



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP**

**ESCOLA DE MINAS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



**ANGELO LUCAS SOBRINHO**

**Dimensionamento de um tubo de Venturi para geração de microbolhas a ser utilizado em skimmer doméstico**

**OURO PRETO - MG  
2019**

**ANGELO LUCAS SOBRINHO**

**angelolucas90@yahoo.com.br**

**Dimensionamento de um tubo de Venturi para geração de microbolhas a ser utilizado em skimmer doméstico**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

**Professor orientador:** Dra. Ana Maura Araújo Rocha

**OURO PRETO – MG  
2019**

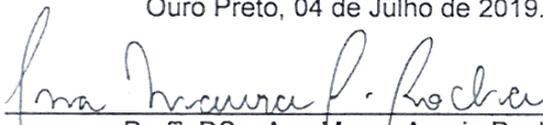


UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

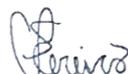
### ATA DA DEFESA

Aos 04 dias do mês de Julho de 2019, às 14h 00min, na sala 5, localizada na Escola de Minas – Campus - UFOP, foi realizada a defesa de Monografia do aluno Angelo Lucas Sobrinho, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Prof<sup>ª</sup>. DSc. Ana Maura Araujo Rocha, Prof. MSc. Sávio Sade Tayer e Prof MSc. Caio César de Souza Pereira. O candidato apresentou o trabalho intitulado: “Dimensionamento de um tubo de Venturi para geração de microbolhas a ser utilizado em skimmer doméstico”, sob orientação da Prof<sup>ª</sup>. DSc Ana Maura Araujo Rocha. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o(a) aluno(a) aprovado.

Ouro Preto, 04 de Julho de 2019.

  
\_\_\_\_\_  
Prof<sup>ª</sup>. DSc. Ana Maura Araujo Rocha  
**Professor Orientador**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. MSc. Sávio Sade Tayer  
**Professor Avaliador**

  
\_\_\_\_\_  
Prof MSc. Caio César de Souza Pereira  
**Professor Avaliador**

  
\_\_\_\_\_  
Angelo Lucas Sobrinho

**Aluno(a)**

Ao delírio

Às paixões malevolentes

Às garrafas de rum

À imensidão do mar

## AGRADECIMENTO

À minha mãe Ana Maria por todo sacrifício que fez em sua vida para que eu pudesse estudar sem jamais criticar nenhuma de minhas decisões.

À minha avó Mathilde e à minha tia Efigênia por sempre serem como segundas mães para mim.

Aos irmãos que a República Sanatório me deu e que me fizeram eu ser o que sou hoje.

Ao Juan, Sabrina e Bernardo, amigos que a engenharia mecânica me trouxe, companheiros nos momentos bons e nas bebidas ruins.

À minha orientadora Ana Maura, pelo incentivo e orientação neste trabalho.

Aos professores dos meus 2 cursos nesses 10 anos de UFOP pelos bons e maus exemplos.

Alguns professores se marcaram tanto em minha vida que, além dos conhecimentos de sala de aula, eles moldaram meu caráter e imprimiram novas ideias em meu ser. Esses professores excepcionais merecem cada uma dedicatória particular que, por ordem cronológica dos fatos, serão oferecidas abaixo:

Ao meu professor de física do ensino médio Amauri Marques, por se esforçar ao máximo para que seus alunos se tornassem muito mais do que imaginavam ser possível e por marcar em minha cabeça o maior paradoxo da educação “quem sabe faz e quem não sabe ensina” muito antes de eu entender o que era educação.

Ao meu professor de matemática financeira Jair Estanislau por me mostrar como o mundo é cruel com quem não entende seu funcionamento, a importância e relevância da fonte da pesquisa e que qualquer idiota pode escrever um livro, basta ter dinheiro suficiente para publicar. Também por ter sido o único professor a se importar de fato quando abandonei o curso de administração no último período me ligando. “Larga de ser burro, seu animal, termina essa m\*\*\*\* logo”.

Ao meu professor de economia brasileira Leo de Deus pelas conversas sinceras nos corredores do ICSA e nas reuniões do PET e por ter sido o único professor que conseguiu fazer com que eu lesse o material extra que não cairia na prova e nem sairia dado no curso. A sinceridade profissional e pessoal é uma qualidade rara, muito rara.

Ao professor de biologia Mauro Schettino pelos nossos cafés no ICEB e também por me mostrar que a ciência você pode fazer em casa, faz sem assinaturas ou permissões, se faz com seriedade, dedicação e amabilidade. Mesmo eu não sendo aluno do curso de ciências biológicas sempre estive de portas abertas para toda dúvida e ideia que eu pudesse ter. Você me tornou um cientista me mostrando como eu podia pesquisar, testar e aplicar a ciência para resolver problemas cotidianos.

Ao professor de ciência política Adriano Cerqueira por me fazer acreditar na docência quando eu já havia desistido. Você conseguiu me mostrar com a sua integridade profissional e pessoal que é possível viver a ciência e a docência em todas as esferas da vida, que é possível viver além do status quo da academia como nenhum outro professor que conheci conseguiu fazer.

A todos vocês, muito obrigado!

*“Crom, pela primeira vez eu rezo a ti, se meu ouvir me dê a vingança, se não vai para o inferno!”*”.

Conan, o bárbaro

## RESUMO

A geração de microbolhas com o uso de tubos de Venturi é um assunto cada vez mais estudado devido à sua praticidade e economia. No âmbito doméstico do uso das microbolhas, nota-se que os skimmers estão presentes em grande parte dos aquários marinhos para a realização da filtragem da água destes. Mediante esse contexto, este trabalho busca analisar, através da fluidodinâmica computacional, qual seria o modelo de tubo de Venturi mais adequado para ser usado em skimmers domésticos com vazão de 2000 litros por hora. Para tal, pretende-se fazer uma comparação da influência do diâmetro do pescoço, do ângulo de convergência e do ângulo de divergência sobre a cavitação, intensidade da turbulência e pressão do sistema. A análise da fluidodinâmica computacional foi feita utilizando-se o programa ANSYS 2019 R1 com a licença de uso de estudante. Os resultados encontrados mostraram que, um diâmetro de garganta menor que 4 mm apresenta uma contrapressão excessiva impossibilitando seu uso para o fim especificado e que ângulos menores de convergência e divergência apresentaram menor perda de carga. O Tubo de Venturi 4, que possui ângulo de convergência de  $7^\circ$  e ângulo de divergência de  $5^\circ$  foi o escolhido, devido à menor contrapressão encontrada, 134990 Pa e à maior velocidade na garganta, 14,84 m/s, características que possibilitam a formação eficiente de microbolhas, sendo este, o objetivo principal deste trabalho.

**Palavras-chave:** microbolhas, skimmers, tubo de Venturi, fluidodinâmica computacional, cavitação.

## ABSTRACT

*The generation of microbubbles with the use of Venturi tubes is an increasingly studied subject due to its practicality and economy. In the domestic scope of the use of the microbubbles, it is noticed that the skimmers are present in great part of the marine aquariums for the realization of the filtration of the water of these. In this context, this work seeks to analyze, through computational fluid dynamics, which would be the most suitable Venturi tube model to be used in domestic skimmers with a flow rate of 2000 liters per hour. To do this, we intend to compare the influence of neck diameter, convergence angle and divergence angle on cavitation, turbulence intensity and system pressure. The computational fluid dynamics analysis was performed using the ANSYS 2019 R1 program with the student use license. The results showed that a throat diameter smaller than 4 mm presents an excessive back pressure, making it impossible to use it for the specified purpose, and that smaller angles of convergence and divergence showed less loss of load. The Venturi tube 4, which has an angle of convergence of 7 ° and a divergence angle of 5 °, was chosen due to the lower back pressure found, 134990 Pa and the higher velocity in the throat, 14.84 m / s, characteristics that make possible the efficient formation of microbubbles, being this, the main objective of this work.*

**Key-words:** Venturi tube, cavitation, skimmer, microbubbles

## LISTA DE SIMBOLOS

$K_l$	Coeficiente de transferência de massa da fase líquida (m/s);
$A$	Área superficial da microbolha (m <sup>2</sup> );
$p$	Pressão parcial dos gases dissolvidos na microbolha (Pa);
$p^*$	Pressão parcial de equilíbrio da fase gasosa com os componentes dissolvidos na água
$H$	Constante de Henry.
$U$	Velocidade de ascensão;
$\rho_l$	Densidade do líquido;
$g$	Aceleração da gravidade;
$d$	Diâmetro da microbolha;
$\mu^*$	Viscosidade dinâmica do líquido.
$\Delta P$	Diferença da pressão interna da microbolha e a pressão ambiente;
$\sigma$	Tensão superficial da bolha;
$V$	Volume de gás total;
$\zeta$	Potencial Zeta
$\eta$	Viscosidade da água
$\epsilon$	Permitividade do líquido
$\mu$	Mobilidade
$C_v$	Número de cavitação;
$P_2$	Pressão na após a expansão no tubo de Venturi;
$P_k$	Produção de energia cinética da turbulência devido aos gradientes de velocidade média;

- $P_b$  Produção de energia cinética devido à força de empuxo;
- $Y_M$  Contribuições das flutuações de dilatação na compressibilidade devido à turbulência para a taxa de dissipação global;
- C Constantes do modelo ( $C_{1\varepsilon}=1,44$ ;  $C_{2\varepsilon}=1,92$ ;  $C_{3\varepsilon}=-0.33$ );
- $\sigma_k$  Número de Prandtl para k (valor igual 1,0);
- $\sigma_\varepsilon$  Número de Prandtl para  $\varepsilon$  (valor igual a 1,3);
- S Termos fontes definidos pelo usuário;
- $\bar{T}$  Temperatura média;
- $g_i$  Componente do vetor de aceleração i;
- $\beta$  Coeficiente de expansão térmica.
- $P_v$  Pressão de vapor do fluido;
- $v$  Velocidade do fluido no pescoço da constricção.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução do perfil do Venturi.....	6
Figura 2 : Estrutura da microbolha.....	7
Figura 3: Relação entre diâmetro e velocidade de ascensão das microbolhas. ....	9
Figura 4: Diferenças de comportamento de micro, macro e nanobolhas na água. ....	11
Figura 5: Tempo de vida das microbolhas. ....	12
Figura 6 Interface microbolha – líquido.....	13
Figura 7: Relação entre pH e Potencial Zeta. ....	13
Figura 8: Configuração clássica do Tubo de Venturi.....	16
Figura 9: Esquema do funcionamento de um skimmer.....	19
Figura 10: Forma de uso de um tubo de Venturi em um skimmer.....	20
Figura 11: Aquário marinho que utiliza um skimmer doméstico para filtragem. Fonte: Pesquisa direta (2019) .....	21
Figura 12: Esquema de utilização de um skimmer doméstico em um aquário. Fonte: Marine Depot (2019). ....	22
Figura 13: Comparação entre estudos numéricos e resultado experimental para diferentes vazões. ....	23
Figura 14: Variações de pressões de acordo com o modelo de tubo de Venturi.....	24
Figura 15: Variações de pressão ao longo do corpo de um tubo de Venturi.....	25
Figura 16: Abordagens Euleriana e Lagrangeana para análise de escoamentos. ....	26
Figura 17: Perfis dos Tubos de Venturi. Sendo: a) tubo de Venturi 1, b) tubo de Venturi 2, c) Tubo de Venturi 3 e d) tubo de Venturi 4.....	36
Figura 18: Resultado da pressão simuladas nos tubos de Venturi analisados. a) Tubo de Venturi 1. b) Tubo de Venturi 2. c) Tubo de Venturi 3. d) Tubo de Venturi 4.....	38
Figura 19: Resultado da velocidade simulada nos tubos de Venturi analisados. a) Tubo de Venturi 1. b) Tubo de Venturi 2. c) Tubo de Venturi 3. d) Tubo de Venturi 4.....	39

Figura 20: Resultado do coeficiente de cavitação simulados nos tubos de Venturi analisados.

a) Tubo de Venturi 1. b) Tubo de Venturi 2. c) Tubo de Venturi 3. d) Tubo de Venturi 4.....40

Figura 21: Resultado da intensidade da turbulência simuladas nos tubos de Venturi

analisados. a) Tubo de Venturi 1. b) Tubo de Venturi 2. c) Tubo de Venturi 3. d) Tubo de

Venturi 4.....41

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Variáveis e indicadores do trabalho.....	33
Tabela 2 – Perfis dos tubos de Venturi analisados .....	35
Tabela 3 – Resumo dos indicadores dos tubos de Venturi simulados.....	42

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral .....	3
1.3.2	Específicos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho .....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1	Origem da Mecânica dos Fluidos .....	5
2.2	Microbolhas .....	7
2.2.1	Estrutura das microbolhas .....	7
2.2.2	Principais propriedades das microbolhas .....	8
2.3	Geração de microbolhas .....	14
2.3.1	Método do líquido em fluxo rotacional .....	14
2.3.2	Método do misturador estático .....	14
2.3.3	Método do bico ejetor.....	15
2.3.4	Método Venturi .....	15
2.3.5	Método do ar dissolvido .....	15
2.4	Tubo de Venturi para geração de microbolhas .....	15
2.4.1	Cavitação .....	16
2.4.2	Velocidade do som no escoamento de bolhas .....	17
2.4.3	Intensidade da turbulência .....	18
2.5	Skimmers .....	18
2.6	Fluidodinâmica computacional.....	22
2.6.1	Estudo do escoamento com fluidodinâmica computacional em tubos de Venturi 22	
2.6.2	Etapas do processo de fluidodinâmica computacional .....	29
2.7	ANSYS .....	30
2.7.1	ANSYS Academic .....	31
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>32</b>
3.1	Classificação do trabalho .....	32

3.2	Materiais e métodos.....	32
3.3	Variáveis e Indicadores .....	33
3.4	Instrumento de coleta de dados .....	33
3.5	Tabulação dos dados.....	33
3.6	Considerações finais do capítulo .....	34
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>35</b>
4.1	Definição das dimensões dos venturis.....	35
4.2	Definição da malha.....	36
4.3	Definição das condições de contorno .....	37
4.4	Resultados das simulações.....	37
4.4.1	Tubo de Venturi 1.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.4.2	Tubo de Venturi 2.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.4.3	Tubo de Venturi 3.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.4.4	Tubo de Venturi 4.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.5	Análise dos resultados .....	41
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>44</b>
5.1	Conclusões.....	44
5.2	Recomendações .....	44
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>45</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Formulação do Problema

A mecânica dos fluidos é uma das grandes áreas da engenharia, tendo uma vasta gama de aplicações no mundo atual, como por exemplo, aviação, previsão do tempo, vôos espaciais, projeto de máquinas de fluxo, navios, automóveis e submarinos, etc. É pelo estudo de suas leis, que navios mais pesados que a água conseguem flutuar, represas não se rompem com o peso da água e pode-se transformar a energia potencial do fluido em energia mecânica utilizável.

Nesse cenário amplo de áreas de aplicação, uma das áreas que tem se desenvolvido nos últimos anos, é a utilização de microbolhas para desempenhar diversos processos industriais, principalmente a separação de materiais residuais (BURNS *et al.*, 1997). Assim sendo, tem-se crescido o número de estudos sobre os processos de geração dessas microbolhas, tanto na literatura nacional, como internacional.

A aplicação das microbolhas é bastante versátil devido as suas características naturais, especificamente, grande superfície específica, grande capacidade de adsorção, baixa velocidade de ascensão no fluido e alta pressão interior. (LI, 2016)

Devido a sua alta superfície específica e a pressão interna é possível uma rápida transferência de massa entre a fase gasosa e a fase líquida, característica esta, que melhora a eficiência dos sistemas de desinfecção de água por ozonização, por exemplo. A capacidade de adsorção na superfície das microbolhas é o fator de maior importância, quando se quer fazer a separação de materiais contidos na fase líquida. Por exemplo, pequenas partículas sólidas, matéria orgânica ou mesmo outros líquidos que se encontram misturados, estando aí, o grande interesse no seu uso para recuperação de minérios raros como o ouro, das plantas de mineração.

Essa grande diversidade de aplicação faz com que a indústria busque alternativas eficientes para a geração de microbolhas, o que também engloba os objetivos deste trabalho.

Há uma crescente utilização do tubo de Venturi para geração de microbolhas, que diferente de outros processos para o mesmo fim, não precisam de equipamentos suplementares. Segundo Gabbard (1972), os tubos Venturi são simples, confiáveis e livres de manutenção, o que o faz útil para usos em pequenos projetos.

Os tubos de Venturi são dispositivos onde pode-se analisar a variação de pressão e de velocidade de um fluido devido às suas variações geométricas.

O processo de geração de microbolhas em um tubo Venturi é algo complexo, dependendo do controle dos fluxos de entrada do ar no líquido e dimensões do tubo (GORDIYCHUK *et al.*, 2016). As bolhas, ao entrarem no tubo de Venturi, sofrem simultaneamente uma queda de pressão e um aumento de velocidade quando passam pela garganta. Logo após a garganta, durante a seção divergente, o fenômeno é revertido, havendo um aumento da pressão e redução da velocidade. Esse processo faz com que as bolhas sejam quebradas em microbolhas, embora o mecanismo de formação de microbolhas não esteja claramente definido (FUJIWARA *et al.*, 2007).

Partindo do que foi resumidamente explanado até aqui, o objetivo deste trabalho será buscar respostas para a seguinte pergunta:

**Qual o dimensionamento de um tubo de Venturi para a geração de microbolhas a ser utilizado em um skimmer doméstico?**

## **1.2 Justificativa**

As microbolhas são umas das ferramentas mais versáteis que existem. Elas podem ser usadas na medicina em tratamentos diversos (UNGER *et al.*, 2004), sistemas de aeração de água e tratamento de águas residuais (TERASAKA *et al.*, 2011), em sistemas de crescimento de microalgas (ZIMMERMAN *et al.*, 2011), em processos de remoção de pesticidas (IKEURA *et al.*, 2011), em processos de extração mineral (RODRIGUES; RUBIO, 2007), em processos de sequestro de gases do efeito estufa como do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (KOIDE;XUE, 2009) e em vários sistemas, onde seja necessário uma rápida transferência de massa entre gás e líquidos (DOKU *et al.*, 2003).

Devido a estas e outras utilizações das microbolhas, o estudo dos mecanismos de sua geração são de extrema importância para o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de melhorar sistemas produtivos já existentes.

Dentro das tecnologias existentes que se utilizam da geração de microbolhas através de um tubo de Venturi, estão os fracionadores de espuma, também conhecidos como *protein*

*skimmers* ou apenas *skimmer*. Esses equipamentos são utilizados para a filtragem de aquários marinhos domésticos e até em aquários públicos com milhões de litros de água salgada, sendo este o foco deste trabalho.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Geral**

O objetivo geral desse trabalho é dimensionar um Tubo de Venturi e suas condições de operação no fluxo de água de 2000 litros por hora.

### **1.3.2 Específicos**

- Dimensionar 4 “Venturis” variando parte da sua estrutura (diâmetro de entrada, estrangulamento e ângulo de saída) baseado em características de Venturis já construídos;
- Estudo teórico das velocidades e pressões usando o software ANSYS 2019 R1.

## **1.4 Estrutura do Trabalho**

Esse trabalho é dividido em 5 partes para facilitar a compreensão.

A primeira parte (explanada acima) trata da introdução, abrangendo a formulação do problema a que estamos dispostos a estudar. Dada esta contextualização, são apresentadas as justificativas que asseguram a necessidade e importância do estudo da geração de microbolhas. Também nesta primeira parte são apresentados os objetivos na sua forma geral e de maneira detalhada.

A segunda parte consta de um levantamento literário da influência ao longo dos tempos, do desenvolvimento da mecânica dos fluidos, assim como, a revisão de conceitos teóricos que explicam o funcionamento e os princípios de funcionamento do tubo de Venturi, os princípios da geração de microbolhas e as considerações sobre análise dimensional e semelhança.

A terceira parte deste trabalho apresenta as metodologias de estudos adotadas, com os respectivos materiais, métodos, indicadores, instrumentos de coleta e método de tabulação dos dados.

Na quarta parte serão apresentados os resultados do dimensionamento das variações das condições dos fluidos no tubo de Venturi, assim como, os cálculos para o dimensionamento adequado dos “Venturis” para os parâmetros propostos.

Finalmente, na quinta parte serão apresentadas as conclusões do trabalho, apontando as considerações de construção e as propostas para novos estudos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado um breve resumo da evolução da mecânica dos fluidos, focando-se em duas importantes descobertas da área, especificamente, a hidrostática e a hidrodinâmica. Apresenta ainda, as definições teóricas relevantes a este estudo, como um estudo sobre as microbolhas e suas propriedades físicas com relação ao Tubo de Venturi, análise sobre o processo de geração de microbolhas e sobre fluidodinâmica computacional (CFD - Computational Fluid Dynamics, na língua inglesa).

### 2.1 Origem da Mecânica dos Fluidos

A mecânica dos fluidos é uma das ciências mais antigas da humanidade. Um de seus primeiros tratados escritos é o livro “Sobre os Corpos Flutuantes”, de Arquimedes, datado do século III a.c., onde a “Lei do Empuxo” e os “Princípios de Flutuação” foram enunciados pela primeira vez (ROUSE & INCE,1980).

Desde então, as noções sobre os fluidos foram se aprimorando ao longo do tempo e seus princípios de funcionamento foram sendo descobertos, seus conhecimentos solidificados até a vasta aplicação destes em diversas áreas na atualidade.

Na área da mecânica dos fluidos que estuda as condições do fluido em repouso, a hidrostática, destaca-se com um dos inventos mais notáveis na área, o “acumulador hidráulico”, inventado em 1850 por Sir Willian Armstrong. Este primeiro acumulador hidráulico funcionava em uma torre de água, onde os tubos eram comprimidos à pressão de 42kgf/ cm<sup>2</sup>, fornecendo energia potencial, o suficiente, para que diversos equipamentos como guinchos e portões de docas funcionassem, em praticamente quaisquer condições de operação (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA,1998). Atualmente, existe no mercado a disponibilidade de acumuladores hidráulicos com mais de 1000 kgf/cm<sup>2</sup> (HYDAC,2018).

Já na área da mecânica dos fluidos que estuda o movimento dos fluidos, a hidrodinâmica, uma das grandes descobertas foi o “efeito Venturi”, cujo nome foi dado em homenagem ao primeiro pesquisador na área, o italiano Giovanni Battista Venturi. O efeito Venturi é o fenômeno decorrente da passagem de um fluido por um estrangulamento, promovendo a redução de pressão (ROUSE & INCE,1980).

Giovanni Venturi também desenvolveu o tubo de Venturi para medir as variações de velocidades e pressões que o fluido sofre, quando são alteradas as dimensões do tubo (ROUSE & INCE,1980).

A Figura 1 ilustra a evolução do tubo de Venturi.

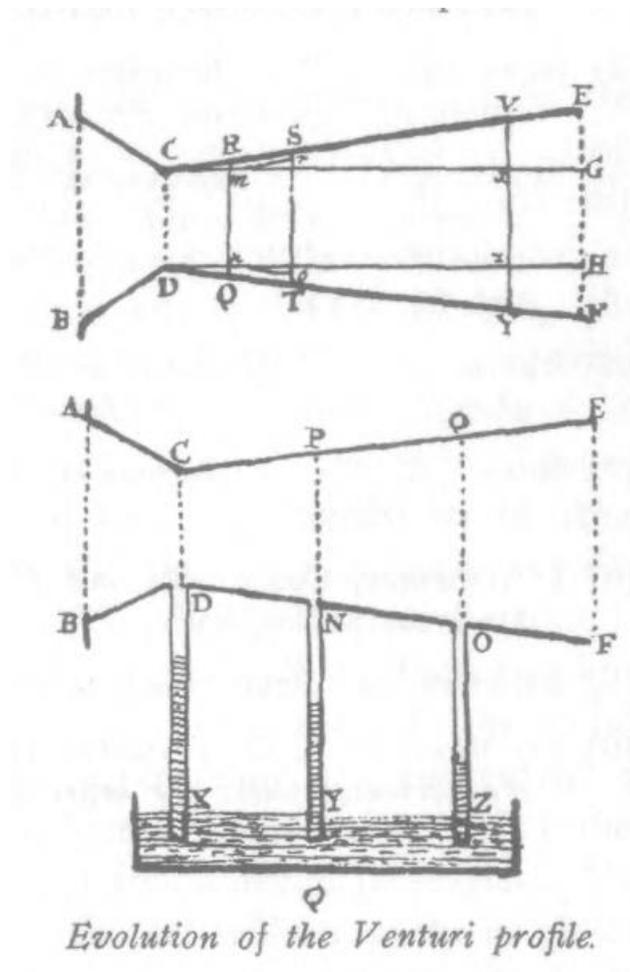


Figura 1- Evolução do perfil do Venturi.

Fonte: ROUSE & INCE (1980)

Na figura 1 é possível verificar a grande variação de pressão ao longo do Tubo de Venturi. O tubo vertical X representa a existência de maior quantidade de líquido em seu interior, devido à baixa pressão do fluido na região de estrangulamento do Tubo de Venturi. À medida que o Tubo de Venturi aumenta seu diâmetro e a velocidade é reduzida, a pressão vai progressivamente aumentando, como pode ser verificado pela redução do volume de fluido nos tubos Y e Z.

## 2.2 Microbolhas

A definição de microbolha é um tanto variável devido à sua aplicação (RODRIGUES & RUBIO, 2003). Conforme Arumugan (2015) existe uma variedade de definições do tamanho das microbolhas, as quais podem variar em função de dezenas de micrometros. Já Rodrigues & Rubio (2007) classificam microbolhas como sendo as bolhas com diâmetro entre 30 e 100 micrometros.

### 2.2.1 Estrutura das microbolhas

As microbolhas possuem uma estrutura composta por três componentes, um correspondente ao seu interior gasoso (fase gasosa), outro correspondente à casca (composta por uma mistura líquido-gás) e finalmente a fase líquida, a qual envolve a casca. A Figura 2 representa a estrutura com seu interior gasoso, sua casca e a fase líquida.

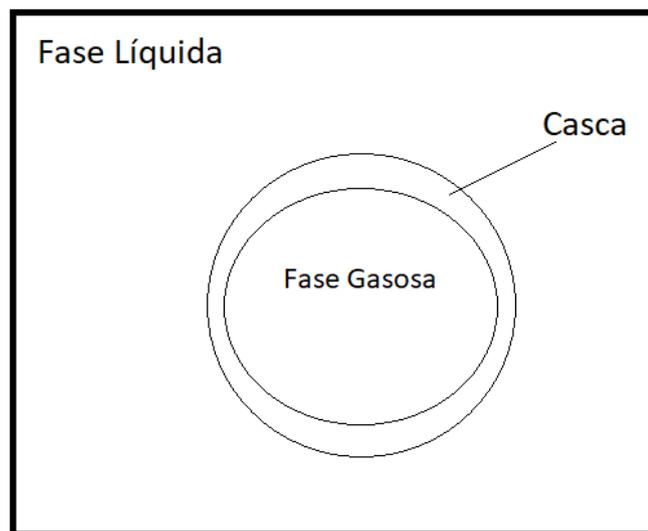


Figura 2 – Estrutura da microbolha.

Fonte: Pesquisa direta (2018)

A fase gasosa corresponde ao gás ou misturas de gases contidos pela casca. A casca é a parte que envolve a fase gasosa e é responsável pela maioria das propriedades mecânicas da microbolha. A fase líquida se refere ao meio líquido no qual a microbolha está contida, podendo estar presentes surfactantes e outros agentes formadores de espuma, conforme classificam Parmar & Majumder (2013).

A espessura da casca varia em função das moléculas que a compõe e são de difícil determinação. Doinikov & Bouakaz (2011) encontraram uma média de 15 a 20 nanômetros para cascas à base de albumina e de 1 a 4 nanômetros para cascas à base de lipídios.

## 2.2.2 Principais propriedades das microbolhas

As microbolhas possuem características específicas que definem suas propriedades e definem sua utilização nas diferentes aplicações possíveis. As principais propriedades das microbolhas são apresentadas a seguir.

### 2.2.2.1 Taxa de transferência de massa

A taxa de transferência de massa da microbolha aumenta à medida que o tamanho da bolha e sua velocidade de ascensão diminuem (TSUGE, 2010).

A equação de transferência de massa da microbolha para a água é dada pela Equação 1, abaixo, quando a resistência à transferência de massa pode ser ignorada.

$$N = K_1 A (p - p^*) / H \quad (1)$$

Onde:

$K_1$  é o coeficiente de transferência de massa da fase líquida (m/s);

$A$  é a área superficial da microbolha (m<sup>2</sup>);

$p$  é a pressão parcial dos gases dissolvidos na microbolha (Pa);

$p^*$  é a pressão parcial de equilíbrio da fase gasosa com os componentes dissolvidos na fase líquida (Pa);

$H$  é a constante de Henry.

Segundo TSUGE (2013), a transferência de massa para um sistema de oxigênio-água é definida como sendo:

- 1 para uma bolha de 1 milímetro de diâmetro;
- $10^8$  para uma microbolha de 10 micrômetros;
- $10^{18}$  para uma bolha de 100 nanômetros, devido à redução da velocidade de ascensão.

### 2.2.2.2 Velocidade de ascensão

É uma característica que depende das propriedades físicas do líquido e do diâmetro da microbolha. Quanto maior a densidade do líquido e maior o diâmetro da microbolha, maior a velocidade de ascensão da microbolha e quanto maior a viscosidade dinâmica do líquido, menor a velocidade de ascensão da microbolha. A velocidade de ascensão é dada pela Equação 2, abaixo, e segue a equação de Stokes.

$$U = \rho g d^2 / 18\mu^* \quad (2)$$

Onde:

$U$  é velocidade de ascensão;

$\rho$  é a densidade do líquido;

$g$  é a aceleração da gravidade;

$d$  é o diâmetro da microbolha;

$\mu^*$  é a viscosidade dinâmica do líquido.

A Figura 3 mostra a relação entre o diâmetro da microbolha e a velocidade de ascensão da mesma.

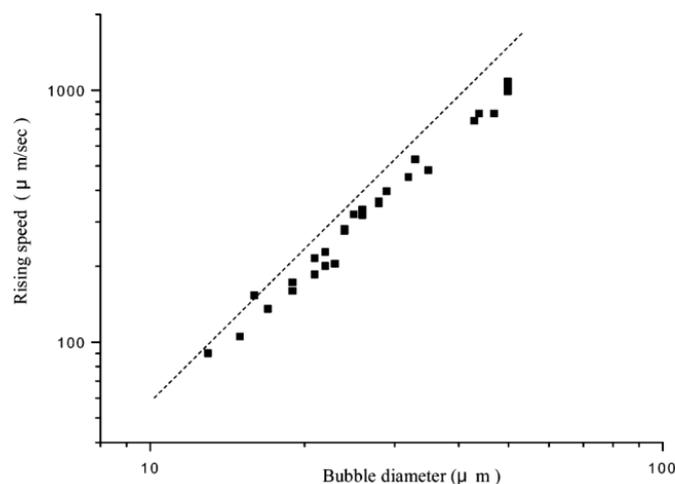


Figura 3: Relação entre diâmetro e velocidade de ascensão das microbolhas.

Fonte: TAKAHASHI (2015)

### 2.2.2.3 Pressão interna

Considerando a equação de Young-Laplace, a pressão interna numa bolha é dada pela Equação 3.

$$\Delta P = 4\sigma/d \quad (3)$$

Onde

$\Delta P$  é a diferença da pressão interna da microbolha e a pressão ambiente;

$\sigma$  é a tensão superficial da bolha;

$d$  é o diâmetro da microbolha.

A pressão interna de uma microbolha de 1 micrômetro de diâmetro a uma temperatura de 25°C é considerada em torno de 390KPa, cerca de 4 vezes a pressão atmosférica (AGARWAL *et al*, 2011).

### 2.2.2.4 Superfície específica

Quanto menor o diâmetro das microbolhas, maior a superfície de contato em relação a um mesmo volume de gás. A relação entre a área e o volume das microbolhas é dada pela Equação 4.

$$\frac{A}{V} = 6/d \quad (4)$$

Onde:

$A$  é a área superficial da microbolha;

$V$  é o volume de gás total;

$d$  é o diâmetro da microbolha;

### 2.2.2.5 Alteração das propriedades físicas do líquido

Segundo Parmar & Majumder (2013), a viscosidade e a tensão superficial diminuem, enquanto a condutividade elétrica aumenta num líquido contendo um fluxo de microbolhas. O principal motivo que justifica essas características é a quebra das ligações de hidrogênio e a ionização de compostos presentes no líquido.

### 2.2.2.6 Dissolução e redução

Devido à grande pressão interna e sua lenta velocidade de ascensão, as microbolhas tendem a dissolver-se no líquido que as cercam e reduzir de tamanho até colapsarem. À medida que o diâmetro diminui e a pressão interna aumenta, aumenta por consequência, a dissolução da fase gasosa no líquido que cerca a microbolha. Assim sendo, quanto maior for a pressão interna, maior será a taxa de difusão do gás contido na microbolha (TSUGE,2011).

Essa dissolução das microbolhas e sua redução de tamanho faz com que as microbolhas tenham um tempo de vida relativamente curto. A figura 4 representa a diferença entre macrobolhas, microbolhas e nanobolhas em relação à sua dissolução.

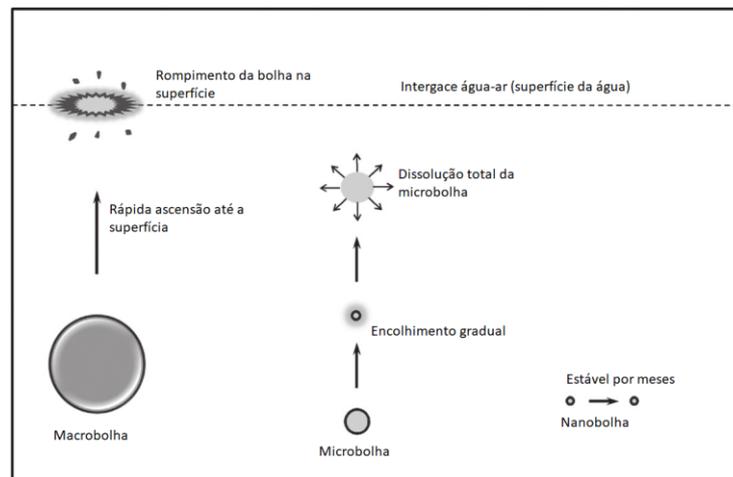


Figura 4: Diferenças de comportamento de micro, macro e nanobolhas na água.

Fonte: Adaptado de KHUNTIA, *et al* (2012).

Pela figura 4, podemos verificar que as macrobolhas, devido ao seu maior tamanho, sobem rapidamente à superfície da água e se rompem. As microbolhas, devido à sua alta pressão interna, dissolvem-se completamente antes de chegarem à superfície. As nanobolhas possuem uma estabilidade devido à formação de hidratos, garantindo assim sua vida por meses (KHUNTIA, *et al*, 2012, APUD TAKAHASHI, 2009).

A figura 5 mostra o tempo de vida de microbolhas.

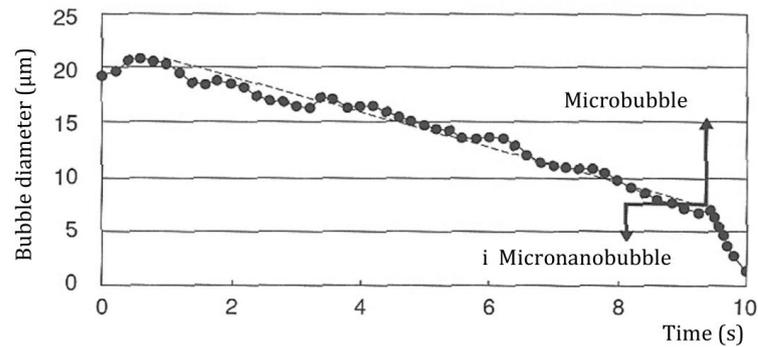


Figura 5: Tempo de vida das microbolhas.

Fonte: TSUGE(2010)

Pela Figura 5 pode-se notar que o tempo de vida de uma microbolha de 20 micrometros é cerca de 8 segundos, para que reduza o seu tamanho à metade e logo após, apenas mais 2 segundos para se dissolver completamente na água. TSUGE (2010) diz que microbolhas com tamanho superior a 65 micrometros tendem a se expandir ao invés de encolher.

### 2.2.2.7 Potencial Zeta

O potencial zeta é uma propriedade eletrostática que as microbolhas possuem. Esta propriedade está diretamente relacionada com os íons dissolvidos presentes na água e com o seu pH. Não há uma relação direta entre o potencial zeta e o diâmetro da microbolha (KHUNTIA, *et al*, 2012; APUD TAKAHASHI 2005<sup>a</sup>; HASEGAWA *et al*. 2009).

A Figura 6 mostra a relação entre os íons presentes na água e a interface das microbolhas.

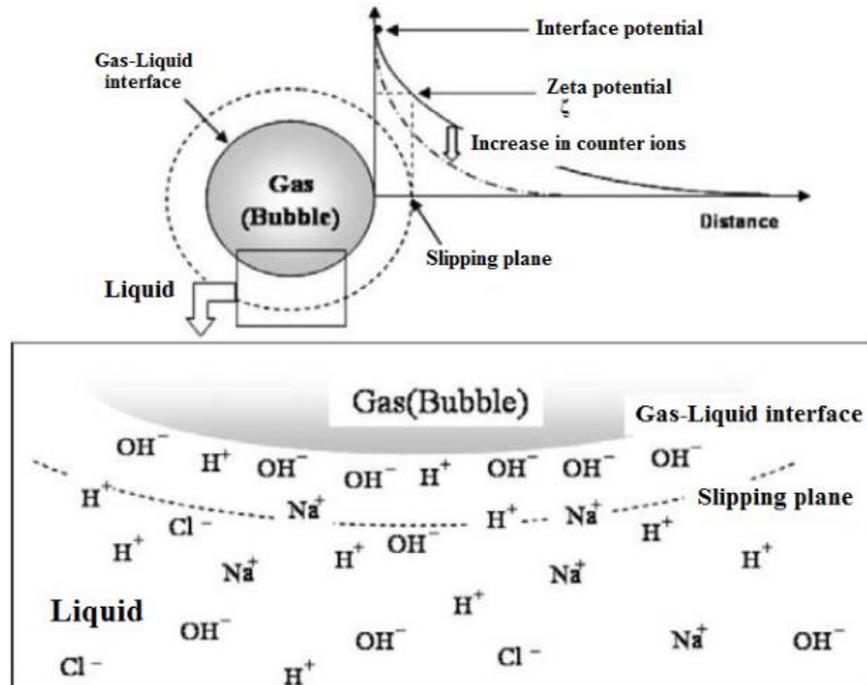


Figura 6 Interface microbolha – líquido.

Fonte: TAKAHASHI (2005).

Em função dos diversos íons presentes na água, à medida que se afasta da casca, o potencial zeta diminui até zerar, devido à anulação da carga elétrica.

A Figura 7 mostra a relação direta do pH na influência do potencial zeta. À medida que o pH aumenta, o potencial zeta diminui.

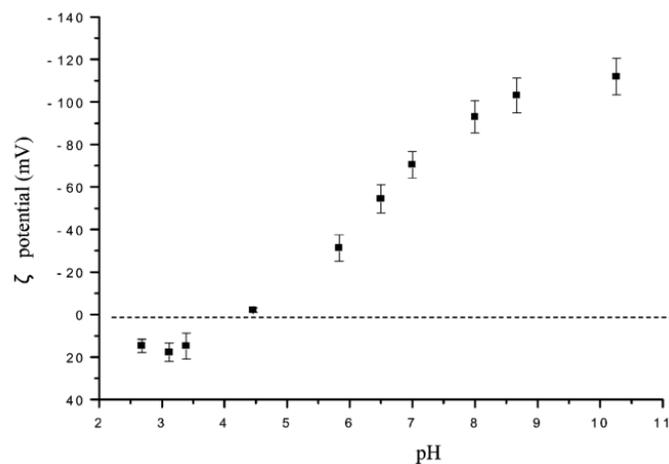


Figura 7: Relação entre pH e Potencial Zeta.

Fonte: TAKAHASHI (2005<sup>a</sup>)

O potencial zeta é numericamente calculado pela Equação de Smoluchowski e representado pela Equação 5.

$$\zeta = \eta\mu/\epsilon \quad (5)$$

Onde:

$\zeta$  é o Potencial Zeta (V);

$\eta$  é a viscosidade da água ( $\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ );

$\epsilon$  é a permissividade do líquido ( $\text{kg}^{-1} \text{m}^{-3} \text{s}^2 \text{C}^2$ )

$\mu$  é a mobilidade ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{V}^{-1}$ )

Para fins deste estudo, a principal característica a ser considerada referente ao potencial zeta, é o fato de que, quanto maior o potencial zeta, maior a repulsão das microbolhas e assim, maior a sua estabilidade física.

## 2.3 Geração de microbolhas

Existem diferentes processos que podem ser utilizados para a geração de microbolhas. Os métodos mais comuns, usando o fluido como forma de geração de microbolhas, citados por TSUGE(2010) são apresentados na sequência.

### 2.3.1 Método do líquido em fluxo rotacional

Este método consiste em um fluxo ascendente e rotacional em um tubo d'água. A parte central do tubo, pela Equação de Bernoulli, possui a menor pressão e o ar é sugado pela diferença de pressão existente com a atmosfera.

### 2.3.2 Método do misturador estático

Este método consiste no uso de um misturador helicoidal que irá quebrar as bolhas presentes na água e transformá-las em microbolhas.

### **2.3.3 Método do bico ejetor**

Neste método o líquido é ejetado em alta velocidade e funciona como um aspirador, o gás é então aspirado pelo princípio da ação-reação, e produz as microbolhas a partir do fluxo turbulento e do cisalhamento.

### **2.3.4 Método Venturi**

No método Venturi a mistura de gás e líquido sofre uma onda de choque devido à rápida mudança de velocidade transformando as bolhas maiores em bolhas menores.

### **2.3.5 Método do ar dissolvido**

Neste método a água junto com ar é pressurizada entre 3 a 4 vezes a pressão atmosférica. A pressão elevada aumenta a solubilidade do gás na água e quando a água volta à pressão atmosférica, o gás é liberado na forma de microbolhas.

## **2.4 Tubo de Venturi para geração de microbolhas**

O Tubo de Venturi é um sistema que fundamentalmente é usado para se medir a velocidade de um fluido, através da sua variação de pressão. O mecanismo consiste em um tubo onde o diâmetro do fluxo é estrangulado em uma sessão convergente cônica, passa por um tubo, denominado garganta de sessão transversal constante. Após a garganta do mecanismo, há outra sessão cônica, porém agora divergente, até o diâmetro final do mecanismo.

O Tubo de Venturi possui ângulos de inclinação que variam conforme a finalidade.

A Figura 8 representa a configuração clássica de um tubo de Venturi.

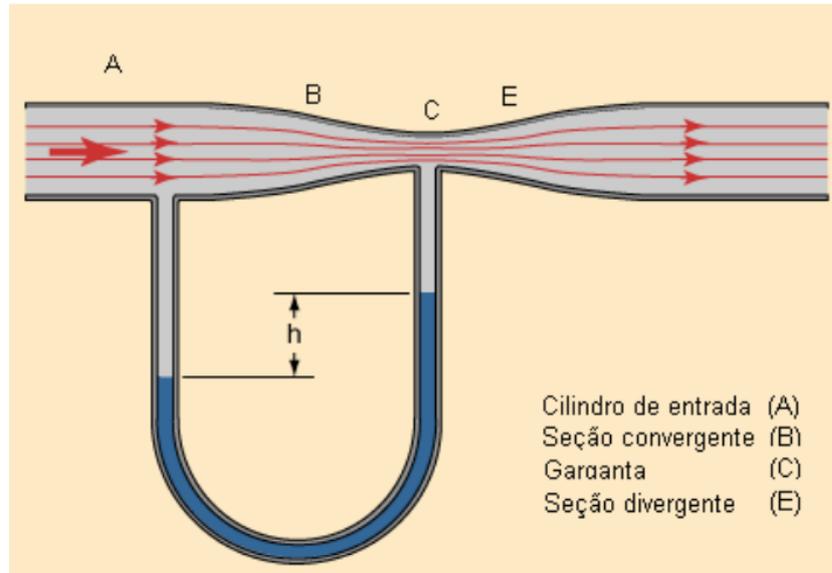


Figura 8: Configuração clássica do Tubo de Venturi.

Fonte: IBARS (2004)

A seção A corresponde ao tubo de entrada do fluido. A seção B corresponde à seção convergente do Tubo de Venturi. A seção C é a garganta; seção de menor diâmetro do tubo de Venturi. A Seção E é a região divergente do Tubo de Venturi. A diferença  $h$  é a diferença de pressão do fluido, medidas na entrada e na garganta do tubo de Venturi.

O Tubo de Venturi segue o Princípio de Bernoulli onde a variação da velocidade está relacionada com uma variação oposta na pressão ou na energia potencial do fluido (BATCHELOR, 2000). Assim sendo, um aumento da velocidade de um fluido provoca uma redução na sua pressão ou energia potencial e vice-versa.

A Equação de Bernoulli para um fluido incompressível em um duto é dada pela equação 6.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \quad (6)$$

### 2.4.1 Cavitação

A cavitação é um fenômeno hidráulico que acontece quando a pressão de vapor de um líquido se torna maior que a pressão na qual o líquido está submetido (Frank, M. *et al.*, 2017).

Para a geração de microbolhas, segundo MAOMING, F. A. N. et al(2010), a forma de cavitação mais proveitosa é a cavitação hidrodinâmica, por ser mais barata e possuir uma eficiência energética maior que os outros métodos por utilizar de simples equipamentos e possuir uma baixa manutenção.

Durante a geração de microbolhas em um tubo de Venturi, a pressão do líquido é reduzida durante o aumento da velocidade no pescoço do tubo, conforme mostrado na Eq. 6. Quando essa variação de pressão dentro de um tubo de Venturi é suficiente para que ocorra a cavitação ocorre a geração de microbolhas. Nesse processo de cavitação há a possibilidade de geração de microbolhas (Takemura and Matsumoto, *apud*,. Fujiwara 2007)

Na mecânica dos fluidos o número de cavitação é um fator adimensional que busca relacionar as condições de escoamento com a intensidade da cavitação (Gongat e Pandit, 2001).

A equação que demonstra o número de cavitação é dada pela equação abaixo:

$$Cv = \frac{P_2 - P_v}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad (7)$$

Onde:

$Cv$  é o número de cavitação;

$P_2$  é a pressão na após a expansão no tubo de Venturi;

$P_v$  é a pressão de vapor do fluido;

$v$  é a velocidade do fluido no pescoço da constricção.

Segundo Gongat e Pandit (2001) teoricamente a cavitação ocorre quando  $Cv = 1$  e ocorre significativamente quando  $Cv < 1$ .

#### 2.4.2 Velocidade do som no escoamento de bolhas

A velocidade do som no escoamento das bolhas é dada pela equação 8.

$$Cm = \sqrt{\frac{p}{\alpha \rho l (1 - \alpha)}} \quad (8)$$

Onde:

$P=$  é a pressão;

$\alpha=$  é a fração volumétrica dos gases;

$\rho_l=$  é densidade do líquido.

Segundo Fujiwara (2007), a velocidade do som no escoamento de bolhas é menor que o a velocidade do escoamento do fluido e é atingida facilmente durante a constrição da garganta, assim sendo, quando ocorre a redução da velocidade na sessão divergente do tubo de Venturi também ocorre um fenômeno entre as velocidades supersônicas e subsônicas que irá fragmentar as bolhas existentes em microbolhas.

A fração volumétrica dos gases é dada pela Equação 9

$$\alpha = \frac{Q_g}{Q_l + Q_g} \quad (9)$$

Onde:

$Q_g$  é a vazão mássica dos gases;

$Q_l$  é a vazão mássica do líquido;

### 2.4.3 Intensidade da turbulência

A intensidade da turbulência é definida como o valor eficaz das flutuações de velocidade em relação à velocidade média de escoamento do fluido.

Segundo Kumar & Pandit (1999), a intensidade com que os eventos relacionados com a cavitação ocorrem dependem diretamente da intensidade da turbulência sendo que esta está relacionada com a dissipação de energia ou à queda de pressão.

## 2.5 Skimmers

Os skimmers são equipamentos utilizados para filtragem da água de aquários marinhos domésticos, tanques de exposição ou na aquicultura. Segundo Feldman *et al.*, (2009), os skimmers consistem em equipamentos onde as bolhas de ar são misturadas à água do aquário, sendo depois removidas com as impurezas aderidas.

Os skimmers podem ser divididos em dois grupos: os industriais e os domésticos. Os industriais são de grande porte, com dimensões maiores que 1 metro de altura e utilizados

para aquários de exposição para o público (visitação) ou para tanques de aquicultura intensiva. Os skimmers domésticos são menores, construídos de forma a ficarem escondidos nos móveis dos aquários.

Um skimmer doméstico é composto basicamente por um corpo, uma bomba, um sistema de injeção de ar e pelo copo.

A Figura 9 mostra o esquema de funcionamento de skimmer genérico.

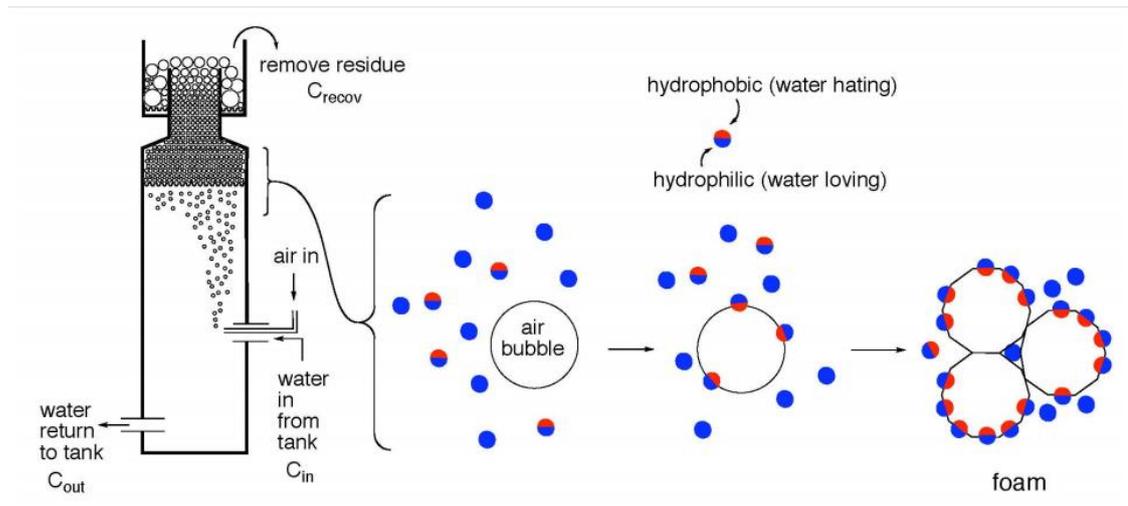


Figura 9: Esquema do funcionamento de um skimmer.

Fonte: FELDMAN *et al.* (2009)

As bolhas de ar, devido ao seu potencial zeta, atraem as partículas presentes na água e estas ficam aderidas à casca das bolhas. Apenas as partículas que possuem uma parte hidrofílica e outra parte hidrofóbica são retiradas por esse processo (FELDMAN *et al.*, 2009).

A introdução das bolhas em um skimmer pode ser feita de várias maneiras, sendo as principais, a utilização de bicos injetores, tubos de Venturi ou aspiração mecânica.

A Figura 10 mostra o esquema de aspiração de um skimmer. Este utiliza o tubo de Venturi para, além de sua função principal, a geração de microbolhas, como injetor de ar por diferença de pressão.

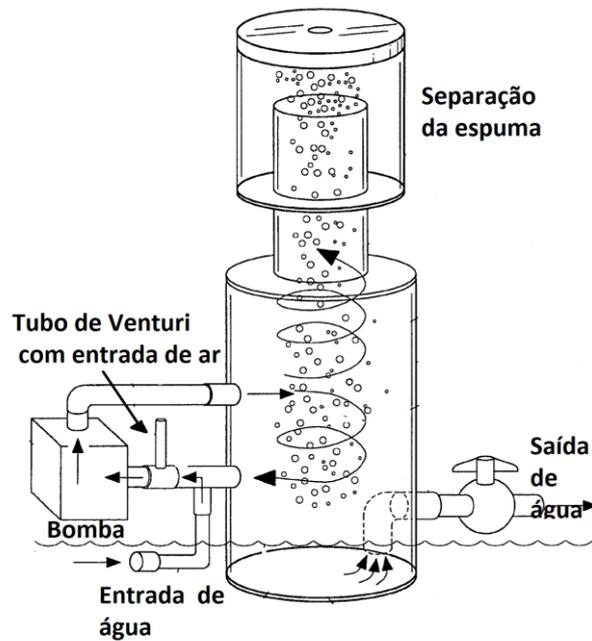


Figura 10: Forma de uso de um tubo de Venturi em um skimmer.

Fonte: Adaptado de Chen-Yang Wu. Aquarium protein skimmer, US6808625B1

A Figura 10 apresenta o esquema geral de funcionamento de um skimmer, onde a água a ser filtrada é aspirada pela bomba. Ao passar pelo tubo de Venturi a diferença de pressão faz com que o ar atmosférico seja aspirado e as bolhas sejam formadas.

## 2.6 Aquários Domésticos

O aquarismo doméstico, a prática de montagem e manutenção dos aquários em residências vem crescendo, à medida que se desenvolvem novos métodos e equipamentos que facilitam e melhoram a sua manutenção.

O aquarismo pode ser dividido em duas categorias principais, o aquarismo dulcícola, também conhecido como de água doce, e o aquarismo marinho.

No aquarismo de água doce, o skimmer não é utilizado devido à sua baixa salinidade e ao baixo pH, características estas, que mantêm o potencial zeta em valores insuficientes para a adsorção de moléculas nas microbolhas.

Já no aquarismo marinho, o equipamento de filtragem mais importante é o skimmer, devido à sua grande eficiência e praticidade na remoção de compostos indesejados presentes na água.

A Figura 11 mostra um aquário marinho que utiliza um skimmer doméstico para manter a qualidade da água.



Figura 11: Aquário marinho que utiliza um skimmer doméstico para filtragem.  
Fonte: Pesquisa direta (2019)

O skimmer doméstico costuma ser utilizado em caixas denominadas *sump*. A água do aquário circula entre o próprio aquário e pelo *sump*, onde os equipamentos de filtragem são alocados, e retorna para o aquário por bomba de retorno. Durante a passagem no *sump* a água é filtrada pelo skimmer.

A figura 12 apresenta uma montagem comumente utilizada nos aquários marinhos. A água do aquário desce por gravidade até o *sump*, passa pelo skimmer e retorna por uma bomba de retorno finalizando o ciclo.

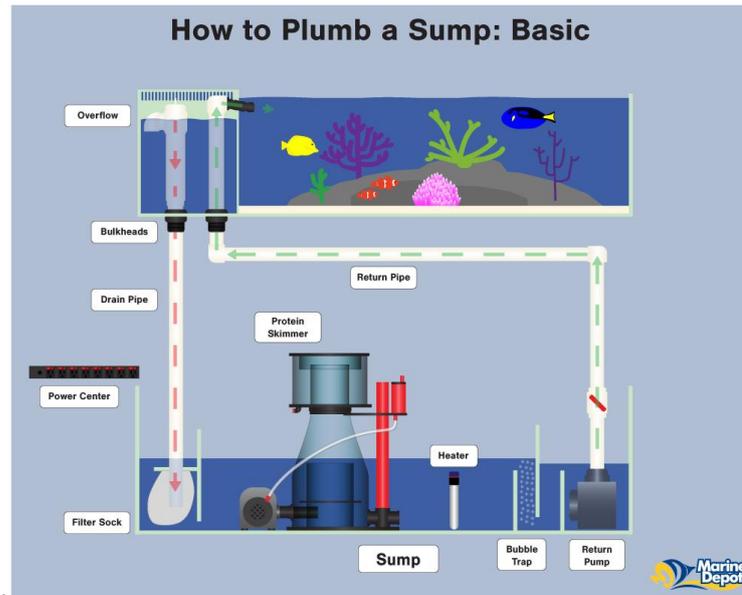


Figura 12: Esquema de utilização de um skimmer doméstico em um aquário. Fonte: Marine Depot (2019).

## 2.7 Fluidodinâmica computacional

A fluidodinâmica computacional é uma ferramenta que usa a divisão das regiões do escoamento em nós e pequenas áreas na qual são utilizadas iterações matemáticas para resolver as equações diferenciais de escoamento (Fox *et al.*, 2000). Dessa forma é possível estudar escoamentos complexos de maneira virtual, utilizando-se apenas a análise computacional.

Com o desenvolvimento de softwares e hardwares mais eficientes e de mais fácil acesso, a fluidodinâmica computacional se tornou uma ferramenta importante no estudo e desenvolvimento de foguetes, mísseis, aviões, previsão do clima e uma série de outras aplicações na área de mecânica dos fluidos.

Seja a nível acadêmico ou a nível industrial, a fluidodinâmica computacional está cada vez mais presente no cotidiano dos que trabalham com engenharia e ciências em geral, em algum momento dos estudos.

### 2.7.1 Estudo do escoamento com fluidodinâmica computacional em tubos de Venturi

A utilização de ferramentas da fluidodinâmica computacional para o estudo de fenômenos envolvendo tubos de Venturi é escassa, havendo poucos trabalhos sobre o assunto na literatura.

Dentre estes, destaca-se FUJIWARA *et al.*, (2003) que analisa a relação entre a posição de fissura das bolhas e sua relação com o aumento de pressão. Neste trabalho, a posição da fissão das bolhas foi obtida através de fotografias com câmera de alta velocidade e as coordenadas da variação da pressão através fluidodinâmica computacional, tendo o tubo de Venturi diâmetro de entrada e saída de 8mm e diâmetro de garganta de 3mm. A Figura 13 apresenta os resultados deste estudo.

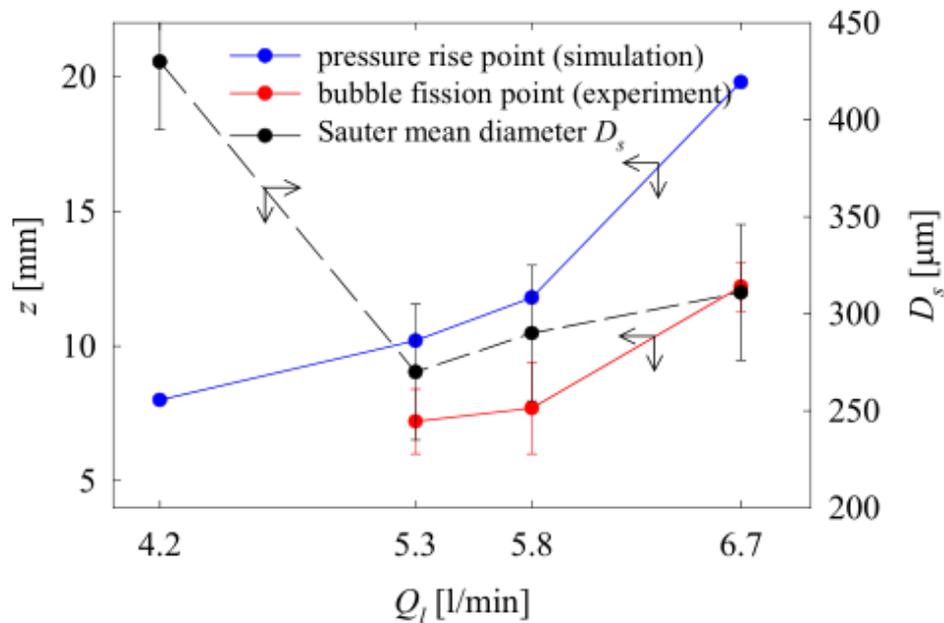


Figura 13: Comparação entre estudos numéricos e resultado experimental para diferentes vazões.

Fonte: Fujiwara *et al.*, (2003)

As coordenadas de posição apresentados na Figura 13 mostram o quanto o aumento da vazão apresentou um deslocamento da posição do aumento da pressão e também do ponto de fissão das bolhas.

BASHIR *et al.*, (2011) utilizou das ferramentas da fluidodinâmica computacional para verificar qual entre tubos de Venturi de diferentes formas teria o melhor número de cavitação. A Figura 14 mostra as variações da pressão absoluta, de acordo com o tipo de tubo de Venturi utilizado.

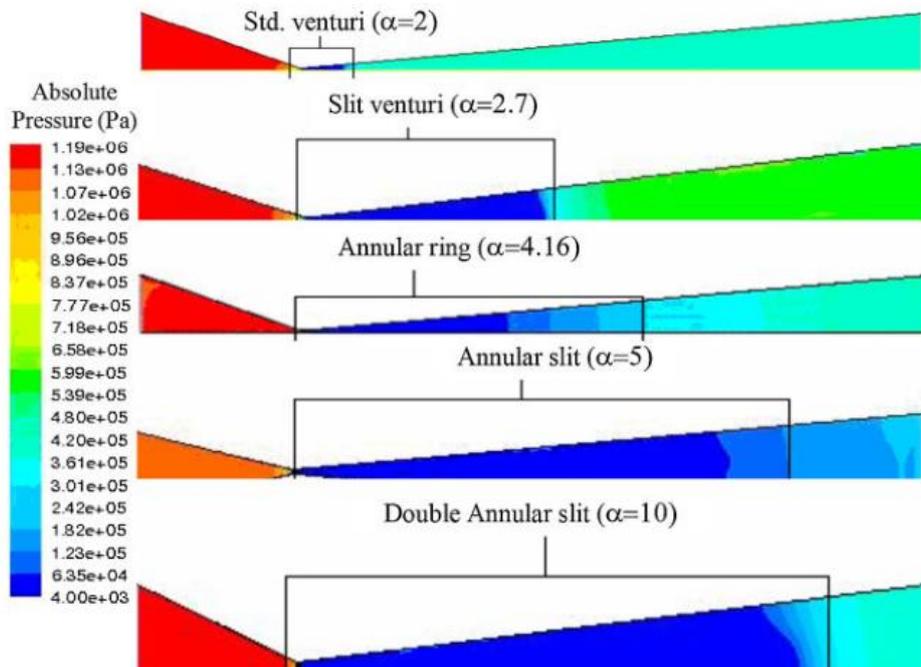


Figura 14: Variações de pressões de acordo com o modelo de tubo de Venturi.

Fonte: BASHIR *et al.*, (2011)

A figura 14 apresenta as variações de pressões, fator importante para cavitação, de acordo com o formato do tubo de Venturi analisado.

Na área de medidores de vazões, a fluidodinâmica computacional ajuda a calcular principalmente a perda de carga que esses medidores terão no sistema hidráulico. OLIVEIRA, *et al* analisou a o escoamento em uma placa de orifício e um tubo de Venturi através da fluidodinâmica computacional e encontrou perfis bastante condizentes com análises feitas em laboratório. A Figura 15 mostra a pressão estática ao longo do tubo de Venturi analisado por OLIVEIRA *et al.*, (2011).

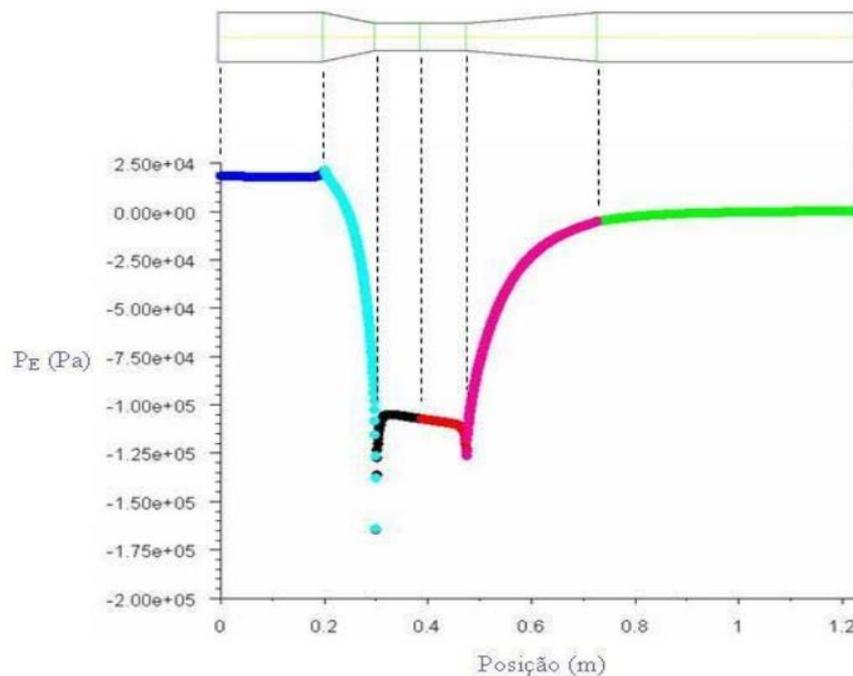


Figura 15: Variações de pressão ao longo do corpo de um tubo de Venturi

Fonte: Oliveira *et al.*, (2011).

A Figura 15 apresenta a condição de pressão ao longo do tubo de Venturi estudado. O diagrama foi colocado relacionando a posição no eixo do tubo de Venturi com a média da pressão naquela posição.

### 2.7.1.1 Fluidodinâmica computacional multifásica em tubos de Venturi

A maioria das análises de escoamentos em Tubos de Venturi usando das ferramentas da fluidodinâmica computacional é feita com escoamentos monofásicos, devido a maior complexidade de configuração e análise de um escoamento com mais de uma fase, mas para o caso deste estudo é necessária uma abordagem das fases líquidas e gasosas para uma correta análise dos resultados a serem obtidos com a CFD.

As duas abordagens que podemos considerar para analisar a cinemática do escoamento dos fluidos, seja multifásicos ou monofásicos, são a Euleriana (Euler-Euler) e a Lagrangeana (Euler-Lagrange).

Na abordagem Euleriana é analisado um volume de controle fixo no espaço. Segundo Dias (2009), para uma abordagem Euleriana de um escoamento multifásico, “as fases são tidas como contínuas e interpenetrantes, diferenciadas por uma fração volumétrica em cada volume de controle e podendo ou não ter campos de velocidade heterogêneos, obedecendo as suas próprias equações de transporte”.

Na abordagem Lagrangeana, segundo Paladino (2005), “é resolvida uma equação da conservação da quantidade de movimento para cada partícula, em um sistema de referência que se movimenta com a partícula”. Essa abordagem é a que mais se adequa à análise de microbolhas em um escoamento em um tubo de Venturi e é a abordagem que foi usada por Lain *et al.*, (1999), Gogate *et al.*, (2001) e Bashir *et al.*, (2011).

A Figura 16 mostra como ocorre essas duas abordagens e apresenta a representação matemática para as abordagens Euleriana e Lagrangeana

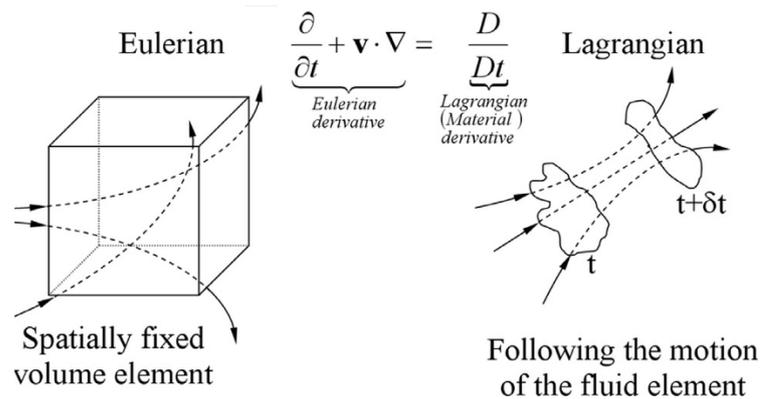


Figura 16: Abordagens Euleriana e Lagrangeana para análise de escoamentos.

Fonte: Shadloo, et al (2016)

No escoamento dentro de tubos de Venturi para que ocorra a geração de microbolhas, tem-se sempre regime turbulento, devido às altas velocidades no tubo, incluindo nesta análise o estrangulamento. Essa característica de regime turbulento torna muito mais complexa a utilização das ferramentas de fluidodinâmica computacional devido a aleatoriedade, redemoinhos e vórtices presentes no escoamento turbulento (Çengel & Cimbala, 2006).

Para esses cálculos de escoamento, existem 3 técnicas apontadas por Çengel & Cimbala (2006) com diferentes características: *Direct Numerical Simulation (DNS)*, *Large Eddy Simulation (LES)* e *Reynolds-Averaged Navies-Stokes (RANS)*.

O método DNS (“Simulação Numérica Direta”) resolve as equações de Navier-Stokes em todos os níveis de vórtices gerados pela turbulência do escoamento. Esse método exige um grande recurso computacional.

O método LES (“Simulação de grandes Redemoinhos”) é uma técnica em que desconsidera na solução do problema, os pequenos vórtices gerados pela turbulência e considera apenas os maiores vórtices nos cálculos. Esse é um método que utiliza menos poder

computacional do que o método DNS, mas ainda assim necessita de uma capacidade de processamento alta.

O método RANS (“Navier Stokes com Médias de Reynolds”) é um método que padroniza com modelos matemáticos todos os vórtices e considera o fluxo estacionário e incompressível. Nesse método a equação de Navier-Stokes é substituída pela equação de Navier-Stokes com médias de Reynolds

### 2.7.1.2 Equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS)

Essas equações utilizam médias temporais aplicadas às equações de Navier-Stokes na forma instantânea, à partir da decomposição da velocidade em valores médios e de uma flutuação (CAETANO, 2014).

Para um regime estacionário, incompressível e turbulento, Çengel & Cimbala (2006), apresentam as equações de Navier-Stokes com média de Reynolds conforme a Equação 10.

$$\left( \frac{\rightarrow}{v} \cdot \frac{\rightarrow}{\nabla} \right) \frac{\rightarrow}{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P' + \nu \nabla^2 \frac{\rightarrow}{v} + \nabla \cdot (\tau_{ij,turbulento}) \quad (10)$$

Onde o termo  $\tau_{ij,turbulento}$  é o tensor conhecido como tensor específico de Reynolds e é dado pela Equação 11, onde as barras representam a média temporal do produto das flutuações das velocidades.

$$\tau_{ij,turbulento} = \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix} \quad (11)$$

### 2.7.1.3 Modelo de turbulência k-ε

Para encontrar o tensor específico de Reynolds é necessária a utilização de modelos de turbulência. Segundo Çengel & Cimbala (2006), existem 3 principais modelos, o modelo k-ε, o modelo k-ω e o modelo q-ω, modelos estes, que necessitam de duas equações de transporte e que devem ser resolvidas simultaneamente com as equações de conservação de massa e conservação de momento.

Dentre os três modelos apresentados, o que mais se adequa ao estudo do escoamento em tubos de Venturi é o modelo k-ε, onde k é a equação de energia cinemática turbulenta e o ε é a equação de dissipação da turbulência.

Caetano, apud Launder & Spaulding (1974), apresenta as equações de energia cinemática turbulenta (Equação 12) e a equação da dissipação turbulenta (Equação 13) junto com suas variáveis da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon}(P_k + C_{3\varepsilon}P_b) - C_{2\varepsilon}\rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (13)$$

Onde:

$P_k$  é a produção de energia cinética da turbulência devido aos gradientes de velocidade média;

$P_b$  é a produção de energia cinética devido à força de empuxo;

$Y_M$  é a contribuições das flutuações de dilatação na compressibilidade devido à turbulência para a taxa de dissipação global;

C são as constantes do modelo ( $C_{1\varepsilon}=1,44$ ;  $C_{2\varepsilon}=1,92$ ;  $C_{3\varepsilon}=-0,33$ );

$\sigma_k$  é o número de Prandtl para k (valor igual 1,0);

$\sigma_\varepsilon$  é o número de Prandtl para ε (valor igual a 1,3);

S são os termos fontes definidos pelo usuário;

A viscosidade turbulenta( $\mu$ ) é dada pela equação 14.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (14)$$

A produção da energia cinética,  $P_k$ , é dada pela equação 15.

$$P_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \left( \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x'_i} \right) \equiv \mu_t S^2 \quad (15)$$

Onde S é dado pela equação 16.

$$S \equiv \sqrt{2\mu_t \overline{S_{ij}} \cdot \overline{S_{ij}}} \quad (16)$$

$P_b$  é dado pela equação 17:

$$P_b = \beta g_i \left( \frac{\mu_t}{Pr_t} \cdot \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_i} \right) \quad (17)$$

Onde:

$\overline{T}$  é a temperatura média;

$g_i$  é a componente do vetor de aceleração i;

$\beta$  é o coeficiente de expansão térmica.

Assim sendo, segundo Huang *et al.* (2009), ao se utilizar configuração adequada do software se torna possível realizar ensaios teóricos sobre escoamentos com grande eficiência, baixo custo e com uma grande gama de variáveis.

## 2.7.2 Etapas do processo de fluidodinâmica computacional

A fluidodinâmica computacional depende basicamente de 4 etapas:

- 1- Criação de malha;
- 2- Pré-processamento;
- 3- Solução numérica;
- 4- Pós-processamento;

### 2.7.2.1 Criação de malha

A malha pode ser definida como a conexão formada pelo conjunto de nós. Essas conexões formam geometrias simples onde os cálculos são executados e, segundo Owen (1998), podem apresentar formas triédrica, tetraédrica ou hexaédrica

A criação de malhas é o passo mais importante na fluidodinâmica computacional, porque as equações diferenciais serão trabalhadas nessas estruturas geométricas. Malhas criadas de maneira inadequada vão gerar resultados imprecisos.

As malhas podem ser criadas de forma estruturada ou não estruturada, sendo as primeiras onde os pontos das malhas estão distribuídos de maneira regular enquanto que nas não estruturadas, os pontos não estão dispostos de maneira regular.

#### **2.7.2.2 Pré-processamento**

O pré-processamento é a etapa onde as condições de contorno são definidas. São definidos os fluidos e sólidos que estão envolvidos no estudo com suas propriedades, as condições de entrada do fluido, os modelos matemáticos e variáveis que serão empregados, as condições de contorno do problema e questões envolvendo o salvamento e exportação dos dados.

Ao fim dessa etapa é gerado um arquivo com todas as definições que serão utilizadas na fase da solução numérica.

#### **2.7.2.3 Solução numérica**

Essa é a etapa onde os cálculos são efetuados com base na malha criada e nas condições definidas no pré-processamento. É então criado um arquivo com os resultados das iterações matemáticas que é utilizado na fase de pós processamento.

#### **2.7.2.4 Pós-processamento**

Nessa última etapa os dados são então compilados em arquivos e estão disponíveis para análise. É possível apresentar esses dados na forma de tabelas, gráficos, simulações tridimensionais e vídeos de acordo com a necessidade do usuário.

### **2.8 ANSYS**

O programa de simulação adotado neste trabalho foi desenvolvido pela empresa ANSYS. Esta foi fundada na década de 70 e é uma empresa de capital aberto sediada no estado da Pensilvânia, nos EUA e oferece software para simulação de projetos de engenharia. Tendo mais de 3000 funcionários com especialistas em análise de elementos finitos, fluidodinâmica computacional, eletrônicos, semicondutores, software embarcado e otimização de design (ANSYS, 2019).

A ANSYS oferece produtos na área de simulação virtual em: design 3D, eletrônicos, software embarcado, fluidos, materiais, ótica, plataformas, semicondutores, estruturas e sistemas.

### **2.8.1 ANSYS Academic**

A ANSYS oferece uma versão para estudantes dos seus softwares, de forma gratuita, onde é possível utilizar seus recursos de formas simplificadas e com restrições de funcionalidade, mas entretanto, funcionais e precisas.

A versão *Live Student 2019 R1*, utilizada neste trabalho, permite uma análise de sistemas térmicos, estruturais e fluidodinâmicos.

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 Classificação do trabalho**

Este trabalho pode ser dividido em 3 (três) categorias distintas, respectivamente, quanto ao procedimento metodológico, quanto aos objetivos e quanto à natureza da pesquisa.

Quanto ao procedimento metodológico, este, se caracteriza por ser uma pesquisa exploratória sobre o assunto abordado neste trabalho. Gil (2008) caracteriza da seguinte forma esse tipo de pesquisa: “O método experimental consiste essencialmente em submeter os objetos de estudo à influência de certas variáveis, em condições controladas e conhecidas pelo investigador, para observar os resultados que a variável produz no objeto.

Quanto aos objetivos, este prioriza utilizar elementos quantitativos nas pesquisas, o que nos permitirá obter resultados bastante próximos da realidade. Segundo Fonseca (2002),

“diferentemente da pesquisa qualitativa, os resultados da pesquisa quantitativa podem ser quantificados. Como as amostras geralmente são grandes e consideradas representativas da população, os resultados são tomados como se constituíssem um retrato real de toda a população alvo da pesquisa. A pesquisa quantitativa se centra na objetividade. Influenciada pelo positivismo, considera que a realidade só pode ser compreendida com base na análise de dados brutos, recolhidos com o auxílio de instrumentos padronizados e neutros. A pesquisa quantitativa recorre à linguagem matemática para descrever as causas de um fenômeno, as relações entre variáveis, etc. A utilização conjunta da pesquisa qualitativa e quantitativa permite recolher mais informações do que se poderia conseguir isoladamente.”

Relativo à sua natureza, este trabalho pode ser considerado como de pesquisa exploratória. Segundo Gil (2008), a pesquisa exploratória busca introduzir a formulação de um problema para pesquisas posteriores.

#### **3.2 Materiais e métodos**

Este trabalho será prioritariamente teórico, complementado com análise computacional das velocidades, pressões e perda de carga dos tubos de Venturi projetados.

Para a análise fluidodinâmica computacional será utilizado o programa ANSYS 2019 R1 com a licença de estudante. A licença de estudante possui várias ferramentas de estudo no ANSYS, porém a apresentação dos dados é limitada.

### 3.3 Variáveis e Indicadores

Segundo Gerhardt *et al.*, (2009), as variáveis podem ser classificadas como um atributo mensurável que varia entre os indivíduos, enquanto os indicadores são ferramentas de comparação entre a situação atual e a situação desejada.

A Tabela 1 mostra as variáveis e indicadores deste trabalho.

Tabela 1 – Variáveis e indicadores do trabalho

Variável	Indicadores
Velocidade	Coefficiente de cavitação
Pressão	Velocidade Sônica do escoamento das bolhas
Ângulos	Intensidade da Turbulência
Diâmetro	Contrapressão

Fonte: Pesquisa direta (2019)

As variáveis de velocidade e pressão se alteram conforme acontecem as variações na sessão transversal do tubo de Venturi. Os ângulos de convergência e divergência influenciam na intensidade da turbulência e na contrapressão do tubo de Venturi. O coeficiente de cavitação depende diretamente da pressão do fluido e da velocidade no escoamento.

Os tubos de Venturi poderão ser avaliados de acordo com seu diâmetro original, o diâmetro de sua garganta, os ângulos de suas sessões convergente e divergente. Neste trabalho os indicadores são o coeficiente de cavitação, a velocidade sônica do escoamento das bolhas, a intensidade da turbulência e a contrapressão gerada.

### 3.4 Instrumento de coleta de dados

A coleta de dados é o momento da pesquisa onde os instrumentos escolhidos e a metodologia selecionada são aplicados em busca do resultado desejado (MARCONI *et al.*, 2003).

Todos os dados deste trabalho são originados de pesquisa bibliográfica, correspondentes à área de geração de microbolhas e fluidodinâmica computacional, tendo como principal fonte, artigos científicos publicados em revistas de relevância mundial e teses de monografia, mestrados e doutorados destas áreas e afins.

### **3.5 Tabulação dos dados**

Segundo Gil (2008), tabulação é o processo de agrupar e contar os casos que estão nas várias categorias de análise.

Os dados deste trabalho serão apresentados através de diagramas gerados pelo ANSYS 2019 R1.

### **3.6 Considerações finais do capítulo**

Neste capítulo foram apresentadas as ferramentas e mecanismos de análise para atingir o objetivo proposto. No próximo capítulo será apresentada a análise dos resultados experimentais do problema proposto.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas as condições que foram implementadas no ANSYS 2019 R1 para a análise do fluido e os resultados obtidos pela ferramenta ANSYS Fluid.

### 4.1 Definição das dimensões dos tubos de Venturi

A Tabela 2 apresenta as dimensões dos parâmetros dos tubos de Venturi modelados, utilizados neste trabalho, respectivamente, o diâmetro de entrada, diâmetro do pescoço (garganta), comprimento de entrada, ângulo de convergência, ângulo de divergência, e comprimento de saída.

Tabela 2 – Perfis dos tubos de Venturi analisados

Vazão de 2000l/h						
Tubo de Venturi	Diâmetro da entrada (mm)	Diâmetro da garganta (mm)	Comprimento da entrada (mm)	Ângulo de convergência (°)	Ângulo de divergência (°)	Comprimento da saída (mm)
1	20	4	20,8	21	7	65,2
2	20	3,5	30,8	15	15	30,8
3	20	3	48,2	10	21	22,1
4	20	4	69,23	7	5	97,2

Fonte: Pesquisa direta (2019)

O comprimento da garganta foi mantido constante em 25mm para todos os tubos de Venturi e o diâmetro de entrada mantido em 20mm, que corresponde ao valor do diâmetro da tubulação utilizada nestes modelos de skimmers comerciais, de fabricação nacional.

Os ângulos de convergência foram definidos de maneira a explorar o efeito da variação do ângulo de convergência e do ângulo de divergência no número de cavitação e na intensidade da turbulência. O tubo de Venturi com ângulo de convergência de 21° e o de

divergência de  $7^\circ$  foi escolhido porque são valores que minimizam a perda de carga do tubo de Venturi (FUJIWARA, 2007).

Os diâmetros de entrada foram definidos baseados nos projetos de construção dos skimmers que utilizam conexões naquelas dimensões. Os diâmetros do pescoço foram definidos baseados no trabalho de Li (2017), de forma que a velocidade na garganta atinja valores próximos a 15m/s com uma limitação de 3mm de diâmetro da garganta, devido às limitações de construção de um tubo de Venturi com diâmetro da garganta menores.

Para melhor compreensão do perfil e das dimensões dos tubos de Venturi analisados, a Figura 18 apresenta os perfis dos 4 tubos de Venturi deste trabalho sem a sua simetria de eixo. Na simulação foi utilizada a simetria de eixo para reduzir o tempo de processamento sem prejudicar a precisão dos cálculos

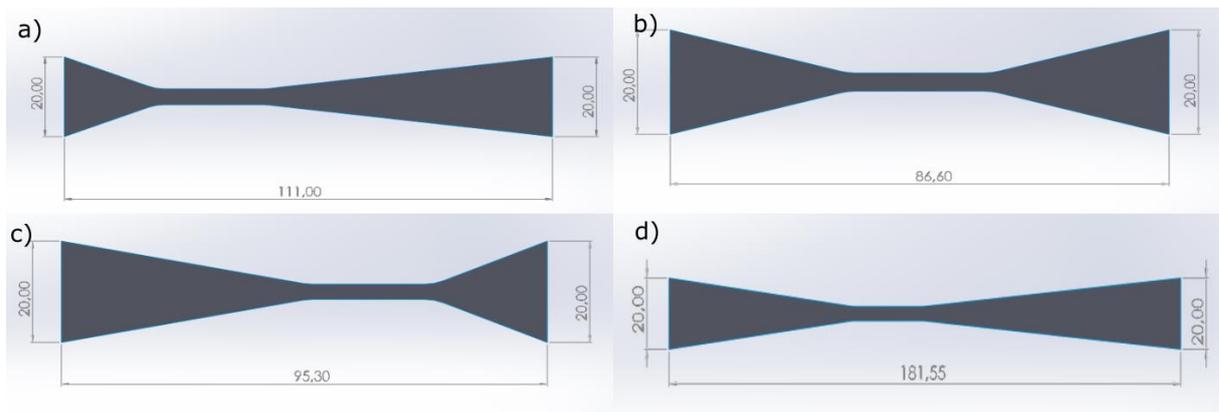


Figura 17: Perfis dos Tubos de Venturi. Sendo: a) tubo de Venturi 1, b) tubo de Venturi 2, c) Tubo de Venturi 3 e d) tubo de Venturi 4.

Fonte: Pesquisa direta (2009)

## 4.2 Definição da malha

A malha foi definida de maneira igual para todos os modelos de tubos de Venturi. A malha foi gerada automaticamente com cada célula com tamanho de elemento de 0,075mm, taxa de transição de 0,272 e taxa de crescimento de 1,2.

Foi feito um refinamento nas paredes do Venturi em nível 3 devido aos fenômenos que acontecem em maior intensidade nessas regiões.

O perfil 2D do tubo de Venturi 1 apresentou uma superfície de 566,33 mm<sup>2</sup>, 138710 nós e 134894 elementos.

O perfil 2D do tubo de Venturi 2 apresentou uma superfície de 405,88 mm<sup>2</sup>, 102220 nós e 99221 elementos.

O perfil 2D do tubo de Venturi 3 apresentou uma superfície de 442,1 mm<sup>2</sup>, 111542 nós e 108223 elementos.

O perfil 2D do tubo de Venturi 4 apresentou uma superfície de 989,79mm<sup>2</sup>, 236995 nós e 230898 elementos.

### **4.3 Definição das condições de contorno**

As condições de contorno foram definidas de forma a se aproximar ao máximo das condições reais de utilização de um tubo de Venturi para a geração de microbolhas em um skimmer doméstico.

- O escoamento foi definido como multifásico envolvendo uma mistura de água e ar. A temperatura dos fluidos é de 25°C e a fração volumétrica do ar em relação a água é de 10%.
- A opção das equações de energia se mostra ativada.
- O modelo de análise de turbulência é o k-epsilon padrão.
- O critério de convergência absoluta para todos os fatores foi definido em 0,00001.
- A vazão do fluido é de 2000 litros por hora.
- A pressão manométrica inicial foi definida como 0 Pa.
- As análises foram feitas considerando regime permanente.

### **4.4 Resultados das simulações**

Os resultados estão apresentados em função das dimensões do tubo de Venturi e estão contidos nos diagramas de pressão, velocidade, número de cavitação e intensidade da turbulência.

#### **4.4.1 Pressão**

A Figura 18 apresenta a pressão simulada nos 4 tubos de Venturi analisados. A maior contrapressão encontrada foi de 240 KPa no tubo de Venturi 3 e a menor de 134,9 KPa no tubo de Venturi 4.

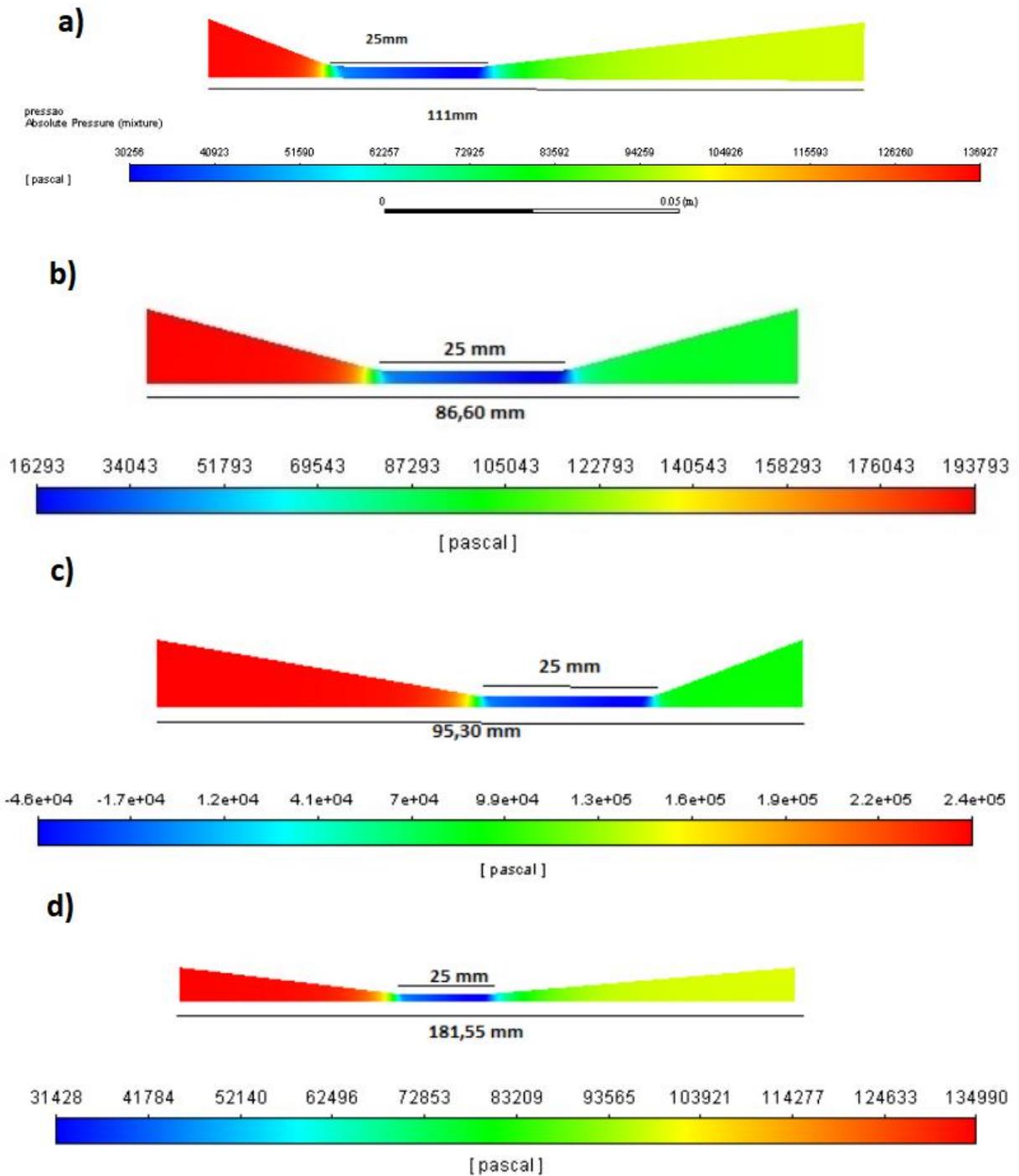


Figura 18: Resultado da pressão simulada nos tubos de Venturi analisados. a) Tubo de Venturi 1. b) Tubo de Venturi 2. c) Tubo de Venturi 3. d) Tubo de Venturi 4.  
Fonte: Pesquisa direta (2019)

#### 4.4.2 Velocidade

A Figura 19 apresenta a velocidade simulada nos 4 tubos de Venturi analisados. A maior velocidade encontrada foi de 24,41 m/s no tubo de Venturi 3 e a menor de 14,50 m/s no tubo de Venturi 1.

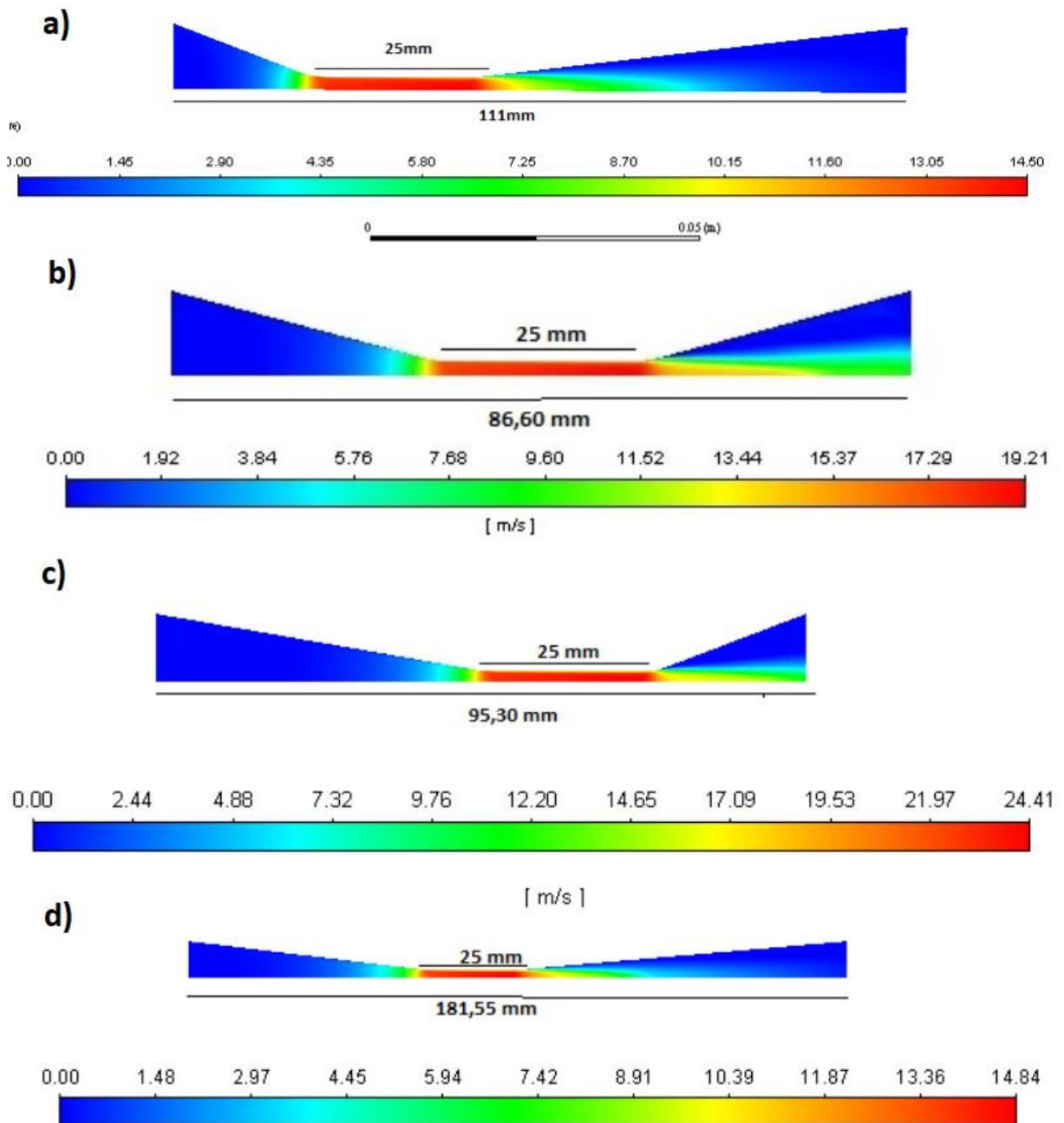


Figura 19: Resultado da velocidade simulada nos tubos de Venturi analisados. a) Tubo de Venturi 1. b) Tubo de Venturi 2. c) Tubo de Venturi 3. d) Tubo de Venturi 4.

Fonte: Pesquisa direta (2019)

#### 4.4.3 Número de cavitação

A Figura 20 apresenta a simulação do coeficiente de cavitação dos tubos de Venturi analisados. Os valores acima de 1 foram ocultados para facilitar a análise já que não são importantes.

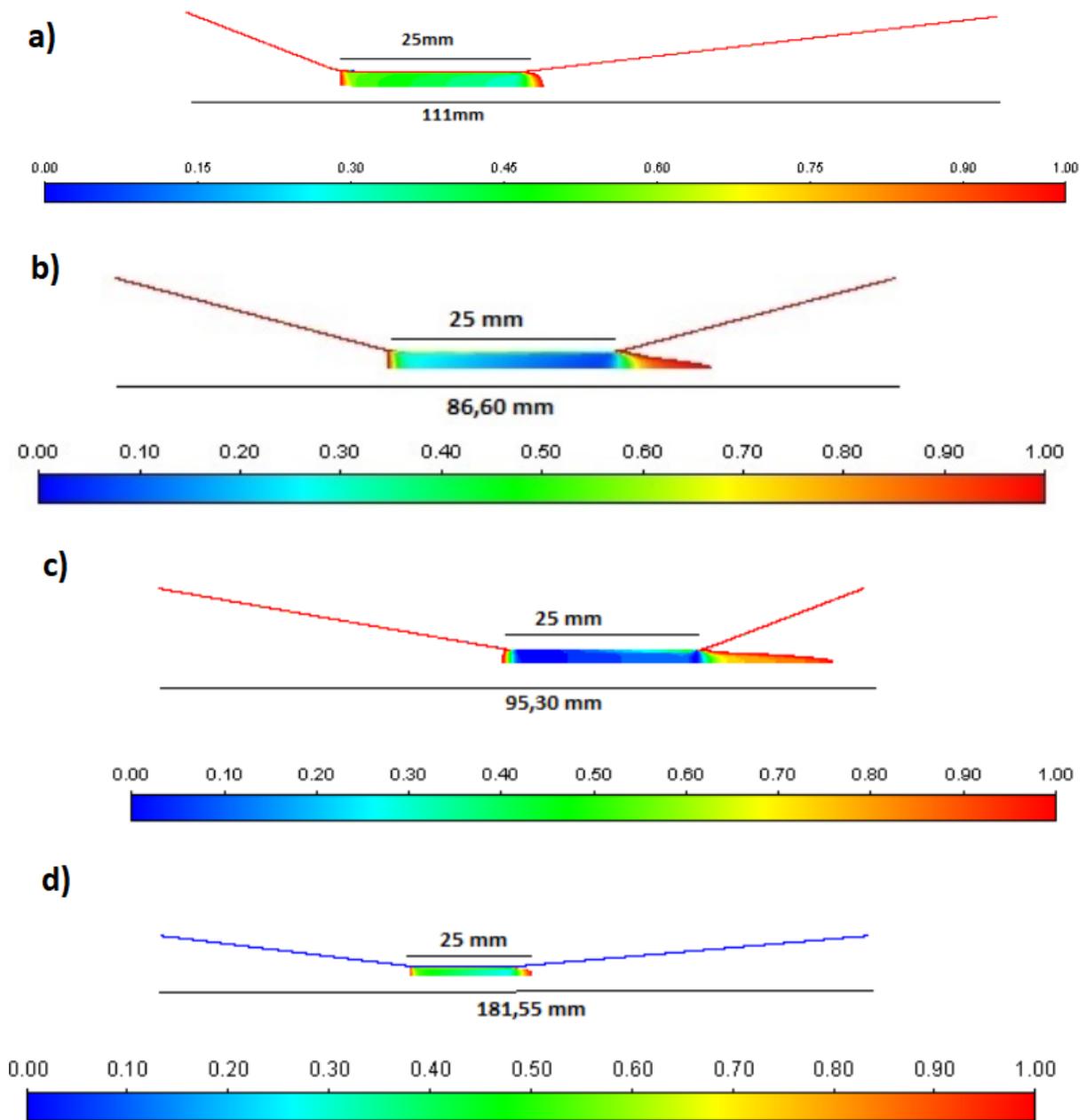


Figura 20: Resultado do coeficiente de cavitação simulado nos tubos de Venturi analisados. a) Tubo de Venturi 1. b) Tubo de Venturi 2. c) Tubo de Venturi 3. d) Tubo de Venturi 4.

Fonte: Pesquisa direta (2019)

#### 4.4.4 Intensidade da turbulência

A Figura 21 apresenta os valores simulados da intensidade da turbulência nos tubos de Venturi analisados.

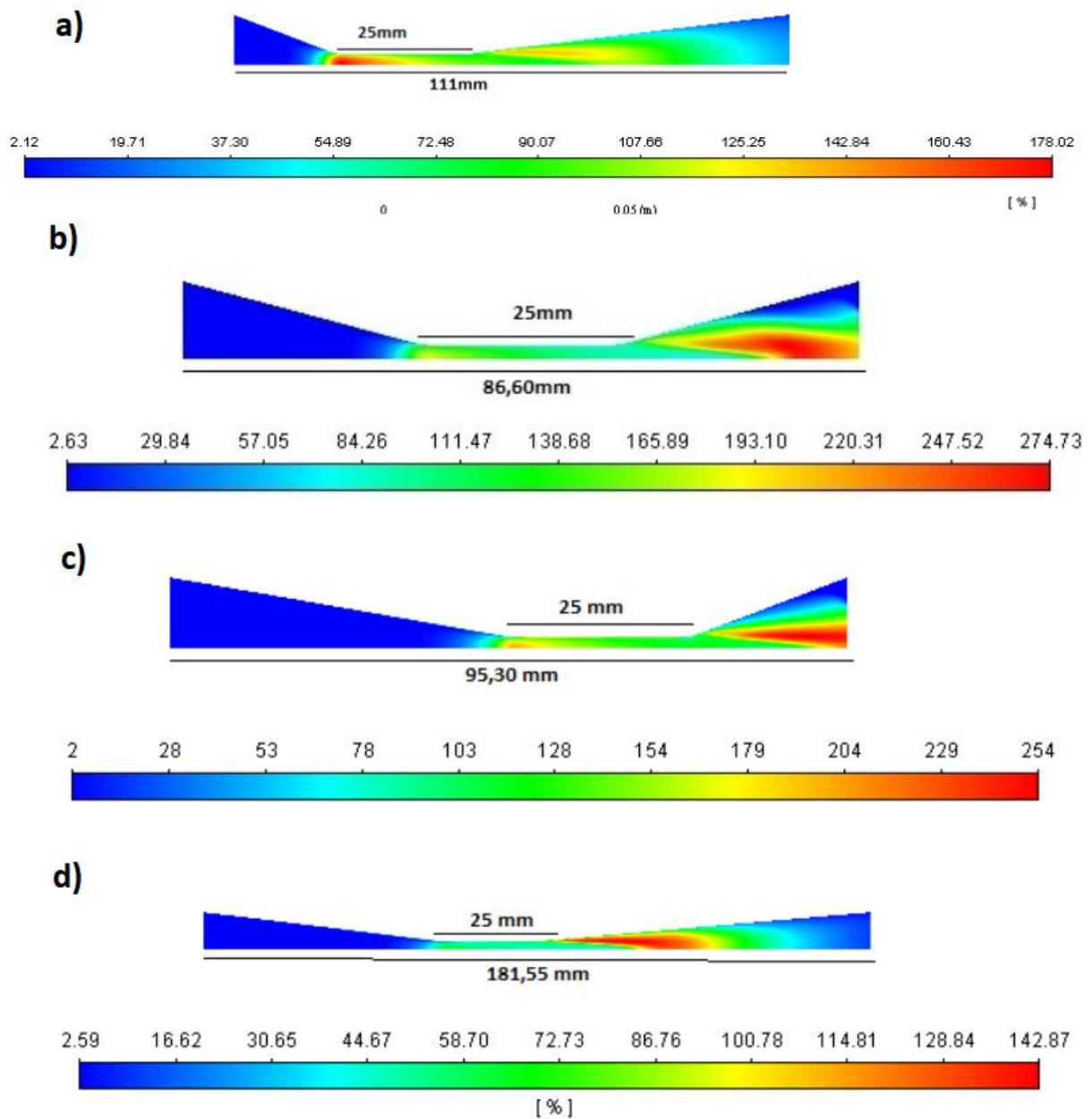


Figura 21: Resultado da intensidade da turbulência simulada nos tubos de Venturi analisados. a) Tubo de Venturi 1. b) Tubo de Venturi 2. c) Tubo de Venturi 3. d) Tubo de Venturi 4.

#### 4.5 Análise dos resultados

Os quatro tubos de Venturi analisados apresentaram características de escoamento semelhantes em função do diâmetro do pescoço e consideravelmente diferentes em função dos ângulos de convergência e divergência. A Tabela 3 apresenta os valores de velocidade máxima, contrapressão, a indicação se atingiu valores menores que 1 de coeficiente de cavitação e a intensidade da turbulência máxima dos tubos de Venturi simulados.

Tabela 3: Resumo dos indicadores dos tubos de Venturi simulados.

<b>Tubo de venturi</b>	<b>Velocidade máxima (m/s)</b>	<b>Contrapressão (Pa)</b>	<b>Coefficiente de Cavitação &lt; 1</b>	<b>Intensidade da turbulência (%)</b>
1	14,5	136927	sim	178,02
2	19,21	193793	sim	274,73
3	24,41	240000	sim	254
4	14,84	134990	sim	142,87

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Em relação ao diâmetro do pescoço, os tubos de Venturi com valores de 3 mm e 3,5 mm, Tubo de Venturi 2 e 3, apresentaram uma contrapressão mais elevada que a pressão das bombas comumente utilizadas nesses equipamentos, o que inviabiliza o uso destes tipos de tubo de Venturi. Para a finalidade específica do estudo desse trabalho, não somente a eficiência na geração de microbolhas precisa ser considerada, mas as limitações dos materiais também precisam ser consideradas.

Em relação ao ângulo de convergência e divergência, quanto menor o ângulo, menor a perda de pressão e também maior a região com uma alta intensidade da turbulência na região divergente. Esse fator é muito importante para redução do tamanho da bomba utilizada e melhoria da eficiência de um skimmer.

Quanto ao número de cavitação, todos os tubos de Venturi analisados apresentaram na região do seu pescoço número de cavitação menores que 1, o que sinaliza uma alta probabilidade de ocorrer a geração de microbolhas. Os tubos com diâmetro de pescoço menor apresentaram uma maior região de cavitação muito além da região do pescoço, o que sinaliza uma maior tendência à geração de microbolhas.

Todos os tubos de Venturi apresentaram velocidade do som no escoamento das microbolhas, menor que a velocidade de escoamento do fluido na região do pescoço, o que também confirma a capacidade de geração de microbolhas. Esse se mostrou como um parâmetro redundante quando analisamos o número de cavitação em um tubo de Venturi nas condições utilizadas. Não foi possível a plotagem dos diagramas desse fator, os quais ficaram confusos e incompletos, provavelmente devido à versão utilizada.

Quanto à intensidade da turbulência, o tubo de Venturi 2 apresentou uma grande região com valores superiores a 150% mesmo não sendo o tubo de Venturi com maior velocidade encontrada. Provavelmente esse grande intensidade da turbulência é devido ao

menor ângulo de divergência. O tubo de Venturi 4 apresentou uma grande região com valores acima dos 120%, muito superiores ao do tubo de Venturi 1 mesmo ambos tendo o mesmo diâmetro de garganta.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 Conclusões

Após toda a análise da fundamentação teórica e das análises com a ferramenta de fluidodinâmica computacional *ANSYS R1 2019* verificou-se que o tubo de Venturi que mais se adequa para utilização em skimmers domésticos, considerando-se a vazão de 2000 litros por hora é o tubo de Venturi 4. Este possui diâmetro de entrada de 20 mm, diâmetro de pescoço de 4 mm, ângulo de convergência de  $7^\circ$  e ângulo de divergência de  $5^\circ$ . O tubo de Venturi 4 apresentou menor contrapressão com valor de 134 kPa, em comparação ao tubo de Venturi 1, o qual apresentou contrapressão de 139 kPa. A pressão de saída do tubo de Venturi 4 também foi maior que a do tubo de Venturi 1, o que indica uma menor perda de carga do sistema. O tubo de Venturi 4 também apresentou uma região na sua sessão divergente com maior intensidade da turbulência que o tubo de Venturi 1. O tubo de Venturi 1 e o tubo de Venturi 4 apresentaram número de cavitação em áreas de dimensões semelhantes com valores significativamente iguais.

Devido à baixa pressão das bombas usadas em skimmers, cuja faixa de pressão varia entre 130 kPa e 150 kPa, tubos de Venturi com áreas de pescoço com diâmetro pequeno fazem com que a bomba não consiga manter o fluxo nas condições adequadas de funcionamento.

### 5.2 Recomendações

Para resultados mais precisos e análise ponto a ponto dos valores encontrados, recomenda-se a utilização da licença comercial do *ANSYS*, o qual permite uso de maior número de funcionalidades na análise dos resultados.

Para melhor estudo da aplicação da microbolhas em skimmers é indicado pesquisas posteriores sobre a influência da intensidade da turbulência e da região do coeficiente de cavitação no tamanho das microbolhas geradas.

A influência da rugosidade superficial do tubo de Venturi pode melhorar a geração das microbolhas aumentando a turbulência nas regiões próximas à parede do tubo, sendo esse um parâmetro indicado para estudos posteriores.

## 6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGARWAL, Ashutosh; NG, Wun Jern; LIU, Yu. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. **Chemosphere**, v. 84, n. 9, p. 1175-1180, 2011.

ANSYS. **About ANSYS**. Disponível em: <https://www.ansys.com/about-ansys>. Acesso em: 03 de jun. 2019.

BURNS, S. E.; YIACOUMI, S.; TSOURIS, C. Microbubble generation for environmental and industrial separations. **Separation and Purification Technology**, v. 11, n. 3, p. 221-232, 1997.

Chen-Yang Wu. **Aquarium protein skimmer**, US6808625B1, 26 out. 2004. 12p.

DOKU, George N. et al. Microbubble Beam (MBB), A Potential Dispersion Mechanism for Multiphase Gas– Liquid Microreactor Systems. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 42, n. 16, p. 3721-3730, 2003.

EDZWALD, James K. Principles and applications of dissolved air flotation. **Water Science and Technology**, v. 31, n. 3-4, p. 1-23, 1995.

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. **William George Armstrong, Baron Armstrong**. Disponível em: <https://www.britannica.com/biography/William-George-Armstrong-Baron-Armstrong-of-Cragside> . Acesso em : 09 de set de 2018.

FONSECA, J. J. S. Metodologia da pesquisa científica. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila. **SILVEIRA, DT; CÓRDOVA, FP A pesquisa científica. Cap**, v. 2, p. 31-42, 2016.

FUJIWARA, Akiko et al. Bubble breakup phenomena in a venturi tube. In: **ASME/JSME 2007 5th Joint Fluids Engineering Conference**. American Society of Mechanical Engineers, 2007. p. 553-560.

GABBARD, C. H. **Development of a Venturi type bubble generator for use in the molten-salt reactor xenon removal system**. Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States), 1972.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de pesquisa**. Plageder, 2009.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.

GORDIYCHUK, Andriy et al. Size distribution and Sauter mean diameter of micro bubbles for a Venturi type bubble generator. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 70, p. 51-60, 2016.

HYDAC. **Piston Accumulators**. Disponível em: <https://www.hydac.com.au/products/accumulators/piston-accumulators/> Acesso em: 09 de set de 2018.

IKEURA, H.; KOBAYASHI, F.; TAMAKI, M. Removal of residual pesticide, fenitrothion, in vegetables by using ozone microbubbles generated by different methods. **Journal of Food Engineering**, v. 103, n. 3, p. 345-349, 2011.

KUMAR, P. Senthil; PANDIT, A. B. Modeling hydrodynamic cavitation. **Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology**, v. 22, n. 12, p. 1017-1027, 1999.

LI, Mingda. Influence of Venturi Tube Geometry and Particle Properties on the Hydrodynamic Cavitation for Fine Particle Flotation. 2017.

Li, Pan. **Development of advanced water treatment technology using microbubbles**. Disponível em: <http://iroha.scitech.lib.keio.ac.jp:8080/sigma/bitstream/handle/10721/2127/document.pdf?sequence=4&isAllowed=y>>. Acesso em: 23 set. 2018.

MARCONI, Marina de Andrade. LAKATOS, Eva maria. **Fundamentos de metodologia científica**, v. 5, 2003.

MARINE DEPOT. **How to Plumb a Sump – Basic, Intermediate and Advanced**. Disponível em: <https://blog.marinedepot.com/education-center/charts-diagrams/plumb-sump-basic-intermediate-advanced> . Acesso em: 07 de jul de 2019.

OLIVEIRA, Natália MB; VIEIRA, Luiz Gustavo M.; DAMASCENO, João JR. Fluidodinâmica computacional aplicada ao estudo de medidores de vazão. **Horizonte Científico**, v. 5, n. 2, 2011.

OWEN, S.J., **A survey of unstructured mesh generation technology**, in: Proc. 7th Internat. Meshing Roundtable, Dearborn, MI, USA, October 1998.

PARMAR, Rajeev; MAJUMDER, Subrata Kumar. Microbubble generation and microbubble-aided transport process intensification—A state-of-the-art report. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 64, p. 79-97, 2013.

RODRIGUES, Rafael Teixeira; RUBIO, Jorge. DAF—dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry. **International Journal of Mineral Processing**, v. 82, n. 1, p. 1-13, 2007.

ROUSE, Hunter; INCE, Simon. **History of hydraulics**. 1980.

SIRSI, S. R.; BORDEN, M. A. Microbubble compositions, properties and biomedical applications. **Bubble Science, Engineering & Technology**, v. 1, n. 1-2, p. 3-17, 2009.

TERASAKA, Koichi et al. Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge. **Chemical engineering science**, v. 66, n. 14, p. 3172-3179, 2011.

UNGER, Evan C. et al. Therapeutic applications of lipid-coated microbubbles. **Advanced drug delivery reviews**, v. 56, n. 9, p. 1291-1314, 2004.

XUE, Ziqiu et al. Carbon microbubbles sequestration: a novel technology for stable underground emplacement of greenhouse gases into wide variety of saline aquifers, fractured rocks and tight reservoirs. **Energy Procedia**, v. 1, n. 1, p. 3655-3662, 2009.

YOUNG, DONALD F.; MUNSON, BRUCE RE OKIISHI; OKIISHI, T. H. Fundamentos da mecânica dos fluidos. **Tradução da 4ª edição norte-americana**. Edgard Blucher, 2004.

ZIMMERMAN, William B. et al. Design of an airlift loop bioreactor and pilot scales studies with fluidic oscillator induced microbubbles for growth of a microalgae *Dunaliella salina*. **Applied Energy**, v. 88, n. 10, p. 3357-3369, 2011.

