmara}$ (l)	Celeridade (a) (m/s)	Coeficiente politrópico (n)	$R = \frac{h - y + \Delta H}{h - y}$	V_D (l)
0,300	326,6	1,4	26	0,27435
			19	0,26594
			13	0,25396
			9	0,24007
			8	0,23118
			7	0,22481
		5	0,20870	
		1,2	26	0,28288
			19	0,27622
			13	0,26625
			9	0,25413
			8	0,24611
			7	0,24026
		1,0	5	0,22509
			26	0,29022
			19	0,28556
			13	0,27810
			9	0,26841
	8		0,26171	
	369,5	1,4	7	0,25667
			5	0,24319
			29	0,27642
			22	0,26866
			15	0,25756
			11	0,24462
		1,2	9	0,23629
			8	0,23030
			6	0,21505
			29	0,28447
			22	0,27841
			15	0,26930
		1,0	11	0,25815
			9	0,25074
			8	0,24530
			6	0,23112
			29	0,29128
			22	0,28713
	761,9	1,4	15	0,28044
			11	0,27170
			9	0,26561
			8	0,26102
			6	0,24863
			60	0,28564
		1,2	44	0,28086
			30	0,27393
			21	0,26564
			17	0,26019
			15	0,25620
11			0,24577	
1		60	0,29123	
		44	0,28780	
		30	0,28256	
		21	0,27598	
		17	0,27150	
		15	0,26815	
1	11	0,25916		
	60	0,29551		
	44	0,29342		
	30	0,29000		
	21	0,28539		
	17	0,28210		
1	15	0,27956		
	11	0,27251		

Tabela 14 – Valores dos volumes deslocados (V_D) obtidos por simulação, para câmara de 0,500l. variando a celeridade, o coeficiente politrópico e a relação entre a pressão de saída e a de entrada.

$V_{câmara}$ (l)	Celeridade (a) (m/s)	Coeficiente politrópico (n)	$R = \frac{h - y + \Delta H}{h - y}$	V_D (l)
0,500	326,6	1,4	26	0,45724
			19	0,44323
			13	0,42327
			9	0,40012
			8	0,38531
			7	0,37469
		5	0,34784	
		1,2	26	0,47147
			19	0,46036
			13	0,44375
			9	0,42355
			8	0,41019
			7	0,40043
		1,0	5	0,37515
			26	0,48369
			19	0,47594
			13	0,46351
			9	0,44736
	8		0,43618	
	369,5	1,4	7	0,42779
			5	0,40532
			29	0,46070
			22	0,44776
			15	0,42927
			11	0,40769
		1,2	9	0,39382
			8	0,38383
			6	0,35841
			29	0,47412
			22	0,46401
			15	0,44883
		1,0	11	0,43025
			9	0,41790
			8	0,40884
			6	0,38520
			29	0,48546
			22	0,47854
	761,9	1,4	15	0,46740
			11	0,45283
			9	0,44268
			8	0,43503
			6	0,41438
			60	0,47606
		1,2	44	0,46810
			30	0,45655
			21	0,44274
			17	0,43365
			15	0,42700
11			0,40961	
1		60	0,48538	
		44	0,47966	
		30	0,47093	
		21	0,45997	
		17	0,45249	
		15	0,44691	
	1	11	0,43194	
		60	0,49252	
		44	0,48904	
		30	0,48333	
		21	0,47565	
		17	0,47016	
		15	0,46594	
		11	0,45418	

Figura 114 – Variação do Volume Deslocado (VD) em função da relação entre as cargas de pressão na saída e na entrada, para $n=1,4$.

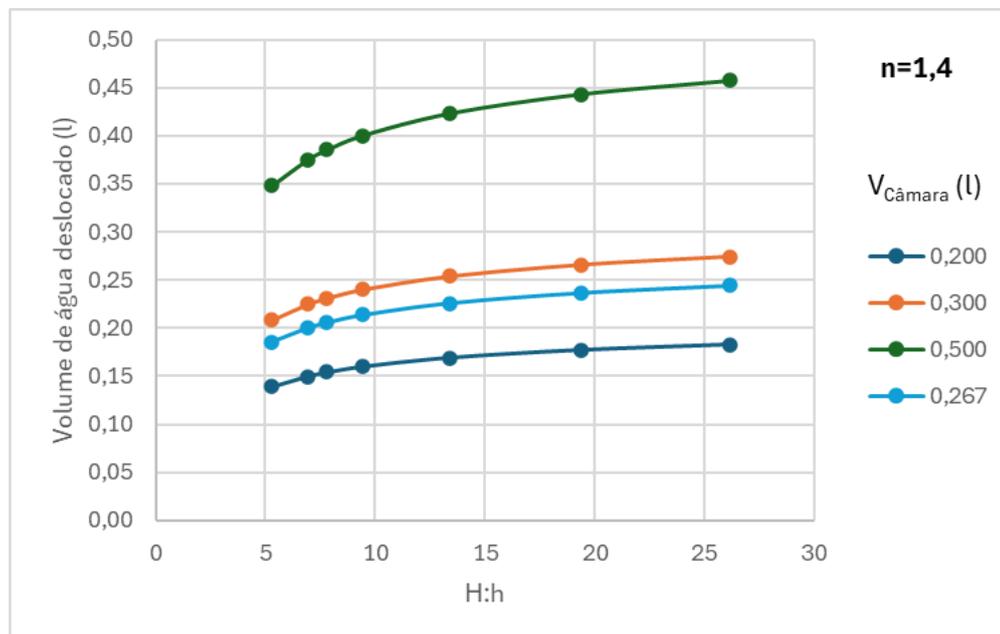


Figura 115 – Variação do Volume Deslocado (VD) em função da relação entre as cargas de pressão na saída e na entrada, para $n=1,2$.

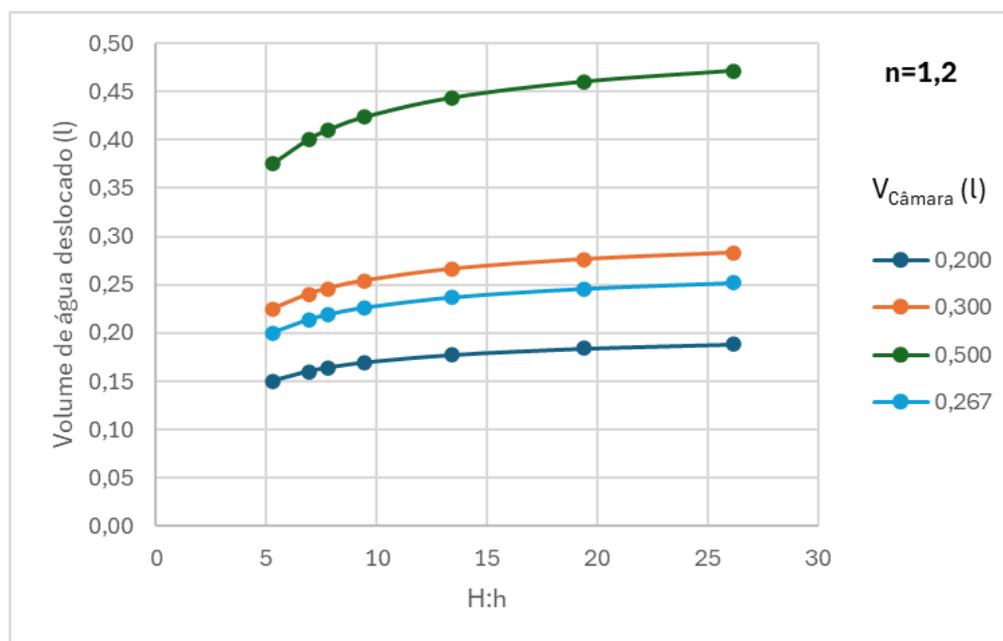


Figura 116 – Variação do Volume Deslocado (VD) em função da relação entre as cargas de pressão na saída e na entrada, para $n=1,0$.

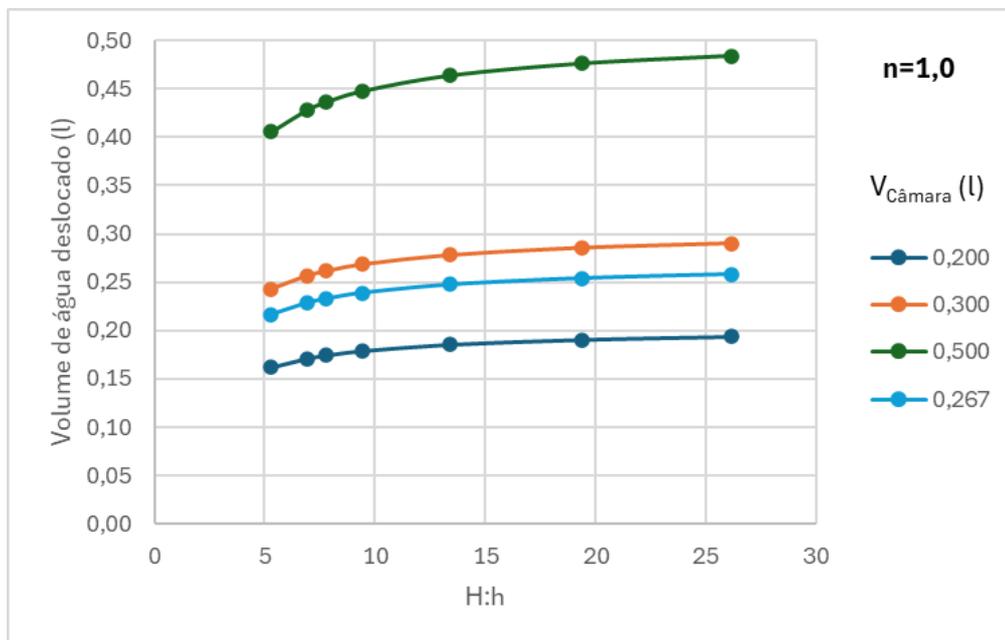
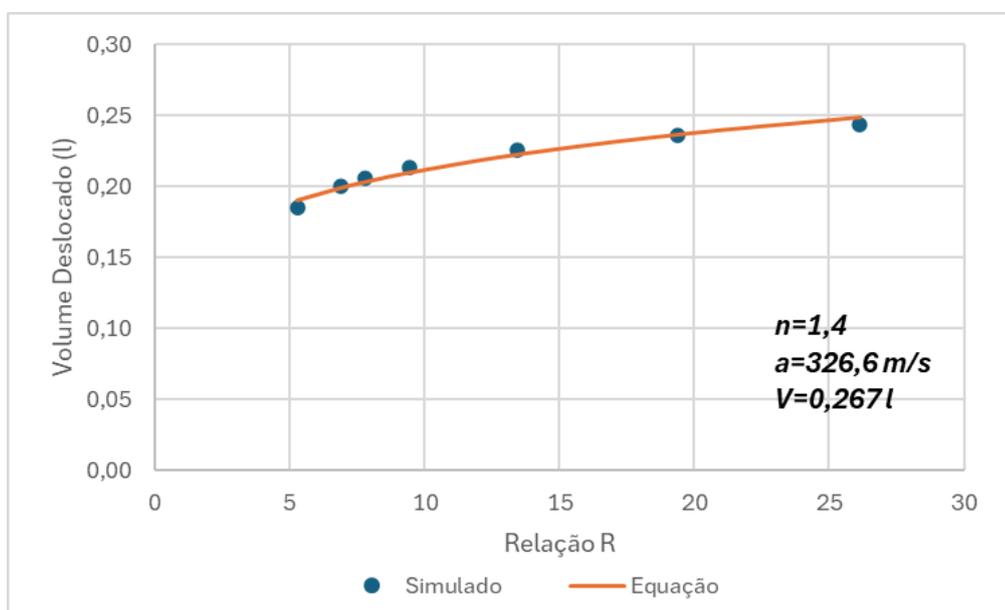


Figura 117 – Ajuste da curva de predição do volume deslocado em relação aos valores obtidos por simulação CFD.



5.5.4 Verificação da Vazão Média Descarregada (Q_D)

Em cada período da tubulação o volume deslocado (V_D) é transportado para fora da linha de recalque.

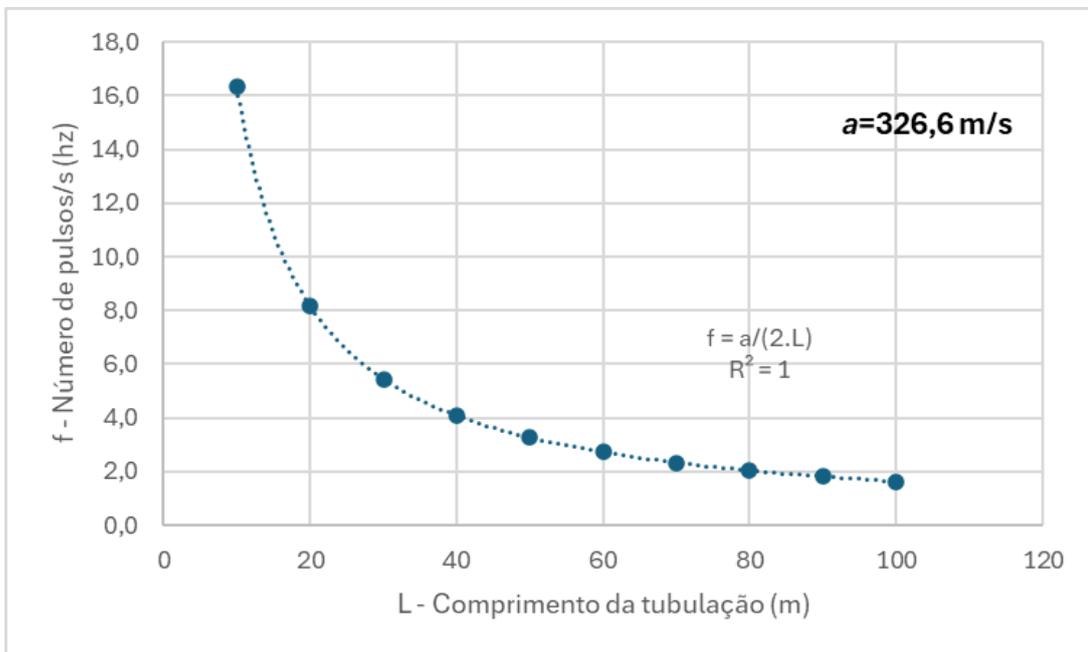
Então, a frequência de ocorrência do período da tubulação representa o número de vezes que o volume deslocado ocorre por unidade de tempo, podendo ser estimada pela Equação (29):

$$F = \frac{1}{T} = \frac{a}{2 \cdot L} \quad (29)$$

Sendo F a frequência (1/s); T o período da tubulação (s); a a celeridade de propagação da onda de impacto (m/s); L o comprimento da linha de recalque (m).

A Figura 118 apresenta a relação entre o número de pulsos e a celeridade (a) e o comprimento da linha de recalque (L).

Figura 118 – Relação da frequência de pulsos com a celeridade (a) e o comprimento da linha de recalque (L).



Com isso, a vazão média de descarga pode ser estimada pela Equação (30):

$$Q_D = F \cdot V_D \quad (30)$$

Sendo Q_D a vazão média de descarga (m^3/s); F a frequência com que ocorrer o período da tubulação (1/s); V_D o volume de água deslocado (m^3/s).

5.5.5 Verificação Da Condição De Não Esvaziamento Da Câmara – Comprimento Mínimo Da Linha De Recalque

Para que não ocorra o esvaziamento completo da câmara, a vazão de descarga (Q_D) não pode ser superior a vazão de entrada (Q_e). Assim, tem-se:

$$\frac{Q_D}{Q_e} \leq 1,0$$

$$\frac{F \cdot V_D}{Q_e} \leq 1,0$$

$$\frac{\left(\frac{a}{2 \cdot L}\right) \cdot V_D}{Q_e} \leq 1,0$$

Dessa maneira, a linha de recalque deve ter um comprimento mínimo estabelecido pela Equação (31):

$$L_{min} \geq \frac{a \cdot V_D}{2 \cdot Q_e} \quad (31)$$

Sendo L_{min} o comprimento da linha de recalque (m); a a celeridade (m/s); V_D o volume de água deslocado (l); Q_e a vazão de entrada (l/s).

Assim, caso o comprimento da linha de recalque seja muito pequeno, o período da tubulação tende a ser pequeno, gerando sobrepressão maior, compatível com a equação de Joukowski, maior volume deslocado e, com isso, vazão de saída maior que a vazão de entrada, esvaziando a câmara de ar e desestabilizando o sistema.

Dessa maneira, considerando que o volume de água deslocado é função da relação (R) entre a carga de pressão na saída e a carga de pressão na entrada do carneiro hidráulico, e da celeridade (a), para cada par de valores (a, R) há um comprimento mínimo (L_{min}) para a linha de recalque.

Azevedo Netto (1998) conforme a Tabela 1 trouxe uma relação de comprimento mínimo para os carneiros hidráulicos, os valores apresentados indicam limites para o comprimento da linha de recalque, considerando a relação entre (L), (H) e (h). No primeiro caso, ao dividir (5) por (1,2), obtém-se aproximadamente 4,17, estabelecendo que o comprimento mínimo (L_{min}) deve ser maior ou igual a 4,17 vezes a altura de elevação (H), conforme a condição ($L \geq 1,2H$). Similarmente, ao dividir (10) por (1,2), resulta em aproximadamente 8,33, indicando que o comprimento não deve ultrapassar 8,33 vezes a altura de queda disponível (h), de acordo com a condição ($L < 10h$).

A Equação (31) obtida traz uma relação entre o comprimento da linha de recalque (L_{min}) com a celeridade (a), o volume de água deslocado (VD) e a vazão de entrada (Q_e). Para a diferença entre os dois parâmetros discutidos (Tabela 1 e Equação (31)), pode-se conjecturar que os valores obtidos por Azevedo Netto (1998) durante seus estudos sejam únicos e

específicos para uma bomba da fabricante Companhia Lidgerwood Industrial com um volume de câmara conhecido e que não foi por ele apresentado.

5.5.6 Verificação da Eficiência da Bomba Carneiro

Conforme mencionado anteriormente, a vazão deslocada deve ser menor que a vazão de entrada. Dessa maneira, a vazão não bombeada é dada pelo balanço volumétrico expresso pela Equação (33):

$$Q_p = Q_e - Q_D \quad (32)$$

Sendo Q_p a vazão não bombeada (m^3/s); Q_e a vazão de entrada (m^3/s); e Q_D a vazão média recalçada (m^3/s).

A eficiência da bomba é estimada pela Equação (33):

$$\varepsilon = \frac{Q_D}{Q_e} \quad (33)$$

Sendo ε a eficiência da bomba (dec.); Q_D a vazão recalçada (m^3/s); Q_e a vazão de entrada (m^3/s).

5.5.7 Proposta para Escolha, Construção da Curva e Avaliação de uma Bomba Carneiro

O processo de escolha do carneiro hidráulico pode resultar em dois caminhos diferentes, um sendo a especificação das características básicas da bomba para uma determinada vazão esperada, e outro sendo a avaliação do volume deslocado por pulso.

A Figura 119 ilustra empregando um fluxograma, os possíveis passos para a construção da curva da bomba, escolha da curva ou para a avaliação do carneiro hidráulico.

5.5.7.1 Construção da Curva Característica

Ao longo do período da revisão bibliográfica e da análise sistêmica da literatura, percebeu-se a ausência da disponibilização de manuais ou catálogos dos carneiros hidráulicos. Dessa maneira, a construção da curva característica do carneiro hidráulico tem um apelo maior para o fabricante.

O funcionamento da bomba depende, entre outros, da carga hidráulica na entrada da bomba (h); dos diâmetros interno de entrada ($\emptyset_{\text{entrada}}$) e de saída ($\emptyset_{\text{saída}}$) da bomba; da celeridade (a) ou da constante que leva em conta o módulo de elasticidade do material (K), do

volume da Câmara ($V_{\text{Câmara}}$), e do comprimento mínimo da linha de recalque (L_{min}). Tais parâmetros devem constar do gráfico da curva da bomba, assim como a rotação ou o diâmetro do rotor constam das curvas características de bombas centrífugas.

A partir desses parâmetros é possível estimar a vazão de entrada (Q_e) e, assumindo que a eficiência seja 100%, impor seu valor também a vazão de saída (Q_s).

Admitindo que o fator R varia de 5 a 60 vezes o valor da carga de pressão da entrada, tem-se, para cada valor de R, a pressão de saída (H), o volume deslocado por pulso (V_D) e o comprimento mínimo da linha de recalque. No entanto, a carga de pressão na saída do carneiro hidráulico deve ser maior que a altura manométrica no recalque, conforme Equação (34):

$$2 \cdot g \cdot (h - Hg) + a \cdot v_s > v_s^2 \cdot \left(f \cdot \frac{L}{\phi_{\text{recalque}}} + 1 \right) \quad (34)$$

Sendo g a aceleração devido a gravidade (m/s^2); h a carga de pressão na entrada da bomba (mca); Hg o desnível geométrico entre a bomba e o ponto final da linha de recalque (m); a a celeridade (m/s); v_s a velocidade média de escoamento na linha de recalque (m/s); f o coeficiente de atrito da linha de recalque (adim.); L o comprimento da linha de recalque (m); ϕ_{recalque} o diâmetro interno da linha de recalque (m).

5.5.7.2 Escolha do volume de uma Câmara a partir de curvas existentes

Apesar de não ser comum o fornecimento de curvas características de bombas carneiros pelos fabricantes, descreveu-se o procedimento de escolha do volume da câmara desde que conhecida a vazão objeto ou vazão desejada.

A partir do valor da vazão desejada e do comprimento da linha de recalque, calcula-se a perda de carga distribuída acrescida da perda de carga localizada referente à saída da tubulação, estimando-se assim a pressão de saída necessária.

Calculada a celeridade (a), estima-se o volume deslocado assumindo que o mesmo seja a vazão desejada dividida pela frequência (F).

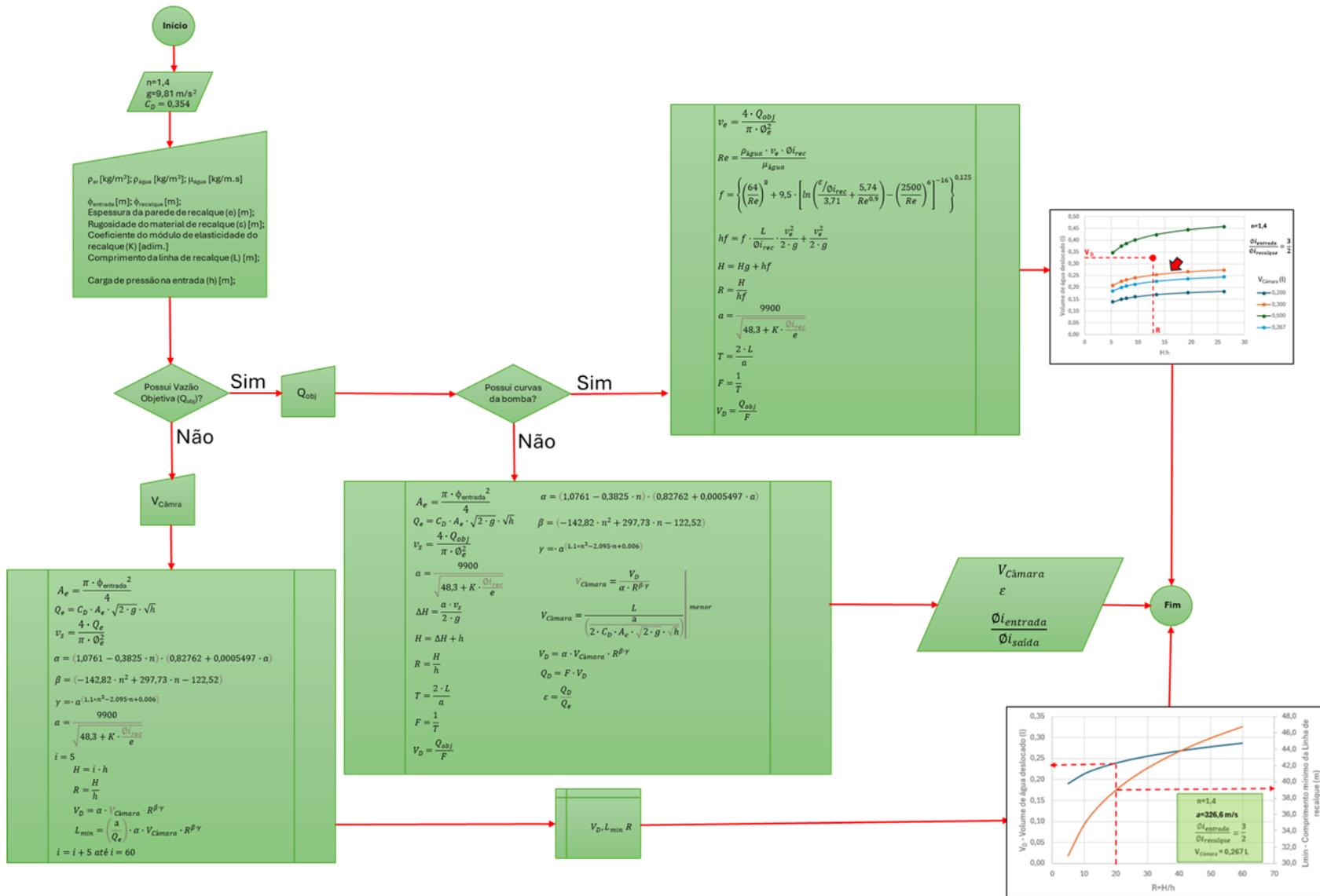
Pelo gráfico da bomba, determina-se o ponto ($V_D \times R$), escolhendo a curva característica do Volume de Câmara imediatamente abaixo do ponto, de maneira a garantir que o volume de água no interior da câmara não se extinga.

5.5.7.3 Determinação do volume da Câmara para uma vazão específica

A partir da carga de pressão (h) na entrada da bomba, estima-se a vazão de entrada (Q_e). Fixada uma determinada vazão desejada (Q_{obj}) menor que a vazão de entrada (Q_e), determina-se a velocidade média do escoamento na saída, a celeridade e a sobrepressão, com a qual calcula-se a pressão de saída (H).

O volume deslocado (V_D) é estimado considerando-se a vazão desejada (Q_{obj}) e a frequência com que ocorrem os pulsos (F). Com a relação R e o volume deslocado (V_D) estabelecidos, determina-se o volume necessário para a câmara ($V_{Câmara}$) e a eficiência da bomba.

Figura 119 – Fluxograma para construção da curva, determinação do volume da câmara ou escolha do volume da câmara.



6 CONCLUSÕES

A análise bibliométrica apresentou resultados interessantes, quando utilizado o VOSViewer, o estudo foi capaz de mostrar que os termos em pesquisa tinham uma forte relação com as energias renováveis. O Bibliometrix e o software R puderam demonstrar que, embora os artigos tenham sido escritos desde 1966, só recentemente se popularizou a produção, no entanto ela ainda não é considerável. Isso pode ser verificado pelo número de resultados exibidos na *Web of Science*, máximo de 75, e pelo baixo percentual de autores mais relevantes.

Ainda assim, a análise demonstrou que o assunto em estudo é muito relevante para o momento, devido ao seu caráter sustentável, além da existência de uma população rural com pouco ou nenhum acesso à energia elétrica, que também precisam de abastecimento de água. Por fim, verificou-se a ausência de estudos relacionados à agronomia, área agrícola e ao desenvolvimento de modelos de bombas carneiro de baixo custo, também foi apontada a necessidade de novas pesquisas aplicando tecnologias existentes, como modelos CFD, para obter dados relevantes, ou aprimorar projetos atuais da bomba. Com isso, a análise bibliométrica justificou a pesquisa em questão.

Em relação à construção do modelo do carneiro, mais especificamente o desenho em 3D e a construção da malha, durante esse processo verificou-se que ele emprega uma grande quantidade de tempo, causada pela complexidade do equipamento e pela necessidade de constantes ajustes da malha. Devido a esse ponto, viu-se necessidade de mudança de software para execução das simulações, do *OpenFOAM* para o *Ansys Discovery 2023*, a malha gerada não era convertida adequadamente para a leitura e execução no *OpenFOAM*.

Já as simulações executadas no software *Ansys Discovery 2023*, destaca-se a necessidade de construção de quatro malhas diferentes, onde existia uma variação em relação a abertura e fechamento das válvulas. Com base nas malhas foram definidos quatro cenários para executar sete simulações, nos cenários havia uma variação do volume da Câmara de Ar (20, 50, 80 e 99%) e para as simulações existia uma variação na Carga de Pressão na entrada da bomba (1, 2, 5, 10, 15, 20 e 40 mca). Portanto, foi possível aplicar técnicas de CFD na modelagem de fluxo interno de uma bomba carneiro.

Com os resultados obtidos pelas simulações:

- A vazão de entrada no carneiro hidráulico é proporcional a raiz quadrada da carga de pressão na entrada da bomba.

- A vazão de recalque é obrigatoriamente menor que a vazão de entrada.
- A vazão de recalque no carneiro hidráulico ocorre com deslocamento positivo e não continuamente.
- O volume de água deslocado é tão maior quanto maior for a câmara de ar.
- Quanto maior a relação (R) entre a carga de pressão na saída e a carga de pressão na entrada, maior será o volume de água deslocado, tendendo, porém a um volume constante quando a relação R é maior que 25.
- Para cada par de valores entre a celeridade e a relação entre a carga de pressão na saída e na entrada do carneiro hidráulico (a , R), há um comprimento mínimo (L_{min}) para a linha de recalque.

Por fim, destaca-se que durante o estudo não foi construído um modelo físico do carneiro hidráulico, ou seja, recomenda-se estudos futuros que realizem a construção do carneiro para assim validar o estudo teórico aqui apresentado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABATE, C.; BOTREL, T. A. Carneiro hidráulico com tubulação de alimentação em aço galvanizado e em PVC. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.59, n.1, p.197-203, 2002.
- ABPE. Associação Brasileira de Tubos Poliolefinicos e Sistemas. **Manual De Boas Práticas - ABPE**. 2013. 211p. Disponível em: <<http://www.abpebrasil.com.br/cartilha/completo.pdf>>. Acesso em: 6 mai; 2024.
- ANSYS INC. **ANSYS Discovery**. 2024. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-discovery>>. Acesso em: 20 fev. 2024.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. v.4.0.3. **Journal of Informetrics**, v.11, n. 4, p. 959-975, 2017. Disponível em: <<https://vps.fmvz.usp.br/CRAN/>>. Acesso em: 26 nov. 2020.
- ASVAPOOSITKUL, W; JURUTA, J; TABTIMHIN, N; LIMPONGSA, Y. Determination of Hydraulic Ram Pump Performance: Experimental Results. **Advances in Civil Engineering**. v. 2019, 2019. DOI: 10.1155/2019/9702183.
- AZEVEDO NETTO, José Martiniano de. **Manual de hidráulica**. Coordenação Roberto de Araújo, coautores Miguel Fernandez y Fernandez, Acácio Eiji Ito. 8ª edição. São Paulo: Edgard Blucher, 1998, 669 p.
- BARRETO, A. C.; LIMA, L. **Revista Globo Rural**. 31.ed. São Paulo: Globo, 1997. Ano 13, n.144. p.29
- BASFELD, M; MULLER, EA. The Hydraulic Ram. **Forschung Im Ingenieurwesen- Engineering Research**, v. 50, ed. 5, p. 141-147, 1984. DOI: 10.1007/BF02560600.
- BIRD, R. B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. **Fenômenos de transporte**. 2.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e científicos S.A., 2004.
- BLENDER. **About**. 2022a. Disponível em: <<https://www.blender.org/about/>>. Acesso em 20 jun. 2022.
- BLENDER. **Blender 3.3 Manual de referência**. 2022b. Disponível em: <<https://docs.blender.org/manual/pt/dev/>>. Acesso em 20 jun. 2022.

- BORGNACKE, CLAUD. **Fundamentos da termodinâmica** [livro eletrônico] / Claus Borgnakke, Richard E. Sonntag; coordenação e tradução de Roberto de Aguiar Peixoto. – São Paulo: Blucher, 2018. (Série Van Wylen) 730 p.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de saneamento**. Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. 5.ed. Brasília: Funasa, 2019a. 545 p. il.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento**. Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. 4. ed. Brasília: Funasa, 2015. 642 p. il.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Programa Nacional de Saneamento Rural**. Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. Brasília: Funasa, 2019b. 260 p.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2014**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2016. 212 p.: il.
- BRASIL. Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. **Diagnóstico dos serviços de Água e Esgoto: Visão Geral ano de referência 2020**. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento Brasília: SNIS, 2020. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2020/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2021.pdf>. Acesso em 30 mai. 2022
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. 2.ed.rev. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- BSS MÁQUINAS. Motobomba Toyama TWP50CA - Gasolina 2" x 2" - 40 mca. 2024. Disponível em: <<https://www.bssmaquinas.com.br/motobomba-toyama-twp50ca-gasolina-2x-2-40-mca.html>>. Acesso em: 14 mai. 2024.
- CARARO, D. C.; DAMASCENO, F. A; GRIFFANTE, G.; ALVARENGA, L. A. Características construtivas de um carneiro hidráulico com materiais alternativos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.4, p. 349-354, 2007.
- CARVALHO, A. L. B. **Interação Fluido-Estrutura sob Ação de Transiente Hidráulico**. 87 p. 2011. Dissertação (Mestrado Ciências – Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, 2011.

- CHAUDHRY, M. H. **Applied hydraulic transients**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1979
- COELHO, B.; ANDRADE-CAMPOS, A. Efficiency achievement in water supply systems— A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 59-84, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.010>>. Acesso em 05 jun. 2022.
- COSTA, Daniel Jadyr Leite; GALINDO, Vinícius. Análise preliminar do desempenho de um Carneiro Hidráulico para uso em bombeamento de água. *In: Jornada de Gestão e Análise Ambiental da UFSCar, São Carlos, 02-04 de outubro de 2018. São Carlos: UFSCar, 2018.*
- COSTA, RAIMUNDO NONATO TÁVORA. **Golpe de Ariete – Transiente Hidráulico**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2013. 11 p. Disponível em: <<http://www.gpeas.ufc.br/disc/hidr/aula05.pdf>>. Acesso em: 13 mai 2024.
- DIAS, A.; ANDRADE-NETO, A. V.; MILTÃO, M. S. R. A Atmosfera Terrestre: composição e estrutura. **Caderno de Física da UEFS**. v. 5. p. 21-40, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/236633175_A_Atmosfera_Terrestre_composicao_e_estrutura>. Acesso em: 14 mai. 2024.
- DOKIĆ, A.; JOVIĆ, S. Evaluation of agriculture and industry effect on economic health by ANFIS approach. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 479, p. 396-399, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.03.022>>. Acesso em: 30 nov. 2020.
- FATAHI-ALKOUHI, R.; LASHKAR-ARA, B.; KERAMAT, A. On the measurement of ram-pump power by changing in water hammer pressure wave energy. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 10, n. 4, p. 681-693, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.05.001>>. Acesso em: 30 nov. 2020.
- FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3ª ed. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002. 423 p.
- FINK, L.F. O custo da energia na obtenção de água. **Jornal da Universidade**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 22 out. 2020. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/jornal/o-custo-da-energia-na-obtencao-de-agua/>>. Acesso em: 5 jun. 2022.

- GEUZAINÉ, Christophe; REMACLE, Jean-François. **Gmsh Reference Manual**. 2022. Disponível em: < <https://gmsh.info/doc/texinfo/gmsh.pdf> >. Acesso em: 11 jul. 2022.
- GUMPENBERGER, Christian; WIELAND, Martin; GORR, Juan. Bibliometric practices and activities at the University of Vienna. **Library Management**. v.33, n.3, p. 174-183 fev. 2012. Disponível em < <https://doi.org/10.1108/01435121211217199>>. Acesso em: 30 nov. 2020.
- GUO, XL *et al.* Optimal design and performance analysis of hydraulic ram pump system. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A, **Journal of Power and Energy**, v. 232, n.7, p.841-855, 2018. DOI: 10.1177/0957650918756761.
- HATIPOGLU, Tugçen; NAKAY, Ibrahim; KOKSAL, Erhan; *et al.* Feasibility analysis of a hydraulic ram pump investment project. **Arabian Journal of Geosciences**. v. 11, n. 196, abr. 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3491-9>>. Acesso em: 25 nov. 2020.
- HOUGHTALEN, R. J.; AKAN, A. O.; HWANG, N. H. C. **Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems**. 4ª ed. New York :Pearson College Div, 2009. 472 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estimativas da População**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD**. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.
- KEMP-BENEDICT, E.; COOK, S.; ALLEN, S. L.; VOSTI, S.; LEMOALLE, J.; GIORDANO, M.; WARD, J.; KACZAN, D. Connections between poverty, water and agriculture: evidence from 10 river basins, **Water International**, v. 36, ed 1, p. 125-140, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/02508060.2011.541015>> Acesso em: 25 nov. 2020.
- KESKITALO, T. **SnappyHexMesh GUI Addon for Blender**. 2022. Disponível em: <https://github.com/tkeskita/snappyhexmesh_gui >. Acesso em 20 jun. 2022.
- KESKITALO, T. **SwiftBlock Addon for Blender**. 2020. Disponível em: <<https://github.com/tkeskita/swiftBlock>>. Acesso em 20 jun. 2022.

- KODURA, A., KUBRAK, M., STEFANEK, P., & WEINEROWSKA-BORDS, K. An Experimental Investigation of Pressure Wave Celerity During the Transient Slurry Flow. **Free Surface Flows and Transport Processes**, p. 259–269, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70914-7_16>. Acesso em: 13 mai 2024.
- LIMA, L. S. Lei de Dalton. **Revista de Ciência Elementar**. v. 3, n. 1, 2015. Disponível em: <<http://doi.org/10.24927/rce2015.093>>. Acesso em: 14 mai. 2024.
- LIVI, CELSO POHLMANN. **Fundamentos de Fenômenos de Transporte: Um texto para Cursos Básicos**. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 206 p.
- LOGATTI, B.; KELLNER, E. **Hydraulic Rams: A Bibliometric Analysis and Comprehensive Review (1966-2019)**. In: International Conference on Construction, Energy, Environment and Sustainability - CEES 2021, Coimbra, Portugal, 12-15 de outubro de 2021. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2021.
- MAGALHÃES, Carlos Augusto de Carvalho; ARENS, Hans George; PORTO, Rodrigo de Melo. Determinação Experimental do Expoente Politrópico em Sistemas Hidráulicos – Escala Piloto. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 8, n.3, p. 41-46, Jul/Set 2003.
- MAMBRETTI, S. **Water Hammer Simulations**. Southampton: WIT Press, 2014. 186 p.
- MARUMBY BOMBAS. **Carneiro Hidráulico Marumby nº 03**. 2024. Disponível em: <<https://www.marumbybombas.com.br/nossos-produtos/carneiros-hidr%C3%A1ulicos-marumby/carneiro-n%C2%BA03>>. Acesso em: 14 mai. 2024.
- MERCO COMERCIAL. **Carneiro Hidráulico nº 3 Marumby**. 2024. Disponível em: <<https://www.mercocomercial.com.br/carneiro-hidraulico-n-3-marumby>>. Acesso em: 14 mai. 2024.
- MILLS, Allan. The hydraulic ram (or impulse) pump. **Phys. Educ**. v. 49, n. 2, p. 211-214, mar. 2014. Disponível em: <<https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1088/0031-9120/49/2/211>>. Acesso em: 24 nov. 2020.
- OLIVEIRA JUNIOR, M. V.; SILVA, R. T. L. da; MOREIRA, W. K. O.; SOUZA, J. L. de; SARMENTO, C. S.; RODRIGUES, J. L. dos S. Performance of hydraulic ram built with different volumes of air chamber. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 29, p.17-27, 2021. DOI: 10.13083/reveng.v29i1.10900

- OLIVEIRA, Eva Caroline Martins. **Determinação do Coeficiente de Dispersão de um Canal para Validação de um Software de Fluidodinâmica Computacional (CFD)**. 60 p. 2017. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- OLIVEIRA, Tallis José Cardos de; SOUZA, Teófilo Miguel de. **Eficiência do carneiro hidráulico para bombeamento de água**. In: 8º Congresso de extensão universitária da UNESP, p. 1-4, 2015. Guaratinguetá: Unesp, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/142437>>. Acesso em 27 nov. 2019.
- OPENCFD. **OPENFOAM**. 2019. Disponível em: <<https://www.openfoam.com/>>. Acesso em 3 dez. 2019.
- PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. 540p.: il.
- RENNIE, LC; BUNT, EA. The Automatic Hydraulic Ram – Experimental Results. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A - **Journal of Power and Energy**, v. 204, ed. 1, p. 23-31, 1990. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1990_204_005_02.
- ROBERTS, A.; THOMAS, B.; SEWELL, P.; HOARE, E. Generating renewable power from water hammer pressure surges. **Renewable Energy**. v. 134, p. 1392-1399, abr. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.006>>. Acesso em: 30 nov. 2020.
- ROSICH, Enrique Mendiluce. **El Golpe de Ariete em Impulsiones**. 2ª edición. Madrid: Bellisco Libreria Editorial, 1987. 190p.
- SADREHAGHIGHI, Ideen. **Mesh Generation in CFD**. 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/318456955_Mesh_Generation_in_CFD>. Acesso em: 11 jul. 2022.
- SAFDARI, ARMAN. **Export STL OpenFOAM**. 2021. Disponível em: <https://github.com/armansafdari/export_stl_openfoam>. Acesso em: 10 mai. 2024.
- SILVA, A. M.; RÊDA, N. E. D. **Carneiro hidráulico alternativo**. Boletim Técnico. Lavras: Escola Superior de Agricultura de Lavras, 1991, 9p.
- SILVA, Mayara de Oliveira Maia. **Determinação de Equação para Coeficiente de Transferência de Massa e o Uso da Fluidodinâmica Computacional (CFD) para Canal**

- Hidráulico**. 85 p. 2017. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- SILVESTRE, Paschoal. **Hidráulica Geral**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científico Editora S. A., 1979, 316p.
- THE R FOUNDATION. **The R Project for Statistical Computing**. Vienna, Áustria: The R Foundation for Statistical Computing. 2020. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 26 nov. 2020.
- TIGRE. **Orientações para instalações de Água Fria: Água Fria Predial**. Joinville: Tigre S/A, ago. 2016. 74 p. Disponível em: <<https://tigresite.s3.amazonaws.com/2021/10/ct-agua-fria.pdf>>. Acesso em 25 mai. 2022.
- TOKMAKIDIS, K. Surveying the Eupalinian Aqueduct in Samos Island. *In*: 22nd CIPA Symposium, October 11-15, 2009, Kyoto, Japan. Kyoto: CIPA, 2009. Disponível em: <<https://www.cipaheritagedocumentation.org/wp-content/uploads/2018/12/Tokmakidis-Surveying-the-Eupalinian-Aqueduct-in-Samos-Island.pdf>>. Acesso em 27 nov. 2019.
- TOYAMA. **Motobomba Gasolina – TWP50CA**. 2024. Disponível em: <<https://toyama.com.br/produto/motobomba-gasolina-twp50ca/>>. Acesso em: 14 mai. 2024.
- VALADARES, A. **Nota Técnica N° 100: Perfil da População Rural na Pesquisa de Orçamentos Familiares de 2017 a 2018 e a Evolução dos Dados de Insegurança Alimentar – Uma Análise Preliminar**. Diretoria de Estudos e Políticas Sociais. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Brasília: IPEA, 2022. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/nota_tecnica/220128_nt_disoc_100.pdf>. Acesso em: 01° jun. 2022.
- VERSPUY, C; TIJSSELING, AS. Hydraulic Ram Analysis. **Journal of Hydraulic Research.**, v. 31, ed. 2, p. 267-278, 1993. DOI: 10.1080/00221689309498849
- VOSVIEWER. **Visualizing Scientific Landscapes**. Centre for Science and Technology Studies, Leiden University: The Netherlands, 2020. Disponível em: <<https://www.vosviewer.com/download>>. Acesso em: 24 nov. 2020.
- WHITE, Frank M. **Fluid mechanics**. 7ª ed. Nova Iorque: Mcgraw-Hill, 2011. 862 p.: il.

WYLIE, E. B.; STREETER, V. L. **Fluid Transients in Systems**. New Jersey: Prentice-Hall, 1993. 463p.

YKEDA, G.E.; BARBOSA, F.D.; DEL PINO, M. A. I. T. Pumping yield of a PVC hydraulic ram prototype. **Revista Agrogeoambiental**. v. 11, ed 1, p. 37-47, 2019. DOI: 10.18406/2316-1817v11n120191258

YOUNG, BW. Design of Hydraulic Ram Pump Systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A - **Journal of Power and Energy**, v. 209, ed. 4, p.313-322, 1995. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1995_209_010_01.