

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE INJEÇÃO DE ÁGUA SOBRE O ESCOAMENTO
DE AR EM UM LAVADOR VENTURI UTILIZANDO *ANSYS FLUENT***

Beatriz Moraes Sobral

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos.

Orientadora: Prof^ª. Vádila Giovana Guerra Béttega

São Carlos – SP

2022

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Vádila Giovana Guerra Béttega. DEQ/UFSCar

Convidado: Me. Alessandro Estarque de Oliveira, DEQ/UFSCar

Professor da Disciplina: Prof. Dr. Ernesto Antonio Urquieta Gonzalez, DEQ/UFSCar

Trabalho de Graduação apresentado no dia 11 de abril de 2022 perante a seguinte banca examinadora:

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, pela Sua misericórdia e graça, ao ter me concedido vida eterna pelo perdão por meio de Jesus Cristo, e também por cuidar e sustentar cada área da minha vida no dia a dia, guardar meus passos e trazê-los de volta ao Caminho sempre que necessário.

Em segundo lugar, gostaria de agradecer à minha família por todo amor, empenho, dedicação, investimento, paciência e acolhimento, para que, com aquilo que estava ao meu alcance, eu tivesse a oportunidade de desfrutar dos melhores recursos disponíveis. Amo vocês! Gostaria de destacar a garra e apoio da minha mãe Milene em tudo o que fez por mim e por todos os ensinamentos, e pelo empenho, dedicação e investimento dos meus avós Odilson e Helena em cada coisa, desde a saúde até a educação. A gratidão que eu sinto por vocês três é grande demais!

Gostaria de agradecer à professora Vádila pela orientação no trabalho, explicações de dúvidas, ensinamentos e recomendações sobre como realizar e melhorar a escrita e a apresentação. Gostaria de agradecer também aos demais mestres que me ensinaram em cada etapa e, também em destaque, à professora Alessandra Verri por ter me acolhido no primeiro semestre e por ter os ouvidos abertos, mesmo anos após ter me dado aula.

Gostaria de agradecer aos meus amigos por todo aprendizado, estudos e momentos juntos. Nisso, gostaria de destacar a minha amiga-irmã Isabela Morales e sua mãe, Marisa Morales, por toda irmandade, tempo de qualidade e aprendizado, principalmente pela mão estendida nos momentos em que mais precisei; a minha grande amiga Amanda Falqueto pela amizade, estudos bíblicos, conversas (e cafés) e parceria nas demandas da EBD e da ABU; os meus grandes amigos Daniel Moura e Larissa Gonçalves pela amizade, conversas, companhia e pela oportunidade de cada um trazer à memória cidades importantes para mim; e Ana Nascimento por todo acolhimento, mãos e ouvidos amigos, compartilhamentos e encorajamentos; o meu estimado amigo Stefan Thiago, cuja amizade tem se tornado muito importante para mim; as minhas queridas amigas Gabriela Ribeiro, Mariana Menezes, Jéssica Santos, Jaqueline Melo, Jéssica Pettinatti, Gabriela Senedese e Helena Goulart pela amizade, trabalhos em grupo, companheirismo e conhecimento adquirido; as minhas amigas de mais longa data Ana Luiza, Camila, Rafaela Vincensi e Rafaela Estolano por toda amizade *“old but gold”*. Agradeço, com muito amor também, aos meus irmãos da Igreja Presbiteriana de São Carlos pelo fortalecimento mútuo no Caminho do Senhor.

Por fim, agradeço aos meus colegas da EPEQ e do grupo 10 da Imersão de Projetos 2021/1, tanto pelos estudos quanto pelos retornos, torço demais por vocês.

RESUMO

A fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics, CFD* em inglês) é uma ferramenta que simula escoamentos internos e externos através da resolução de modelos por métodos numéricos até atingir um valor predeterminado para a convergência, com a vantagem da redução de custos e de tempo na coleta de dados. O equipamento estudado foi o lavador Venturi de seção circular, por sê-lo tradicionalmente empregado nas indústrias graças à sua alta eficiência na lavagem de gases. Devido ao fato de a atomização do jato de água ocorrer pela alta velocidade do ar em relação à do líquido, e que os fluidos escoam perpendicularmente, o desempenho do lavador é influenciado por fatores como a razão líquido-gás, a queda de pressão e a configuração dos orifícios de injeção de água. O objetivo principal deste trabalho foi investigar a influência da entrada de líquido sobre o escoamento de ar em um lavador Venturi vertical de seção circular e, para isso, foram feitas simulações utilizando o *software Fluent* contido no pacote *Ansys Student 2021 R1*. Nas simulações, a velocidade de entrada do gás e o diâmetro de entrada de água foram mantidos constantes, enquanto foram variadas a quantidade de orifícios de 1 a 4 e a velocidade de entrada do líquido – cujos valores considerados foram 4,5; 6,5 e 8,5 m/s, assim como foram obtidos resultados para os casos em que não houve injeção de água, de modo a comparar os cenários obtidos. De acordo com os resultados, para uma mesma malha, quanto maior a quantidade de orifícios, maior a queda de pressão obtida e, quanto maior a velocidade de entrada de água, maior a queda de pressão e maior a penetração de água. Quanto à qualidade das malhas, o seu refinamento levou a resultados mais precisos e curvas mais suaves com menor custo computacional; assim, melhores resultados foram obtidos na mesma faixa de quantidade de iterações. Diante dos resultados obtidos, a configuração operacional indicada é a de 4 orifícios com entrada de água a 6,5 m/s, devido à melhor distribuição de líquido na garganta, ausência de vórtices e maior velocidade no centro do equipamento.

ABSTRACT

Computational Fluid Dynamics (CFD) is a tool that simulates internal and external flows by solving models through numerical methods until reaching a predetermined value for convergence, with the advantage of reducing costs and time in data collection. The equipment that was studied was a Venturi scrubber with circular section because it is traditionally used in industries due to its high efficiency in gas scrubbing. Due to the fact that the atomization of the water jet occurs due to the high velocity of the air in relation to that of the liquid and that the fluids flow perpendicularly, the scrubber performance is influenced by factors such as the liquid-gas ratio, the pressure drop and the configuration of the water injection holes. The main goal of this work was to check the influence of the liquid inlet on the air flow in a vertical Venturi scrubber with circular section and, for that, simulations were performed using the Fluent *software* contained in the Ansys Student 2021 R1 package. In the simulations, the gas inlet velocity and the water inlet diameter were kept constant, while the number of holes were varied from 1 to 4 and the liquid inlet velocity values were 4.5; 6.5 and 8.5 m/s; in addition, results were obtained for cases in which there was no water injection, in order to compare the scenarios obtained. Considering the data collected for the same mesh, the greater the number of holes, the bigger the pressure drop obtained and, the higher the water inlet velocity, the greater the pressure drop and the longer the penetration of water. As for the quality of the meshes, their refinement resulted in more accurate results and smoother curves with lower computational cost; thus, better results were obtained in the same range of number of iterations. In view of the results obtained, the scenario indicated would be of 4 holes with water inlet at 6.5 m/s due to better distribution of liquid within the equipment, absence of vortices and higher velocity in the central region of the equipment.

SUMÁRIO

BANCA EXAMINADORA	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS E QUADROS	x
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE QUADROS	x
NOMENCLATURA.....	v
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 CONTROLE DE QUALIDADE DO AR.....	3
2.2 LAVADORES VENTURI	4
2.2.1 Equipamento Venturi	4
2.2.2 Funcionamento	10
2.2.3 Principais variáveis operacionais.....	11
2.3 Modelagem da fluidodinâmica computacional.....	1213
2.4 Compilação de estudos	16
3 METODOLOGIA	18
3.1 GEOMETRIA.....	18
3.2 MALHA	22
3.2.1 Malha grosseira	23
3.2.2 Malha refinada	24
3.3 <i>SETUP E SOLVER ANSYS FLUENT</i>	26
3.4 PÓS-PROCESSAMENTO	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4.1 RESULTADOS POR MALHA.....	30
4.1.1 Malha grosseira	30
4.1.1.1 Um orifício.....	30
4.1.1.2 Dois orifícios.....	34
4.1.2 Malha refinada	38
4.1.2.1 Um orifício.....	38
4.1.2.2 Dois orifícios.....	44

4.2	COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS RNG K-E E SST K- Ω	50
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE MALHAS	54
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
	APÊNDICE A - Malha grosseira: Resultados gerados para 3 e 4 orifícios	64
	APÊNDICE B – Malha refinada: perfis (1 e 2 orifícios) e todos os resultados gerados para 3 e 4 orifícios	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Lavador Venturi <i>Pease-Anthony</i> .	4
Figura 2.2	Lavador Venturi vertical de seção circular.	5
Figura 2.3	Tubo Venturi como medidor de vazão.	5
Figura 2.4	Fluidodinâmica no difusor.	6
Figura 2.5	Trajatória do líquido no jato: a) Figura esquemática; b) Entrada de um jato; c) Trajetória dos jatos para o cenário de multiorifícios.	6
Figura 2.6	Colisão por inércia.	9
Figura 2.7	Mecanismo de coleta por difusão.	10
Figura 2.8	Coleta por interceptação direta.	10
Figura 2.9	Tipos de escoamentos líquido-gás para diâmetros de até 50 mm: a) Escoamento aerado (" <i>Bubbly flow</i> "); b) Fluxo em golfadas (" <i>Slug flow</i> "); c) Fluxo agitante (" <i>Churn flow</i> "); d) Fluxo anular (" <i>Annular flow</i> ").	14
Figura 2.10	Equações governantes e seus respectivos graus de modelagem e de custo computacional.	15
Figura 3.1	Contorno do lavador Venturi antes da revolução.	17
Figura 3.2	Configurações das injeções de água no lavador Venturi: a) 1 orifício; b) 2 orifícios; c) 3 orifícios; d) 4 orifícios.	19
Figura 3.3	Medidas do Venturi (3D): a) Cotas do diâmetro de entrada e saída e comprimentos dos alongamentos, convergente, garganta e difusor; b) Destaque da garganta e dos orifícios.	20
Figura 3.4	Malhas grosseiras geradas para cada geometria: a) 1 orifício; b) 2 orifícios; c) 3 orifícios; d) 4 orifícios.	23
Figura 3.5	Malha refinada: a) Porção da malha para melhor visualização; b) Malha da garganta.	24
Figura 4.1	Contorno de pressão para injeção por 1 orifício (malha grosseira): a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.	31
Figura 4.2	Gráfico de pressão para injeção por 1 orifício (malha grosseira).	31
Figura 4.3	Contorno de velocidade para injeção por 1 orifício (malha grosseira):	32

	a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.	
Figura 4.4	Gráfico de velocidade para escoamento de água por 1 orifício (malha grosseira).	33
Figura 4.5	Contorno da fração volumétrica de água para 1 orifício (malha grosseira): a) velocidade da água de 4,5 m/s; b) velocidade da água de 6,5 m/s; c) velocidade da água de 8,5 m/s.	33
Figura 4.6	Contorno de pressão para injeção por 2 orifícios (malha grosseira): a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.	34
Figura 4.7	Gráfico de pressão para injeção por 2 orifícios (malha grosseira).	35
Figura 4.8	Contorno de velocidade para injeção por 2 orifícios (malha grosseira): a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.	36
Figura 4.9	Gráfico de velocidade para escoamento de água por 2 orifícios (malha grosseira).	36
Figura 4.10	Contorno da fração volumétrica de água para injeção por 2 orifícios (malha grosseira): a) velocidade da água de 4,5 m/s; b): velocidade da água de 6,5 m/s; c): velocidade da água de 8,5 m/s.	37
Figura 4.11	Queda de pressão para cada velocidade considerando as configurações dos orifícios (malha grosseira).	38
Figura 4.12	Comparativo do comportamento da pressão para injeção por 1 orifício (malha refinada): a) Contorno para malha refinada; b) Contorno para malha grosseira: i) escoamento somente de ar; ii) velocidade de água a 4,5 m/s; iii) velocidade de água a 6,5 m/s; iv) velocidade de água a 8,5 m/s.; c) Comparativo entre os valores de queda em cada malha.	39
Figura 4.13	Comparativo de contornos de velocidade entre malhas para injeção por 1 orifício: a) Malha grosseira; b) Malha refinada: i) escoamento somente de ar; ii) velocidade de água a 4,5 m/s; iii) velocidade de água a 6,5 m/s; iv) velocidade de água a 8,5 m/s.	41
Figura 4.14	Gráfico de velocidade para escoamento de água por 1 orifício: a) Malha grosseira; b) Malha refinada.	42
Figura 4.15	Comparativo de contornos de fração volumétrica de água entre malhas para injeção por 2 orifícios: a) Malha grosseira; b) Malha refinada: i)	43

	escoamento somente de ar; ii) velocidade de água a 4,5 m/s; iii) velocidade de água a 6,5 m/s; iv) velocidade de água a 8,5 m/s.	
Figura 4.16	Comportamento da pressão para injeção por 2 orifícios (malha refinada): a) Contorno: i) escoamento somente de ar; ii) velocidade de água a 4,5 m/s; iii) velocidade de água a 6,5 m/s; iv) velocidade de água a 8,5 m/s.; b) Comparativo entre os valores de queda em cada malha.	44
Figura 4.17	Comparativo de contornos de velocidade entre malhas para injeção por 2 orifícios: a) Malha grosseira; b) Malha refinada: i) escoamento somente de ar; ii) velocidade de água a 4,5 m/s; iii) velocidade de água a 6,5 m/s; iv) velocidade de água a 8,5 m/s.	47
Figura 4.18	Comparativo de Perfis de velocidade para escoamento de água por 2 orifícios: a) Malha grosseira; b) Malha refinada.	48
Figura 4.19	Comparativo de contornos de fração volumétrica de água entre malhas para injeção por 2 orifícios: a) Malha grosseira; b) Malha refinada: i) escoamento somente de ar; ii) velocidade de água a 4,5 m/s; iii) velocidade de água a 6,5 m/s; iv) velocidade de água a 8,5 m/s.	49
Figura 4.20	Queda de pressão para cada velocidade considerando as configurações dos orifícios (malha refinada).	50
Figura 4.21	Contorno de pressão para injeção em 4 orifícios (comparação entre modelos): a) Modelo RNG k- ϵ ; b) Modelo SST k- ω .	51
Figura 4.22	Gráfico de pressão para injeção em 4 orifícios (comparação entre modelos).	51
Figura 4.23	Contorno de velocidade para injeção por 4 orifícios (comparação entre modelos): a) Modelo RNG k- ϵ ; b) Modelo SST k- ω .	52
Figura 4.24	Gráfico de velocidade para escoamento de água por 4 orifícios (comparação entre modelos).	53
Figura 4.25	Contorno de fração volumétrica da água para injeção por 4 orifícios (comparação entre modelos): a) Modelo RNG k- ϵ ; b) Modelo SST k- ω .	53
Figura 4.26	Contorno de pressão para injeção em 4 orifícios (comparação entre malhas): a) Malha grosseira; b) Malha refinada.	54
Figura 4.27	Gráfico de pressão para injeção em 4 orifícios (comparação entre malhas).	55
Figura 4.28	Contorno de velocidade para injeção em 4 orifícios (comparação entre malhas): a) Malha grosseira; b) Malha refinada.	56

Figura 4.29	Gráfico de velocidade para injeção em 4 orifícios (comparação entre malhas).	57
Figura 4.30	Contorno de fração volumétrica de água para injeção em 4 orifícios (comparação entre malhas): a) Malha grosseira; b) Malha refinada.	57
Figura A.1	Contorno de pressão para injeção por 3 orifícios (malha grosseira): a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.	65
Figura A.2	Gráfico de pressão para injeção por 3 orifícios (malha grosseira).	66
Figura A.3	Contorno de velocidade para injeção por 3 orifícios (malha grosseira): a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.	67
Figura A.4	Gráfico de velocidade para escoamento de água por 3 orifícios (malha grosseira).	67
Figura A.5	Contorno de fração volumétrica da água para injeção por 3 orifícios (malha grosseira): a) velocidade da água de 4,5 m/s; b): velocidade da água de 6,5 m/s; c): velocidade da água de 8,5 m/s.	68
Figura A.6	Contorno de pressão para injeção por 4 orifícios (malha grosseira): a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.	69
Figura A.7	Gráfico de pressão para injeção por 4 orifícios (malha grosseira).	69
Figura A.8	Contorno de velocidade para injeção por 4 orifícios (malha grosseira): a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.	70
Figura A.9	Gráfico de velocidade para escoamento de água por 4 orifícios (malha grosseira).	71
Figura A.10	Contorno de fração volumétrica de água (malha grosseira): a) velocidade da água de 4,5 m/s; Canto superior direito: b) velocidade da água de 6,5 m/s; c) velocidade da água de 8,5 m/s.	72
Figura B.1	Gráfico de pressão para injeção por 1 orifício (malha refinada).	74
Figura B.2	Gráfico de velocidade para escoamento de água por 1 orifício (malha refinada).	74
Figura B.3	Gráfico de pressão para injeção por 2 orifícios (malha refinada).	75
Figura B.4	Gráfico de velocidade para escoamento de água por 2 orifícios (malha refinada).	75

Figura B.5	Contorno de pressão para injeção por 3 orifícios (malha refinada): a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.	76
Figura B.6	Gráfico de pressão para injeção por 3 orifícios (malha refinada).	77
Figura B.7	Contorno de velocidade para injeção por 3 orifícios (malha refinada): a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.	77
Figura B.8	Gráfico de velocidade para escoamento de água por 3 orifícios (malha refinada).	78
Figura B.9	Contorno da fração volumétrica de água para injeção por 3 orifícios (malha refinada): a) velocidade da água de 4,5 m/s; b) velocidade da água de 6,5 m/s; c) velocidade da água de 8,5 m/s.	79
Figura B.10	Contorno de pressão para injeção por 4 orifícios (malha refinada): a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.	80
Figura B.11	Gráfico de pressão para injeção por 4 orifícios (malha refinada).	81
Figura B.12	Contorno de velocidade para injeção por 4 orifícios (malha refinada): a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.	82
Figura B.13	Gráfico de velocidade para escoamento de água por 4 orifícios (malha refinada).	82
Figura B.14	Contorno de fração volumétrica da água por 4 orifícios (malha refinada): a) velocidade da água de 4,5 m/s; b) velocidade da água de 6,5 m/s; c) velocidade da água de 8,5 m/s.	83

LISTA DE TABELAS E QUADROS

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Cenários de simulação.	15
Tabela 4.1	Valores dos critérios de qualidade <i>Skewness</i> e <i>Orthogonal Quality</i> para as malhas geradas.	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1	Faixas de valores de IQAr referentes aos níveis de classificação para as concentrações de poluentes atmosféricos.	3
Quadro 3.1	Dimensões do lavador Venturi.	16
Quadro 3.2	Propriedades das malhas grosseiras para cada geometria.	19
Quadro 3.3	Propriedades da malha refinada.	21
Quadro 3.4	Volume de malha e número de elementos para cada malha.	22
Quadro 3.5	Configurações quanto ao regime, modelos e intervalo de tempo.	23
Quadro 3.6	Condições de contorno.	24
Quadro 3.7	Fatores de Relaxação Explícita no regime pseudotransiente.	24
Quadro 3.8	Entidades usadas para o contorno e para os gráficos e suas medidas.	25

NOMENCLATURA

g	Aceleração da gravidade (=9,81)	[m/s ²]
A	Área	[m ²]
C	Concentração dos poluentes para cada nível	[μg/m ³]
d₀	Diâmetro do orifício de injeção	[mm]
z	Diferença de altura	[m]
k	Energia cinética de turbulência	[m ² /s ²]
I	Índice associado aos níveis de poluição	[-]
i	Índice do componente	[-]
N	Nível de poluição	[-]
n_j	Número de entradas de água	[-]
V_N	Número de Venturi	[-]
l*	Penetração do jato de líquido até a formação de gotas	[mm]
l**	Penetração máxima do jato de líquido até atomização significativa	[mm]
p*	Pressão	[Pa]
P	Pressão	[Pa]
Z	Profundidade do lavador	[m]
R₀	Raio da garganta	[mm]
P_{CFD}	Resultados de pressão do CFD-Post	[atm]
t	Tempo	[s]
M_i	Transferência de <i>momentum</i>	N.m
G*	Vazão volumétrica de gás	[m ³ /s]
L	Vazão volumétrica de líquido	[m ³ /s]
v	Velocidade	[m/s]
ū	Velocidade superficial média	[m/s]
u_G	Velocidade total do gás	[m/s]
f	Perda de carga por atrito	[m ² /s ²]
z₀	Distância no eixo X até o início da atomização	[mm]

Símbolos gregos

ρ	Densidade	[kg/m ³]
α	Fração volumétrica da fase dispersa	[-]

ε	Taxa de dissipação de energia cinética de turbulência	[m ² /s ³]
ω	Taxa de dissipação específica	s ⁻¹
τ	Tensor molecular	[Pa]
τ^t	Tensor turbulento	[Pa]
μ	Viscosidade dinâmica	[kg/m.s ²]

Números adimensionais

Co	Número de Courant ($u_G \Delta t / \Delta x$)
Re	Número de Reynolds ($\rho D v / \mu$)

Siglas

IQAr	Índice de Qualidade do Ar
MP	Material Particulado com diâmetro em escala micrométrica
MMA	Ministério do Meio Ambiente
VOF	<i>Volume of Fluid</i>
DPM	<i>Discrete Phase Model</i>
DDM	<i>Dense Discrete Model</i>
DNS	<i>Direct-Numerical Simulation</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
OQ	<i>Orthogonal Quality</i>
GCI	<i>Grid Convergence Index</i>
RNG	<i>Re-Normalization Group</i>
SST	<i>Shear-Stress Transport</i>

Subíndices

G	Gás
l	Líquido
th	Garganta
ini	Valor inicial para faixa do nível de qualidade do ar (índice e concentração)
fin	Valor final para faixa do nível de qualidade do ar (índice e concentração)
i	Índice do componente
j	Jato de líquido

1 INTRODUÇÃO

Devido às demandas de produção, as atividades humanas têm emitido cada vez mais poluentes em meios como os aéreos e aquáticos, prejudicando a saúde e o sustento das comunidades locais. Com isso, torna-se indispensável a utilização de dispositivos que reduzam a concentração dos resíduos nos efluentes.

Considerando neste estudo apenas a questão da poluição atmosférica, as indústrias têm empregado diversas ferramentas e buscado otimizar a operação de seus lavadores de gases, dentre os quais o lavador Venturi. Esse equipamento tem sido muito utilizado por conta da sua eficiência superior a 80% para a remoção de partículas com diâmetro entre 0,5 e 5 μm .

O lavador Venturi é caracterizado por três seções: convergência, garganta e divergência. Para o tipo *Pease-Anthony*, a entrada do coletor líquido ocorre através de jatos inseridos por meio de orifícios situados na área da garganta. Pelo fato de a velocidade do gás ser muito superior à do líquido, ocorre troca de quantidade de movimento entre as fases, o gás perde energia mecânica, e essa perda leva à redução de pressão do sistema. Com isso, outras variáveis, além da queda de pressão, que influenciam o desempenho e o custo do equipamento são a razão líquido/gás (L/G), a altura relativa à fração de penetração do jato líquido e a disposição dos orifícios de injeção na parede do lavador, adicionando-se também a influência da entrada do líquido e as respectivas dinâmica e distribuição de gotas no interior do Venturi.

Dessa forma, muitos pesquisadores têm investido esforços para otimizar a operação, e a fluidodinâmica computacional é uma ferramenta amplamente utilizada para esse fim, por permitir a simulação de diversas condições sem a necessidade da construção do protótipo, lançando mão dos modelos multifásicos – tanto por abordagem Euler-Euler quando pela abordagem Euler-Lagrange. Assim, para este trabalho, foi simulado um lavador Venturi de seção circular com velocidade do gás constante, variando a quantidade de orifícios e a velocidade de entrada de água neles. Devido à limitação do número de elementos para a licença educacional e à falta de estudos em laboratório das variáveis nas mesmas condições das simulações, a qualidade da malha foi verificada pela análise da velocidade da mistura na garganta e pela nitidez dos contornos de pressão, de velocidade e de fração volumétrica. Também foram realizados dois comparativos considerando um cenário específico: o primeiro, entre dois modelos de turbulência, e o segundo, entre malhas com diferentes graus de refinamento, para o qual também foram considerados os critérios de qualidade de assimetria e de ortogonalidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Considerando a crescente demanda da produção industrial, é indispensável que a qualidade do ar seja constantemente monitorada. Para reduzir a presença de poluentes atmosféricos, são utilizados lavadores de gases e, dentre eles, o lavador Venturi. Esse equipamento tem grande relevância industrial devido à sua elevada eficiência, tendo surgido diversos estudos voltados à análise de seu desempenho de acordo com as variáveis operacionais. Assim, de modo a otimizar ainda mais seu funcionamento, têm sido desenvolvidos diversos modelos matemáticos para prever os comportamentos de variáveis. Ultimamente, são empregadas ferramentas computacionais para identificar os fenômenos presentes e os perfis das variáveis, além de focar na otimização da eficiência do lavador ao simular diversos cenários, sem a necessidade de testes em escala piloto.

2.1 CONTROLE DE QUALIDADE DO AR

Os lavadores são equipamentos utilizados industrialmente com o objetivo de reduzir a concentração dos poluentes transportados pelo gás produzido até valores aceitáveis, para que o sistema respiratório da população seja o menos prejudicado possível. Visando a estabelecer um parâmetro para facilitar o entendimento da população geral quanto à situação do ar na área, a resolução CONAMA nº 491/18 criou o índice de qualidade do ar (IQAr), que considera como poluentes os materiais particulados de diâmetros 10 e 2,5 micrômetros (MP₁₀ e MP_{2,5} respectivamente), assim como ozônio, o monóxido de carbono, o dióxido de nitrogênio e o dióxido de enxofre (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2019).

Ainda de acordo com o guia técnico de qualidade do ar lançado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2019), o IQAr é calculado pela Equação 2.1:

$$IQAr = I_{ini} + \left[\frac{(I_{fin} - I_{ini})}{(C_{fin} - C_{ini})} \right] \cdot (C - C_{ini}) \quad (2.1)$$

Nessa equação, I_{ini} e I_{fin} são os valores inicial e final, respectivamente, do índice correspondente à faixa relacionada à concentração dos poluentes presentes na amostra, como mostra o Quadro 2.1 apresentado pela Companhia Ambiental no Estado de São Paulo (CETESB, 2019).

Quadro 2.1. Faixas de valores de IQAr referentes aos níveis de classificação para as concentrações de poluentes atmosféricos.

Qualidade do ar	Índice	MP ₁₀ (µg/m ³) 24h	MP _{2,5} (µg/m ³) 24h	O ₃ (µg/m ³) 8h	CO (ppm) 8h	NO ₂ (µg/m ³) 1h	SO ₂ (µg/m ³) 24h
N1 – Boa	0 – 40	0 - 50	0 - 25	0 - 100	0 - 9	0 - 200	0 - 20
N2 – Moderada	41 – 80	>50 - 100	>25 - 50	>100 - 130	>9 - 11	>200 - 240	>20 - 40
N3 – Ruim	81 – 120	>100 - 150	>50 - 75	>130 - 160	>11 - 13	>240 - 320	>40 - 365
N4 - Muito Ruim	121 – 200	>150 - 250	>75 - 125	>160 - 200	>13 - 15	>320 - 1130	>365 - 800
N5 - Péssima	201 - 400	>250 - 600	>125 - 300	>200 - 800	>15 - 50	>1130 - 3750	>800 - 2620

Fonte: adaptado de CETESB (2019).

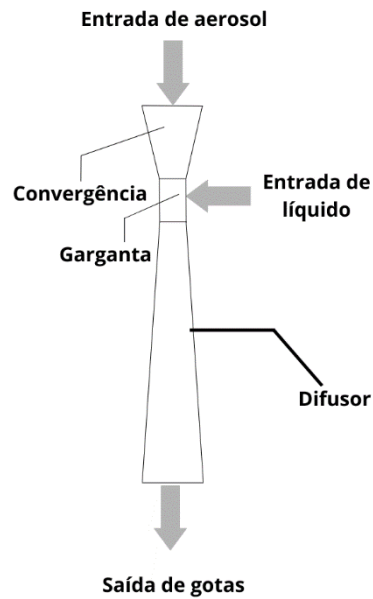
2.2 LAVADORES VENTURI

Com o objetivo de melhorar a qualidade do ar, a purificação deste pode ocorrer pela operação unitária de absorção (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004) ou, no caso de partículas sólidas, por meio de mecanismos físicos. No entanto, o foco do trabalho está na análise da fluidodinâmica no interior do lavador e, embora existam diversos equipamentos que realizem a lavagem de gás, o objeto de estudo será o lavador Venturi, devido à sua elevada eficiência.

2.2.1 Equipamento Venturi

O lavador Venturi é um equipamento caracterizado por 3 seções: convergente, garganta e divergente, identificados na Figura 2.1. A geometria utilizada como referência para este trabalho foi estudada por GUERRA, A. (2010), e é referida pela Figura 2.2, sendo que o lavador Venturi apresenta seção circular e injeção pelas laterais da garganta em forma de jatos.

Figura 2.1. Lavador Venturi Pease-Anthony.

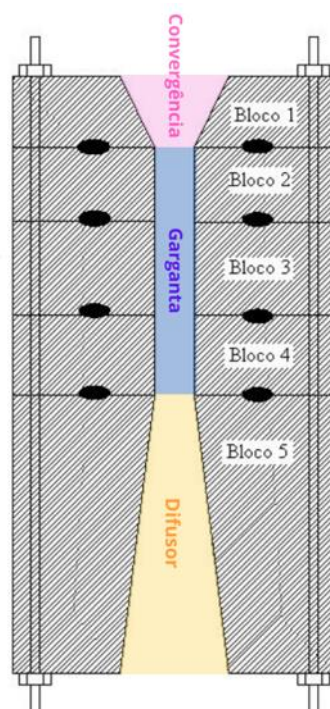


Fonte: adaptado de Gonçalves *et al.* (2003).

Quando o gás passa pela área de contração, a energia que anteriormente estava presente na forma de pressão é convertida em energia de velocidade, como pode ser observado pela equação de Bernoulli (Equação 2.2). Essa equação é utilizada como base teórica para uso do Venturi como medidor de vazão em regime permanente, com os pontos de medição destacados na Figura 2.3 – em compensação, a pressão é parcialmente recuperada na seção divergente no intervalo de 98,5% a 99% segundo FOX, PRITCHARD E MCDONALD (2010 *apud* CAETANO, 2014, p. 17), devido a perdas por atrito e outras fontes de dissipação de energia relacionadas principalmente a turbulência.

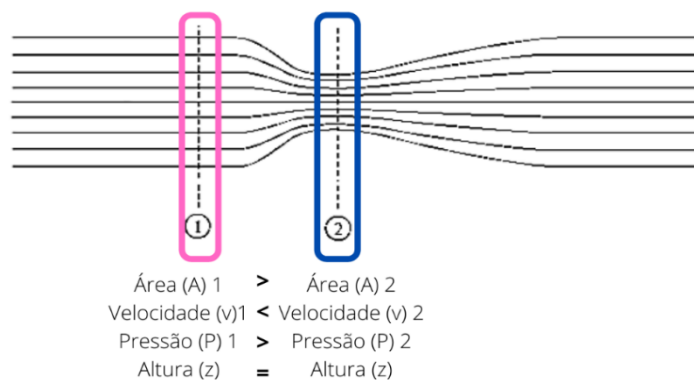
$$\left(\frac{p^*}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right)_1 = \left(\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right)_2 + f \quad (2.2)$$

Figura 2.2. Lavador Venturi vertical de seção circular.



Fonte: adaptado de GUERRA, A. (2010).

Figura 2.3. Tubo Venturi como medidor de vazão.

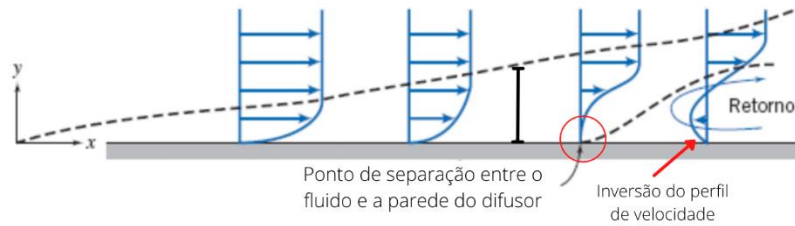


Fonte: adaptado de CAETANO (2014).

Além disso, de acordo com FOX e MCDONALD (1966 *apud* CAETANO, 2014, p. 13), o difusor carrega a particularidade da existência de “regiões de separação” na transição entre a garganta e a seção de divergência, nas quais o fluido é despreendido na parede no ponto em que o diferencial de velocidade tem valor nulo (“ponto de separação”) e, com isso, surgem regiões de vórtice, o que aumenta a turbulência, como apresentado na Figura 2.4. Ainda sobre essa seção, AZAD (1996, *apud* CAETANO, 2014, p. 14) destaca a presença de uma área com características específicas quanto à movimentação do fluido na entrada, outra na saída e mais duas

intermediárias.

Figura 2.4. Fluidodinâmica no difusor.



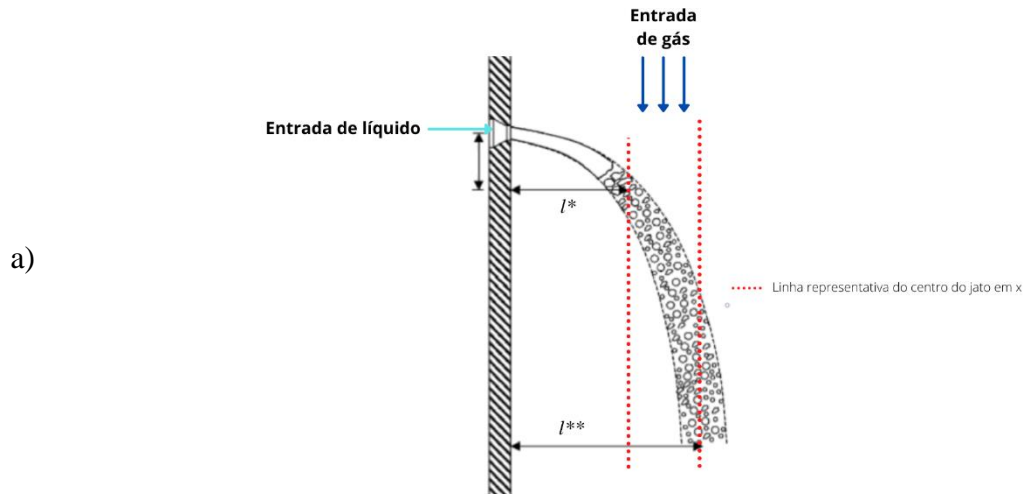
Fonte: adaptado de CAETANO (2014).

VISWANATHAN et al (1983, *apud* GONÇALVES *et al.*, 2003, p. 270) descrevem a trajetória de um jato em um lavador Venturi pela Figura 2.5 e pelas Equações 2.3 e 2.4.

$$\frac{l^*}{d_0} = 0,075 \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_G} \cdot \frac{V_j}{V_G} \right) \quad (2.3)$$

$$\frac{l^{**}}{d_0} = 0,1145 \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_G} \cdot \frac{V_j}{V_{G,th}} \right) \quad (2.4)$$

Figura 2.5. Trajetória do líquido no jato: a) Figura esquemática; b) Entrada de um jato; c) Trajetória dos jatos para o cenário de multiorifícios.



b)



c)



Fonte: a) adaptado de VISWANATHAN *et al.* (1983, apud GONÇALVES *et al.*, 2003, p. 270); b) GUERRA, V., 2009; c) DAHER, 2008.

ANANTHANARAYANAN e VISWANATHAN (1999) lançam mão do número de Venturi, que se trata de um adimensional que caracteriza a distribuição de líquido dentro do equipamento e pode ser obtido a partir da manipulação da Equação 2.3. Para a mistura de ar-água, o resultado é calculado pela Equação 2.5. Para outras misturas, a Equação 2.5 recebe adaptação e o adimensional passa a ter a expressão da Equação 2.6.

$$V_N = \left(\frac{L}{G^*}\right) \cdot \left(\frac{R_0}{d_0}\right) \cdot \left(\frac{Z}{n_j}\right) \quad (2.5)$$

$$V_N = \left(\frac{L}{G^*}\right) \cdot \left(\frac{R_0}{d_0}\right) \cdot \left(\frac{Z}{n_j}\right) \cdot \left[\frac{\left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)_{sistema}}{\left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)_{ar-água}} \right] \quad (2.6)$$

Por fim, GUERRA, V. (2009) E WANG, PEREIRA e HUNG (2004) relacionam algumas das vantagens e desvantagens do Venturi em comparação a outros lavadores, assim como CAETANO (2014) aborda a vantagem relacionada à geometria do equipamento, as quais estão apresentadas no Quadro 2.2.

Quadro 2.2. Vantagens e desvantagens do lavador Venturi.

Vantagens	Desvantagens
Pouco espaço necessário na planta	Perda de carga ainda elevada (demanda maiores custo e potência do soprador)
Excelente eficiência de coleta de sólidos na faixa respirável (0,5 a 5 µm)	Destino final do poluente coletado
Possível reuso do líquido após separação da partícula	Elevado custo inicial
Pode coletar poluentes nas fases sólida e gasosa	
Aplicável à coleta de poluentes perigosos e pegajosos	
Menor queda de pressão devido à redução gradual de área em comparação aos equipamentos com “vena contracta”.	

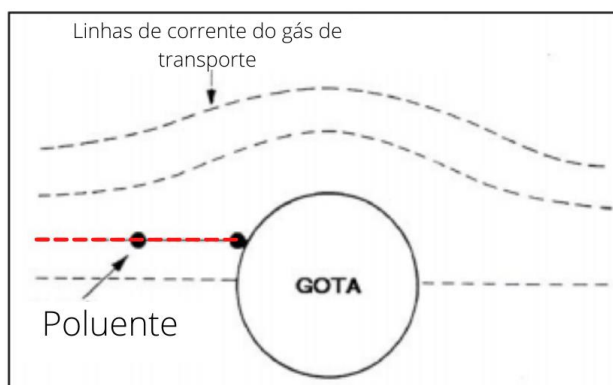
Fonte: adaptado de GUERRA, V. (2009) e CAETANO (2004).

2.2.2 Funcionamento

A coleta das partículas pode ocorrer pela remoção por 3 mecanismos: a colisão por inércia, difusão e a interceptação, sendo que o primeiro é o principal, visto que os outros são mais significativos considerando apenas suas presenças em cenários específicos (GUERRA, V., 2009).

Na colisão por inércia, as partículas presentes no gás não conseguem se desviar da gota de água, cuja velocidade, se comparada à do gás, é quase nula em seu caminho. Isso ocorre porque os valores de massa e de inércia do sólido são maiores que os do gás que o transporta e, por isso, chocam-se com essas gotas enquanto o gás tem sua trajetória alterada, como representado na Figura 2.6.

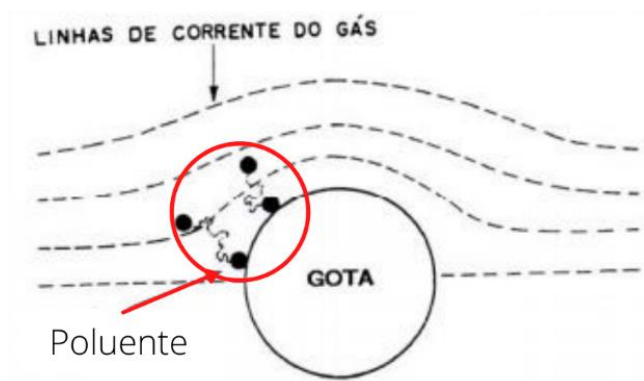
Figura 2.6. Colisão por inércia.



Fonte: adaptado de GUERRA, V. (2009)

O mecanismo de difusão ocorre principalmente em partículas com diâmetro inferior a 3 μm , pois seu movimento browniano colabora para que o sólido não siga a linha de corrente do ar, portanto ocorre a difusão saindo do gás para a superfície do corpo coletor, como o processo representado pela Figura 2.7.

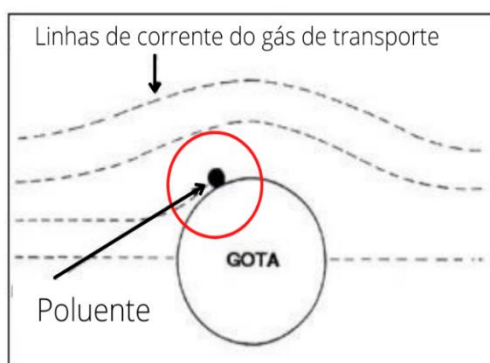
Figura 2.7. Mecanismo de coleta por difusão.



Fonte: adaptado de GUERRA, V. (2009)

A interceptação direta (Figura 2.8), por sua vez, ocorre quando a distância entre as superfícies da gota e da partícula é menor que o raio dessa partícula, considerando o formato aproximadamente esférico.

Figura 2.8. Coleta por interceptação direta.



Fonte: adaptado de GUERRA, V. (2009)

2.2.3 Principais variáveis operacionais

No lavador Venturi do tipo *Pease-Anthony*, a injeção de líquido ocorre por orifícios situados nas laterais do equipamento e à velocidade muito inferior à de entrada do gás. Com isso, devido ao choque entre as correntes dos fluidos, o jato de água é parcialmente atomizado de forma que as gotas formadas coletam os poluentes da corrente de gás. Dessa forma, a partir dessa troca de quantidade de movimento entre as fases fluidas, torna-se necessário o controle da queda de pressão para evitar que haja perda excessiva de carga e, conseqüentemente, não haja energia suficiente para um processo de atomização adequado para a fase líquida (GUERRA *et al.*, 2012); ainda considerando o que foi exposto anteriormente, é importante que a razão líquido-gás (isto

é, a razão entre a vazão volumétrica de líquido e a vazão volumétrica de gás, comumente expressa em L/m^3), seja controlada de modo a otimizar a quebra do jato em gotas.

Além da questão fluidodinâmica, GUERRA, V. (2009), em consonância com GONÇALVES *et al.* (2003) e WANG, PEREIRA e HUNG (2004), destaca como outras variáveis fundamentais para o bom funcionamento do lavador: o tamanho da partícula coletada, para o qual WANG, PEREIRA e HUNG (2004) sustentam a medida de 0,5 a 5 μm como sendo a faixa de diâmetro para a melhor eficiência do Venturi; comprimento da garganta, devido à perda de carga por atrito se tornar mais significativa com o aumento da medida; e a configuração geométrica do lavador e fração de líquido presente na parede em forma de filme.

Quanto às características do escoamento, GONÇALVES *et al.* (2002) e GUERRA, V. (2009) destacam, para o jato de líquido:

- Velocidade;
- Diâmetro do orifício;
- Trajetória;
- Penetração na corrente de gás;
- Mecanismos de atomização, sendo o principal o que considera a formação de onda (cuja amplitude vai aumentando ao longo do tempo) com curto comprimento e alta frequência pelo choque com o gás e a posterior formação de filamentos e, por fim, de gotículas que ainda podem ser atomizadas (GONÇALVES *et al.*, 2003)

Para as gotas, de acordo com os autores, sobressaem os seguintes aspectos:

- Tamanho;
- Quantidade;
- Velocidade relativa;
- Distribuição espacial.

WANG, PEREIRA e HUNG (2004) acrescentam a essa lista a temperatura da corrente de gás e a vazão deste na condição de saturação, e GUERRA, A. (2010) pontua a necessidade de controle da velocidade do gás (variável relacionada à razão líquido-gás), a configuração dos orifícios de injeção, o diâmetro da garganta e a distância a partir do ponto de injeção (valor relacionado ao comprimento da garganta).

2.3 MODELAGEM DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Os escoamentos multifásicos podem ser simulados a partir de duas aproximações: Euler-Euler ou Euler-Lagrange. Na primeira, todos os componentes são modelados como meios contínuos, enquanto a segunda considera uma das fases como partícula e calcula as forças atuantes sobre ela, além de a Lei de Newton de movimento ser aplicada para obter as velocidades das partículas (DURST; MILOJEVIC; SCHOENUNG, 1984).

A abordagem Euler-Euler no *ANSYS Fluent* 2021 R1 é representada pela opção *Multiphase Model*, a qual pode ser calculada de acordo com os seguintes modelos:

- *Volume of Fluid (VOF)*;
- *Mixture*;
- *Wet Steam*;
- *Eulerian*.

Apesar de todos tratarem a fase secundária como fluidos, no VOF, por exemplo, a equação para cada fenômeno de transporte é a mesma para todas as fases (Equações 2.7 a 2.10), com a resolução da Equação 2.11 nas interfaces.

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = -\nabla P + \rho g + \nabla(\tau_i + \tau_i^t) \quad (2.8)$$

$$\rho = \sum \rho_i \cdot \alpha_i \quad (2.9)$$

$$\mu = \sum \mu_i \cdot \alpha_i \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \cdot (\alpha_i) = 0 \quad (2.11)$$

Por outro lado, as equações do modelo Euleriano (Equações 2.12 a 2.14) lançam mão de uma equação para cada fase para cada fenômeno de transporte (GUERRERO; MUÑOZ; RATKOVICH, 2017). No *ANSYS Fluent Student* 2021 R1, essa abordagem ainda pode ser especificada para os casos: *Dense Discrete Model* (DDM), *Boiling Model* e *Multi-Fluid VOF Model*. Quanto à quantidade de fases secundárias, o número é limitado no *software* apenas pela memória disponível e pelo comportamento da convergência (ANSYS INC., 2021).

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \bar{u}_i) = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \bar{u}_i \bar{u}_i) = -\alpha_i \nabla P + \alpha_i \rho_i g + \nabla[\alpha_i(\tau_i + \tau_i^t)] + M_i \quad (2.13)$$

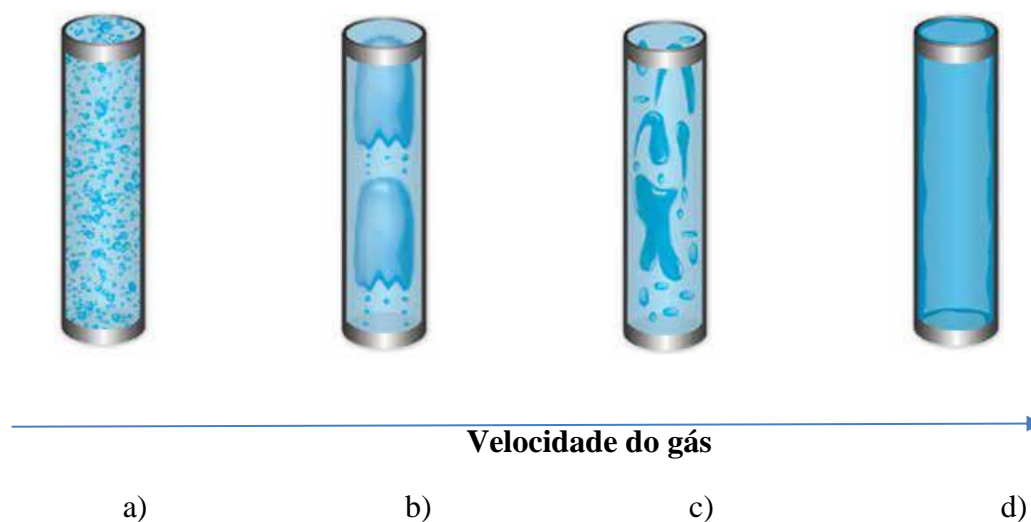
$$\sum M_i = 0 \quad (2.14)$$

Para a aproximação Euler-Euler, DURST; MILOJEVIC; SCHOENUNG (1983) destacam que, por não apresentarem as partículas individualmente, o tempo e o custo computacional exigidos são menores do que os da aproximação Euler-Lagrange, sendo que a escolha de esquemas de discretização de ordens maiores aumentariam a precisão do método.

A partir disso, a segunda abordagem mencionada (Euler-Lagrange), como já foi destacado, modela a fase dispersa como discreta e seu uso é recomendado pelo Guia do Usuário do *software* nos casos em que a fração volumétrica da fase secundária for menor que ou igual a 10% (ANSYS INC., 2021), podendo ocorrer pela configuração do *Discrete Phase Model* (DPM). As vantagens desse modelo ressaltadas por DURST; MILOJEVIC; SCHOENUNG (1983), são os dados da trajetória e do tempo de residência das partículas serem mais detalhados, além de proporcionar “melhor predição para fluidos escoando com elevado gradiente de velocidade da partícula e menor vulnerabilidade aos erros de discretização das partículas.”(DURST; MILOJEVIC; SCHOENUNG, 1983, p. 114, tradução da autora).

Existem pelo menos dois estudos comparativos sobre as diferenças entre as abordagens: GUERRERO, MUÑOZ e RATKOVICH (2017) compararam os modelos Euleriano e VOF, e concluíram que a precisão do modelo Euleriano é 5% maior do que a do VOF para escoamentos aerados (“*Bubbly Flow*”), mas ambos tiveram os desempenhos reduzidos no escoamento anular; além disso, os autores destacaram a independência do modelo Euleriano em relação à malha e a maior acurácia do VOF na diferenciação visual das duas fases envolvidas devido à solução na interface consistir na equação da continuidade em função da quantidade de vazios (GUERRERO; MUÑOZ; RATKOVICH, 2017). A Figura 2.9 apresenta os tipos de escoamento gás-líquido em tubos verticais de diâmetros de até 50 mm.

Figura 2.9. Tipos de escoamentos líquido-gás para diâmetros de até 50 mm: a) Escoamento aerado ("Bubbly flow"); b) Fluxo em golfadas ("Slug flow"); c) Fluxo agitante ("Churn flow"); d) Fluxo anular ("Annular flow").

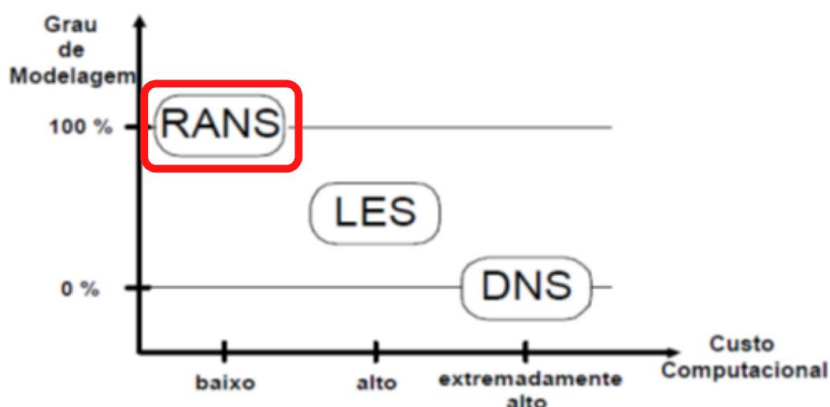


Fonte: adaptado de Bratland (2010 *apud* GUERRERO; MUÑOZ; RATKOVICH 2017, p. 76).

DURST; MILOJEVIC e SCHOENUNG (1983), por sua vez, compararam as abordagens Euler-Euler e Euler-Lagrange, e apontaram que, para a solução final, apesar das especificidades, vantagens e desvantagens de cada método, os resultados alcançados foram próximos entre si, diferindo mais significativamente no tratamento dispensado às fases dispersas.

Por fim, de acordo com YUSOF *et al.* (2020), a ferramenta CFD possui três abordagens pelas quais os resultados são obtidos: *Direct-Numerical Simulation*, (DNS), *Large Eddy Simulation* (LES) e *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS). Na primeira, os resultados são obtidos pela resolução direta da equação de Navier-Stokes em três dimensões para todos os vórtices; a LES resolve as equações para os vórtices de maior turbulência, exigindo alto grau de refinamento da malha, sendo mais viável para número de Reynolds na faixa de 10^4 a 10^5 ; e, finalmente, no modelo Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), todos os vórtices são calculados como sendo todos da mesma intensidade, de forma a exigir menor custo computacional, como pode ser verificado na Figura 2.10. Para obter as equações da abordagem RANS para modelar a turbulência através da energia cinética de turbulência (k), duas das equações mais utilizadas são o grupo k - ϵ (dissipação de energia cinética turbulenta) e k - ω (taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta), embora esse último forneça maior acurácia nos resultados.

Figura 2.10. Equações governantes e seus respectivos graus de modelagem e custo computacional.



Fonte: adaptado de SAMPAIO (2008 *apud* CAETANO, 2014, p. 27).

2.4 COMPILAÇÃO DE ESTUDOS

Devido a sua elevada eficiência na coleta de partículas na faixa respirável, esse tipo de equipamento tem sido tema de estudo em diversas universidades, com documentos sobre o estudo de Giovanni Batista Venturi sobre o equipamento com datação do final do século 18 (KENT, 1912 *apud* CAETANO, 2014, p. 10).

Desde então, pesquisadores estudam o seu desempenho pela análise de variáveis significativas, como a queda de pressão (AHMED *et al.*, 2018; HAMED; ABDEL-HAMIED, 2001; MOHEBBI *et al.*, 2002), fluxo de gás e de líquido e as diferentes configurações envolvidas (GUERRA, V., 2009; JITSCHIN; RONZHEIMER; KHODABAKHSHI, 1999; VISWANATHAN; GNYP; PIERRE, 1984) e a formação de filme nas paredes do equipamento (AZZOPARDI, 1993; DAHER, 2008; GUERRA, A., 2010), tal qual outros autores citados por GUERRA, V. (2009), pelo estudo do tamanho das gotas considerando, principalmente, as formas de injeção e os métodos utilizados. Outros temas observados pelos autores foram o efeito do arranjo em forma de bocal (ANANTHANARAYANAN; VISWANATHAN, 1999), o processo de atomização (GONÇALVES *et al.*, 2003, 2004; HUANG *et al.*, 2021) e a eficiência a partir de uma proposta mais abrangente (MARTINS COSTA *et al.*, 2005; MEILI *et al.*, 2006; RIBEIRO, 2014).

Conforme a tecnologia foi avançando e possibilitando a melhoria da precisão das simulações, foram iniciados diversos estudos com foco na predição do efeito de variáveis através de modelos matemáticos (ADAZE *et al.*, 2019; BAL; MEIKAP, 2017; CROWDER; NOLL;

DAVIS, 1982; DENNER; VAN WACHEM, 2014; GONÇALVES *et al.*, 2001; HAMED; ABDEL-HAMIED, 2001; MOHEBBI *et al.*, 2002; SAFDAR *et al.*, 2018; SHI *et al.*, 2019; WU *et al.*, 2020; YUNG *et al.*, 1978).

Esse contexto de modernização acadêmica possibilitou o desenvolvimento da ferramenta da fluidodinâmica computacional (CFD, do inglês “*computational fluid dynamics*”) e, com isso, tornou-se possível realizar testes sem necessidade da construção do protótipo em laboratório, reduzindo tempo e custo, assim como estudar cenários de maneira mais precisa (AHMADVAND; TALAIE, 2010; AHMED *et al.*, 2018; ALI *et al.*, 2012; BAL; MEIKAP, 2017; CAETANO, 2014; CAMARINHA, 2021; DASTANE *et al.*, 2019; GUERRA *et al.*, 2012; PÁDUA, 2012; SAFDAR *et al.*, 2018; SHI *et al.*, 2019). Outro exemplo do impacto da tecnologia foi o estudo de PUENTES *et al.* (2012) sobre o ângulo formado pelo jato de líquido na entrada com o auxílio do *software* AutoCAD 2006, de modo a diminuir o custo computacional e utilizar o ângulo de dispersão do jato como um parâmetro no caso da abordagem lagrangiana das injeções de líquido. Ainda sobre o CFD, é possível encontrar estudos tanto utilizando a abordagem Euler-Euler (CAETANO, 2014; CAMARINHA, 2021; MARINI; GUERRA; BÉTTEGA, 2019; PUENTES *et al.*, 2012), quanto Euler-Lagrange (AHMED *et al.*, 2018; ALI *et al.*, 2013; PAK; CHANG, 2006; SAFDAR *et al.*, 2018) – embora MARINI, GUERRA e BÉTTEGA, (2019) também tenham lançado mão do Modelo de Balanço Computacional – e divergências também no *software* utilizado, como o *Ansys Fluent* (ANANTHANARAYANAN; VISWANATHAN, 1999; BAL; MEIKAP, 2017; GUERRA *et al.*, 2012; MARINI; GUERRA; BÉTTEGA, 2019; PÁDUA, 2012) e o *Ansys CFX* (AHMED *et al.*, 2018; ALI *et al.*, 2013; SAFDAR *et al.*, 2018). Com essa vasta e crescente quantidade de dados, espera-se atingir condições operacionais cada vez melhores na performance do lavador Venturi, ao reduzir perda de carga e avaliar o efeito das velocidades de água e quantidade de orifícios por meio do CFD, além de analisar a influência da malha sobre os resultados da simulação.

3 METODOLOGIA

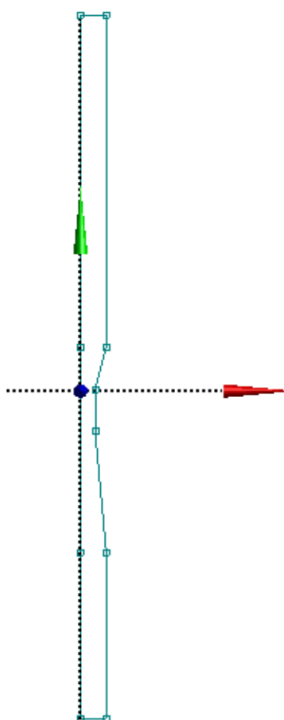
Nesta seção, serão descritas a elaboração das geometrias e as medidas do lavador simulado, as características das malhas geradas e as configurações do Setup do *ANSYS Fluent* e do pós-processamento.

3.1 GEOMETRIA

As simulações foram realizadas utilizando os *softwares DesignModeler, SpaceClaim, Ansys Meshing, Ansys Fluent e CFD-Post* incorporados no pacote *Ansys Student 2021 R1*.

O lavador Venturi estudado (Quadro 3.1) tinha seção circular e, no *DesignModeler*, a geometria foi esquematizada, inicialmente, como um contorno (Figura 3.1), considerando os valores do comprimento em sua totalidade e os valores dos raios da entrada, da saída e da garganta. Depois de pronta, foi aplicada a ferramenta *Revolve* ao redor do eixo Y na direção negativa.

Figura 3.1. Contorno do lavador Venturi antes da revolução.



Fonte: acervo pessoal.

É importante ressaltar que a geometria contém alongamentos antes da seção convergente e após a seção divergente para reduzir a turbulência na área da garganta, a qual tem pouca altura, logo, estaria mais suscetível à influência das condições de contorno. O tamanho do alongamento foi estimado a partir da geometria de CAMARINHA (2018), considerando a razão entre cada alongamento e a altura do Venturi típico, representado pelo conjunto das seções convergente, divergente e garganta.

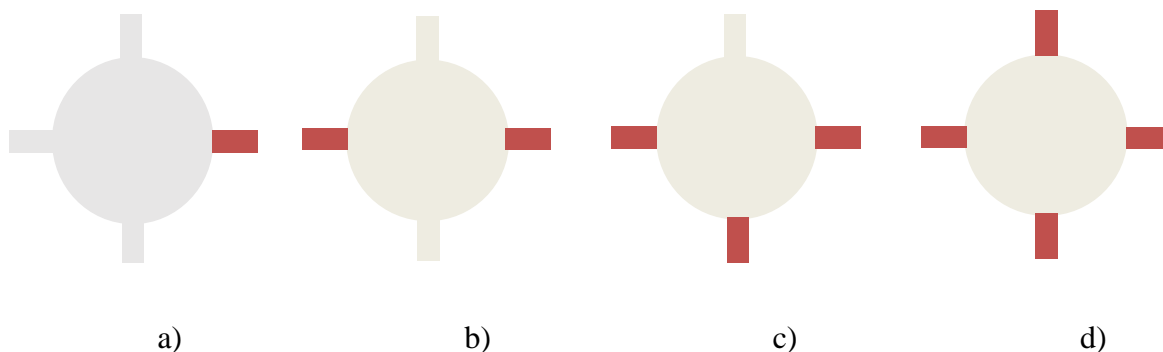
Quadro 3.1. Dimensões do lavador Venturi.

	Valor (mm)
Diâmetro de entrada e de saída	35
Altura alongamento pré-convergência	236
Altura da seção convergente	30
Diâmetro da garganta	20
Distância do início da garganta até o orifício	1
Diâmetro do orifício	1
Comprimento do orifício	3
Altura da garganta	29,5
Comprimento da seção divergente	86
Altura alongamento pós-divergência	118

Fonte: adaptado de GUERRA, A. (2010).

Depois da revolução, foram criados novos planos em relação aos planos XY e YZ, de modo a desenhar a circunferência dos orifícios de acordo com as configurações de entrada (Figura 3.2) e realizar a extrusão dessas bordas e formar os orifícios com 3 mm de comprimento (10 mm a partir do eixo de rotação + 3 mm de comprimento), como apresentado na Figura 3.3. Para facilitar a coleta de dados no pós-processamento, o volume foi transladado para que o domínio estivesse inteiramente contido abaixo do eixo X e a entrada de gás estivesse situada sobre o eixo horizontal, de modo que os parâmetros fossem analisados sempre em relação à distância da entrada do equipamento.

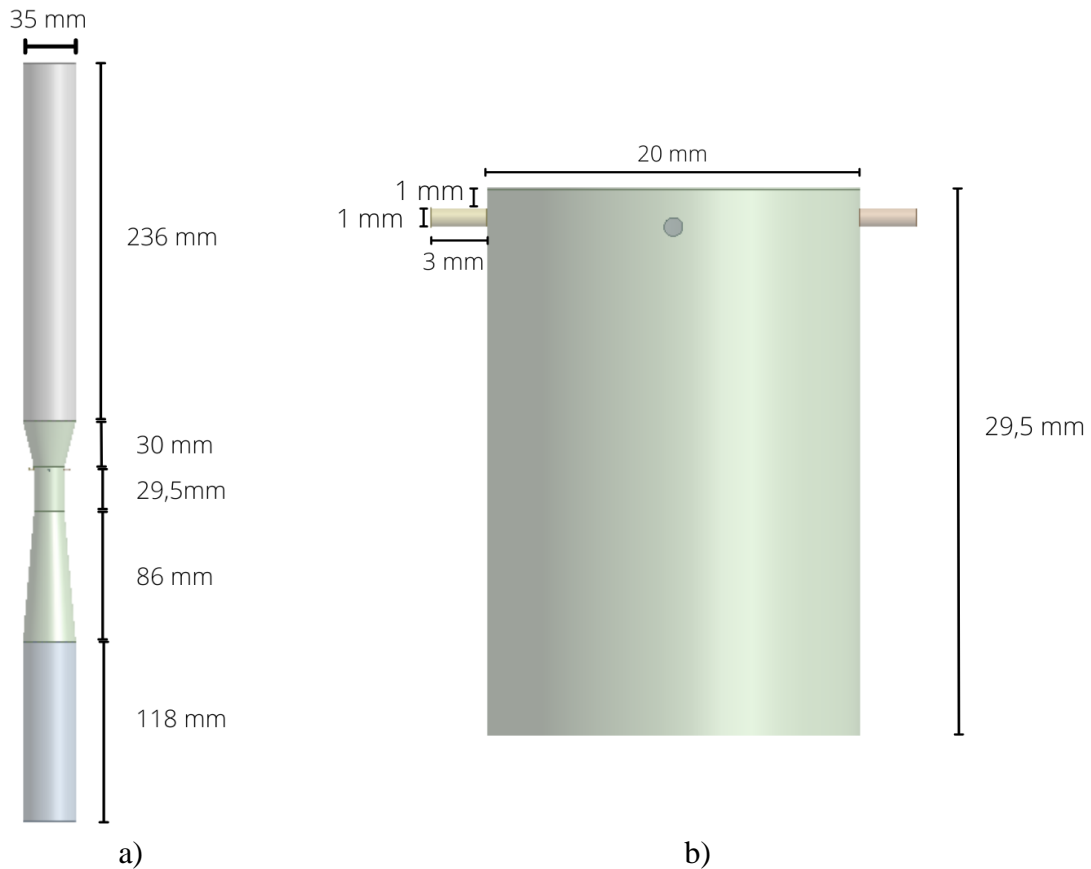
Figura 3.2. Configurações das injeções de água no lavador Venturi: a) 1 orifício; b) 2 orifícios; c) 3 orifícios; d) 4 orifícios.



Fonte: acervo pessoal.

Para obter a geometria da malha refinada, a principal diferença foi que a geometria única foi gerada com os quatro orifícios (nos casos em que houve menos que 4 injeções de água, as outras entradas receberam condição de contorno tipo “*wall*”). O arquivo foi importado para o *software SpaceClaim* para realizar a separação dos orifícios em relação ao volume do Venturi, e para que eles pudessem ter seu volume preenchido pelo uso da função *Up To da* ferramenta *Pull*, com o fim de criar corpos passíveis de receber varredura no *ANSYS Meshing* e, com isso, receber o método *MultiZone* para gerar a malha. Nesse caso, houve desconfiguração das regiões nomeadas, então o arquivo foi importado novamente para o *DesignModeler*, de modo a corrigir as seleções nomeadas.

Figura 3.13. Medidas do Venturi (3D): a) Cotas do diâmetro de entrada e saída e comprimentos dos alongamentos, convergente, garganta e difusor; b) Destaque da garganta e dos orifícios.



Fonte: acervo pessoal.

Nas simulações, considerou-se que a velocidade do ar na garganta atingiria 50 m/s e os cenários analisados foram aqueles em que houve apenas escoamento de ar e os casos onde foram inseridos jatos de água com velocidades de 4,5, 6,5 e 8,5 m/s, que se referem aos valores de fração de penetração de jato iguais a 0,45, 0,65 e 0,85 para a velocidade de ar considerada na garganta, como detalhado na Tabela 3.1. Durante as simulações, foram fixados os valores da velocidade de ar na entrada do domínio fluido como 16,3 m/s, e o diâmetro dos orifícios em 1 mm, com comprimento de 3 mm. Todos os parâmetros apresentados foram obtidos a partir do trabalho de GUERRA, A. (2010).

Tabela 3.1. Cenários de simulação.

	Cenário	Velocidade de entrada da água em cada orifício (m/s)
Malha Grosseira	1 orifício	Somente ar
	2 orifícios	4,5
	3 orifícios	6,5
	4 orifícios	8,5
Malha Refinada	1 orifício	Somente ar
	2 orifícios	4,5
	3 orifícios	6,5
	4 orifícios	8,5

Fonte: acervo pessoal.

3.2 MALHA

A fim de comparar os resultados obtidos, foram montados dois grupos de malha: no primeiro – chamado aqui de “grosseira” -, foi gerada uma malha para cada geometria de configuração específica de orifícios, resultando em 4 malhas diferentes e, no outro, foi gerada uma malha com maior grau de refinamento para a geometria com os 4 orifícios usada para todos os cenários. Os detalhes de cada uma estão descritos a seguir.

3.2.1 Malha grosseira

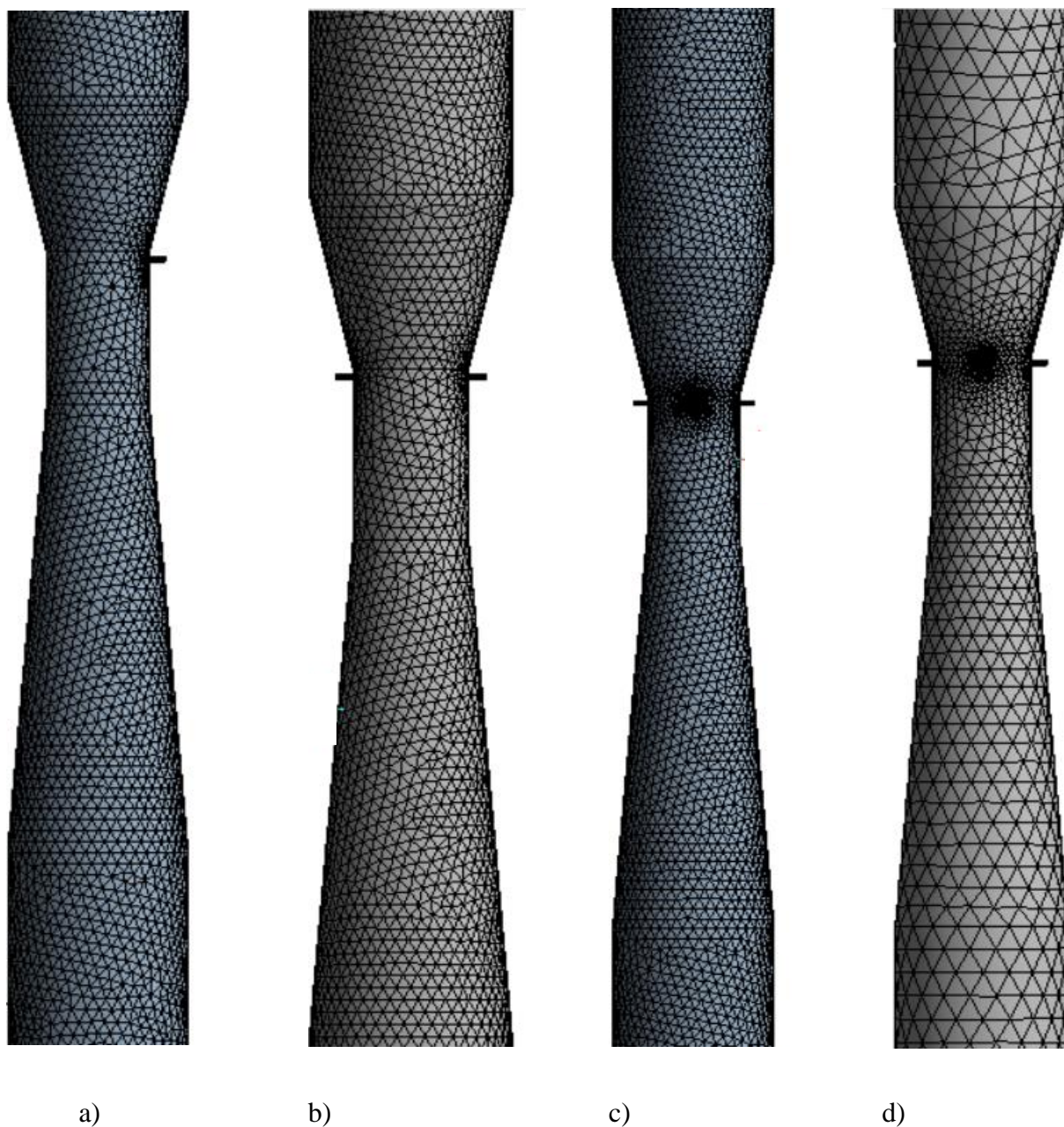
As malhas grosseiras foram obtidas no *ANSYS Meshing* a partir do caso em que foram geradas diferentes geometrias para diferentes configurações dos orifícios (Quadro 3.2). Na primeira malha, foi aplicado diretamente o método dos tetraedros (*Tetrahedron Patch Conforming Method*). Para as outras três malhas, como não foi especificado qualquer método, o *software* aplicou o padrão (*default*), que é representado na abordagem em três dimensões pelo mesmo método dos tetraedros (ANSYS INC., 2015).

Quadro 3.2. Propriedades das malhas grosseiras para cada geometria.

	1 orifício	2 orifícios	3 orifícios	4 orifícios
Quantidade de corpos	1	1	1	1
Número de nós	88037	34747	37501	11511
Número de Elementos	233206	170741	184518	54558
Target Skewness	0,9	0,9	0,9	0,9
Smoothing	Medium	Medium	Medium	Medium
Método	<i>Tetrahedron (Patch Conforming Method)</i>	<i>Tetrahedron (Patch Conforming Method)</i>	<i>Tetrahedron (Patch Conforming Method)</i>	<i>Tetrahedron (Patch Conforming Method)</i>

Fonte: acervo pessoal.

Figura 3.24. Malhas grosseiras geradas para cada geometria: a) 1 orifício; b) 2 orifícios; c) 3 orifícios; d) 4 orifícios.



Fonte: acervo pessoal.

3.2.2 Malha refinada

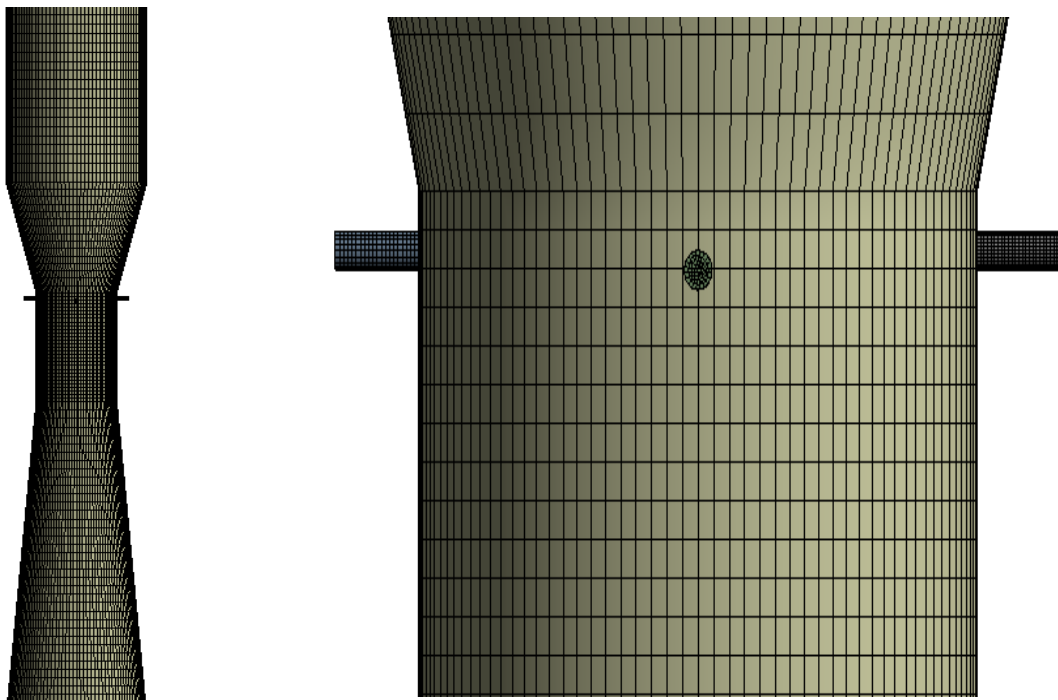
Como ressaltado anteriormente, a malha refinada (Figura 3.5) foi aplicada sobre uma geometria com as seções dos orifícios separadas, para que pudesse ser aplicado o método *MultiZone*, tendo sido utilizada uma única malha para todos os cenários simulados no ANSYS *Fluent* (Quadro 3.3).

Quadro 3.3. Propriedades da malha refinada.

	Valor
Quantidade de corpos	5
Número de nós	270570
Número de Elementos	255046
<i>Target Skewness</i>	0,7
<i>Smoothing</i>	High
OQ mínima	0,79317
OQ máxima	0,99997
OQ média	0,98824
Método	<i>MultiZone</i>

Fonte: acervo pessoal.

Figura 3.35. Malha refinada: a) Porção da malha para melhor visualização; b) Malha na área da garganta.



a)

b)

Fonte: acervo pessoal.

Para verificar a qualidade da malha, normalmente é utilizado o método *Grid Convergence Index (GCI)*, introduzido por Roache (1998, *apud* MANSOUR; LAURIEN, 2018), no qual é considerado o espaçamento de cada malha, a razão de refinamento de malha, ordem de acurácia, o valor aproximado para a solução exata, os erros relativos em comparação à solução exata e os erros relativos entre as malhas e o fator de segurança para o caso de análise de mais de duas malhas. No entanto, esse método geralmente é utilizado para a análise entre 3 ou mais malhas com diferentes refinamentos e, por conta da limitação de tempo e porque o pacote acadêmico limita a quantidade de elementos para o máximo de 256.000, este estudo utilizou-se de apenas duas malhas. Desse modo, as malhas 1 a 4 são todas consideradas como grosseiras, sendo utilizadas para geometrias distintas, com o volume de malha e quantidade de elementos apresentados no Quadro 3.4. Assim, o critério para qualidade da malha para esse estudo foi baseado na presença mínima de perturbações para o gráfico de pressão e a nitidez dos contornos – embora a verificação mais adequada fosse a comparação entre os dados fornecidos numericamente e os valores obtidos empiricamente, podendo, dessa forma, atestar qual cenário esteve mais próximo dos dados experimentais.

Quadro 3.4. Volume de malha e número de elementos para cada malha.

	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5 (Refinada)
Volume de malha	$4,2047 \times 10^5$	$4,2047 \times 10^5$	$4,2047 \times 10^5$	$4,2047 \times 10^5$	$4,2047 \times 10^5$
Número de elementos	233206	170741	184518	54558	255046

Fonte: acervo pessoal.

3.3 SETUP E SOLVER ANSYS FLUENT

Para a configuração dos cenários com injeção de água, o modelo multifásico escolhido foi o VOF, devido à maior precisão na distinção entre os contornos das fases e ao menor tempo necessário para as simulações, considerando que a diferença de acurácia entre os métodos na solução final é pequena (GUERRERO; MUÑOZ; RATKOVICH, 2017). O valor da tensão superficial entre a água e o ar foi considerado como sendo de 0,072 N/m, o qual corresponde ao valor da propriedade a 25 °C (VARGAFTIK; VOLKOV; VOLJAK, 1983). O sistema foi

considerado isotérmico e o regime permanente pseudotransiente foi ativado por padrão ao escolher o acoplamento Pressão-Velocidade do tipo *Coupled*, para que a solução ocorresse de forma implícita. Quanto à solução na condição de pseudotransiente, o Guia do Usuário do *ANSYS Fluent* recomenda, para o método de intervalo de tempo Automático, que o fator de intervalo de tempo (*Time Scale Factor*) seja em torno de 0,3 s para que haja maior estabilidade (Quadro 3.5). O modelo RNG k- ϵ foi escolhido por já ter sido utilizado em outros trabalhos (CAETANO, 2014; CAMARINHA, 2018) e por ter apresentado maior rapidez na malha mais grosseira em comparação à simulação com SST k- ω .

Quadro 3.5. Configurações quanto ao regime, modelos e intervalo de tempo.

Configuração	Valor
Regime de escoamento	Permanente (pseudo-transiente)
Modelo Multifásico	VOF
Tensão de superfície (25 °C)	0,072 N/m
Modelo de Turbulência	RNG k- ϵ
Acoplamento Pressão-Velocidade	Coupled
Discretização Espacial – pressão	PRESTO!
Discretização Espacial – <i>Momentum</i>, Energia Cinética de Turbulência e Taxa de Dissipação de Turbulência	<i>First Order Upwind</i>
Discretização Espacial – Fração volumétrica	<i>Compressive</i>
Parâmetros de Fração Volumétrica	Implícito
Formulação das forças atuantes	<i>Implicit Body Force</i>
Modelagem da Interface	<i>Sharp/Dispersed</i>
Modelagem da Força de Tensão Superficial	<i>Continuum Surface Force</i>
<i>Wall Adhesion</i>	Ativado
Método de Intervalo de Tempo	Automático
Fator de Escala de tempo	0,3 s

Fonte: acervo pessoal.

Para que as equações parciais fossem resolvidas, foi necessário definir as condições de contorno (Quadro 3.6). Os valores de velocidade foram extraídos de GUERRA, A. (2010): para o ar, a velocidade de entrada e de pressão manométrica foram obtidas diretamente a partir das especificações da condição de entrada no equipamento; as velocidades de água, por sua vez, foram calculados por GUERRA, A. (2010) a partir da Equação de penetração máxima de água (Equação 2.4) – os diâmetros hidráulicos são decorrentes das próprias medidas do equipamento. A condição de cisalhamento da parede e a pressão manométrica de saída foram consideradas a partir das condições de contorno apresentadas por GUERRA *et al.* (2012).

Quadro 3.6. Condições de contorno.

Condição de contorno	Valor
Velocidade de entrada do ar	16,3
Pressão estática de entrada do ar	0,1 atm
Diâmetro hidráulico – Entrada de ar	0,035 m
Velocidade de entrada da água	4,5; 6,5 ou 8,5 m/s
Pressão estática de entrada da água	0 atm
Diâmetro hidráulico – Entrada de água	0,001 m
Condição de cisalhamento na parede	Não deslizamento (<i>No slip</i>)
Pressão estática de saída do equipamento	0 atm
Diâmetro hidráulico – Entrada de água	0,035 m

Fonte: acervo pessoal.

Os fatores de relaxação, por fim, apresentaram valores relativamente baixos, de modo a reduzir a instabilidade da resposta nas malhas mais grosseiras (Quadro 3.7) e, para sondar as fontes de alteração nos resultados, os valores foram mantidos para os outros cenários.

Quadro 3.7. Fatores de Relaxação Explícita no regime pseudotransiente.

Fator de Relaxação	Valor
Pressão	0,5
<i>Momentum</i>	0,5
Densidade	1
Forças de corpo	1
Fração volumétrica	0,5
Energia Cinética de Turbulência	0,5
Taxa de Dissipação de Turbulência	0,5
Viscosidade de Turbulência	0,5

Fonte: acervo pessoal.

3.4 PÓS-PROCESSAMENTO

A etapa de pós-processamento foi realizada visando a obter tanto os contornos de pressão, velocidade da mistura e fração volumétrica de água em um plano no centro do equipamento (plano XY), quanto os perfis das mesmas variáveis ao longo do lavador. Para tanto, foram criadas as seguintes entidades: uma linha vertical ao longo do Venturi, uma linha horizontal na altura do eixo dos orifícios, um plano central XY e um plano ZX também na altura do eixo dos cilindros de injeção, todas na posição $Z = 0$ (Quadro 3.8).

Quadro 3.8. Entidades usadas para o contorno e para os gráficos e suas medidas.

Entidades	X [m]	Y [m]	Z [m]
Linha vertical	0	0 a -0.4995	0
Plano Central (XY)	-	-	0

Fonte: acervo pessoal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos considerando as diferentes malhas, configurações de orifícios e velocidades de entrada de água, além da comparação entre dois modelos de turbulência e, na última seção, entre as duas malhas de forma mais direta, considerando, nesses dois últimos comparativos, o cenário de 4 orifícios com entrada de líquido a 8,5 m/s devido ao maior volume de entrada de líquido no equipamento. No entanto, de modo a explorar a discussão dos dados coletados, serão apresentados os contornos e perfis somente das configurações de 1 e 2 orifícios, enquanto os resultados de 3 e 4 orifícios para as malhas grosseira e refinada serão apresentados nos apêndices A e B, os quais estão divididos de acordo com o grupo de qualidade das malhas. Todas as curvas de pressão se referem ao perfil da pressão estática ao longo do eixo Y e, como a condição de contorno da pressão estática na saída foi fixada em zero, e a redução de pressão é calculada pela diferença entre o valor na saída e o valor na entrada do equipamento, os diferentes patamares dos valores iniciais se referem às variações de queda de pressão para cada cenário.

4.1 RESULTADOS POR MALHA

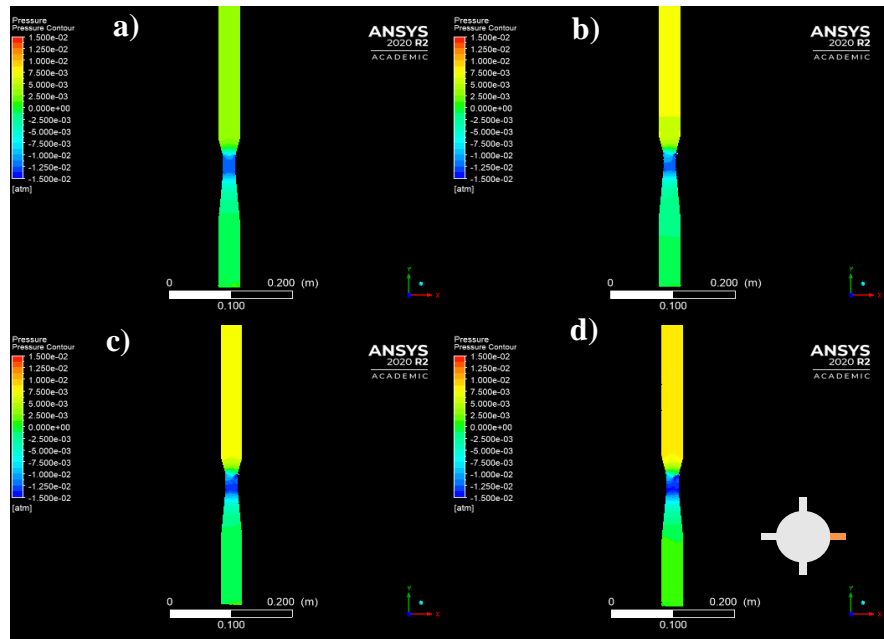
4.1.1 Malha grosseira

A malha grosseira, como já abordado anteriormente, foi feita para geometrias distintas e apresentou os valores para a perda de carga descritos na Tabela 4.1 para cada cenário, nos quais a maior redução ocorreu, como esperado, para a velocidade de entrada da água igual a 8,5 m/s.

4.1.1.1 Um orifício

Nos contornos de pressão apresentados na Figura 4.1, é possível identificar a diferença de pressão na entrada do equipamento e na saída, por causa da recuperação parcial da energia presente no início devido ao gradiente das cores, assim como é evidente a variação dessa grandeza no alongamento pré-convergência e a redução acentuada na garganta por meio do tom escuro de azul – associado a valores menores de pressão.

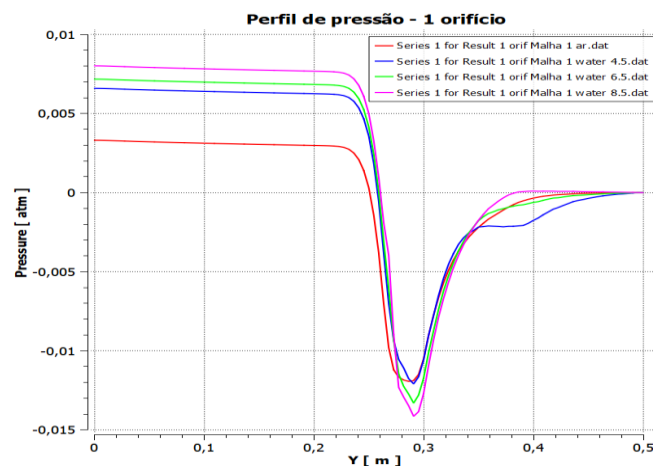
Figura 4.1. Contorno de pressão para injeção por 1 orifício (malha grosseira: a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.



Fonte: acervo pessoal.

Além das observações anteriores, a Figura 4.2 detalha o comportamento da variável, e apresenta a proximidade entre os valores iniciais de pressão nos casos em que ocorre a entrada de água, em comparação com o afastamento dessas três curvas em relação ao gráfico de pressão do escoamento somente com ar. Com isso, foi possível comprovar o impacto do escoamento multifásico sobre o gráfico de pressão.

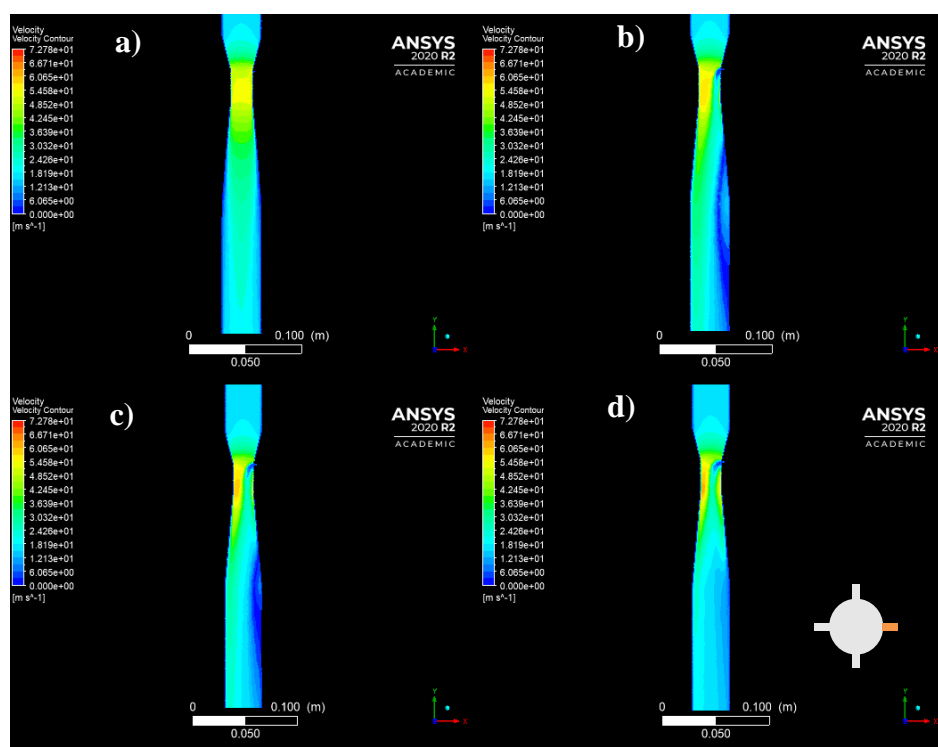
Figura 4.2. Gráfico de pressão para injeção por 1 orifício (malha grosseira).



Fonte: acervo pessoal.

Relacionando o gráfico de pressão com o contorno de velocidade da Figura 4.3, a oscilação associada à entrada de água a 4,5 m/s pode ter sido causada pelo decréscimo de velocidade no centro do lavador, sendo que estava sendo iniciada a formação de um vórtice próximo à parede do difusor, como pode ser visto na Figura 4.3.

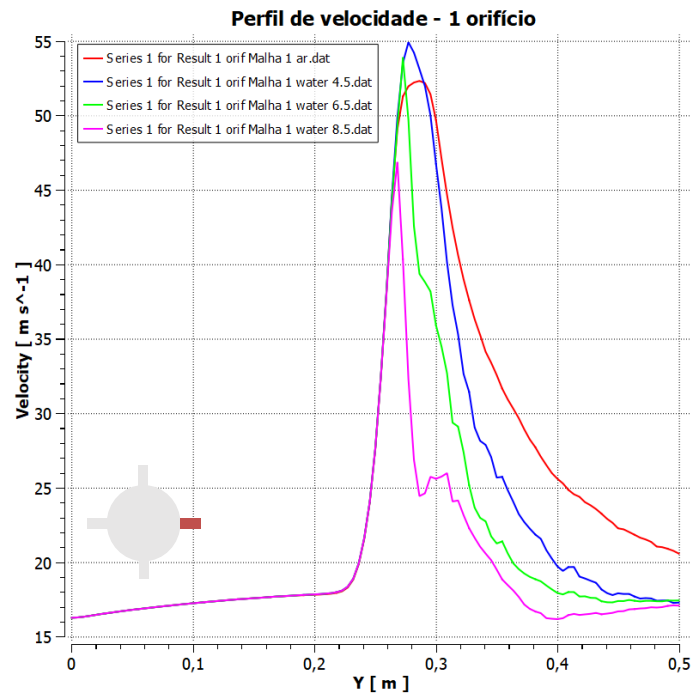
Figura 4.3. Contorno de velocidade para injeção por 1 orifício (malha grosseira): a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.



Fonte: acervo pessoal.

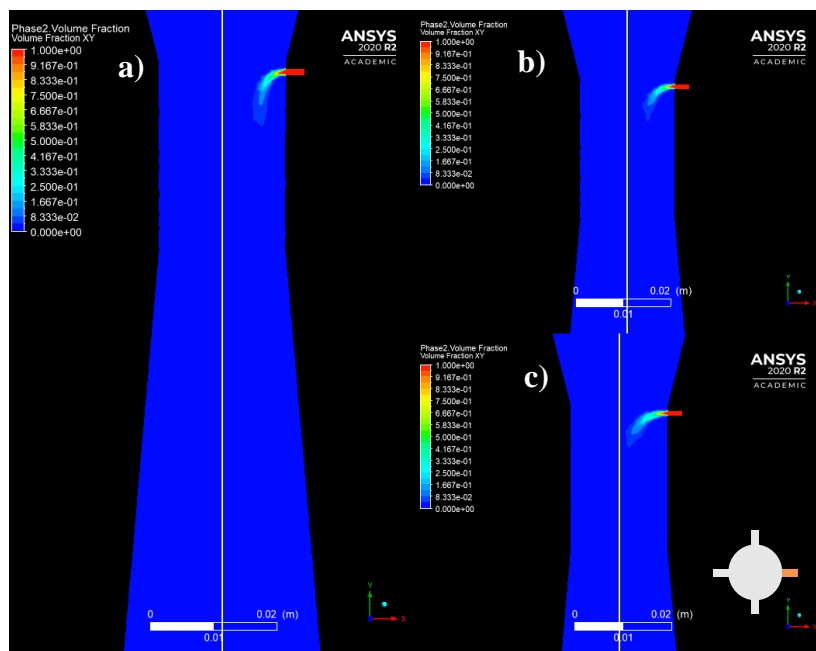
A Figura 4.4, por sua vez, descreve tanto o ápice quanto o declínio acentuado na velocidade para a velocidade de água a 8,5 m/s e, com o auxílio dos contornos da Figura 4.3, é possível compreender que esse comportamento é explicado pelo desvio em direção à parede oposta, provocado pela entrada do jato, sendo que as variações para as outras velocidades de líquido são menos bruscas, logo, o escoamento é mais constante ao longo do comprimento. A Figura 4.5 complementa a explicação do cenário ao demonstrar o jato do último cenário atingindo a área mais perto do centro do lavador Venturi.

Figura 4.4. Gráfico de velocidade para escoamento de água por 1 orifício (malha grosseira).



Fonte: acervo pessoal.

Figura 4.5. Frações volumétricas de água para 1 orifício (malha grosseira): a) velocidade da água de 4,5 m/s; b) velocidade da água de 6,5 m/s; c) velocidade da água de 8,5 m/s.

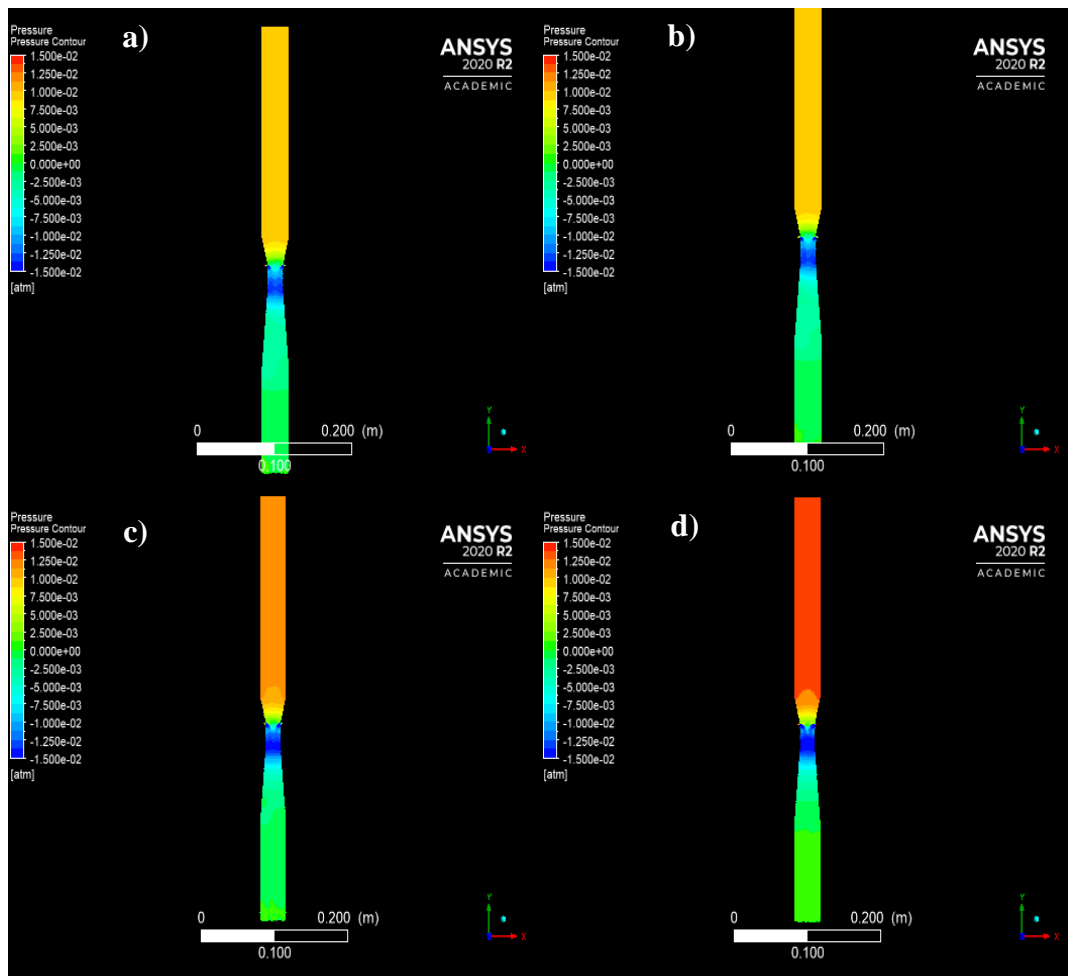


Fonte: acervo pessoal.

4.1.1.2 Dois orifícios

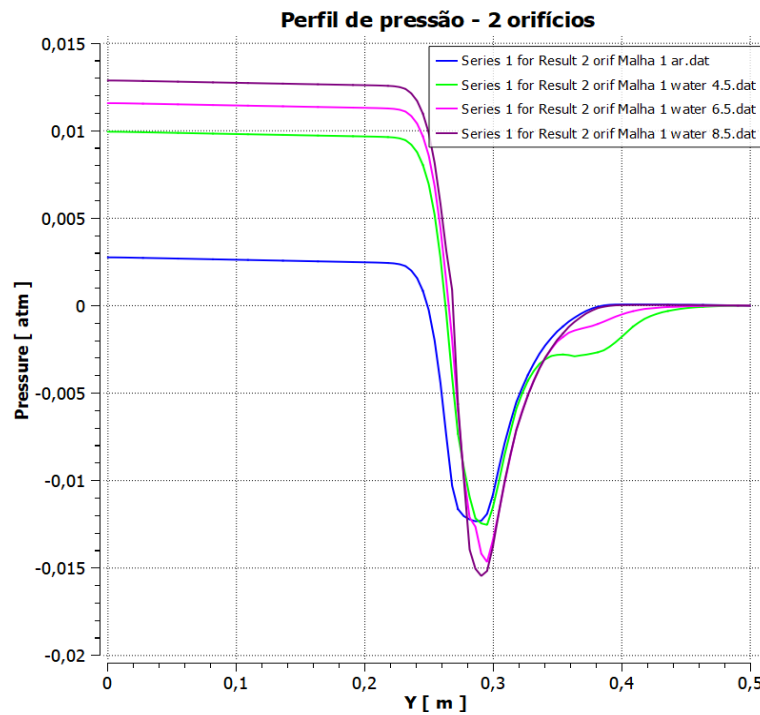
O contorno de pressão na Figura 4.6 apresenta alguns aspectos que possibilitam comparações. A primeira é como a variável tem menor valor mínimo quando ocorre entrada de água a 8,5 m/s e, quanto menor essa velocidade, maior é a pressão na faixa situada no final da garganta e, em contrapartida, o escoamento sem entrada de líquido apresentou a menor queda de pressão – fatos que podem ser confirmados pelo perfil da Figura 4.7.

Figura 4.6. Contorno de pressão para injeção por 2 orifícios (malha grosseira). Em sentido horário: a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.



Fonte: acervo pessoal.

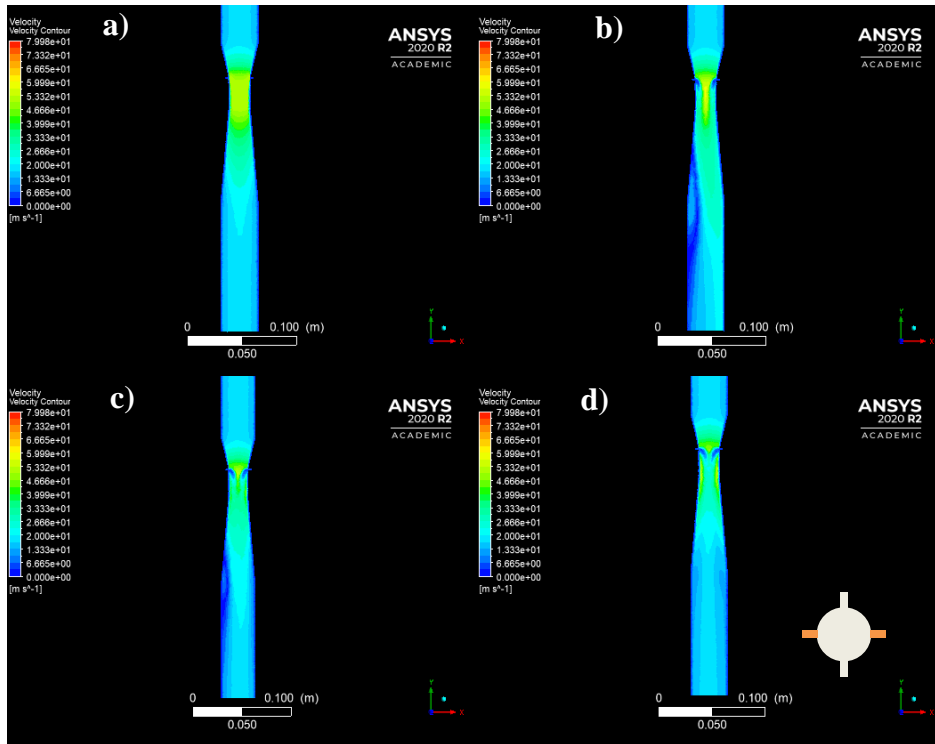
Figura 4.7. Gráfico de pressão para injeção por 2 orifícios (malha grosseira).



Fonte: acervo pessoal.

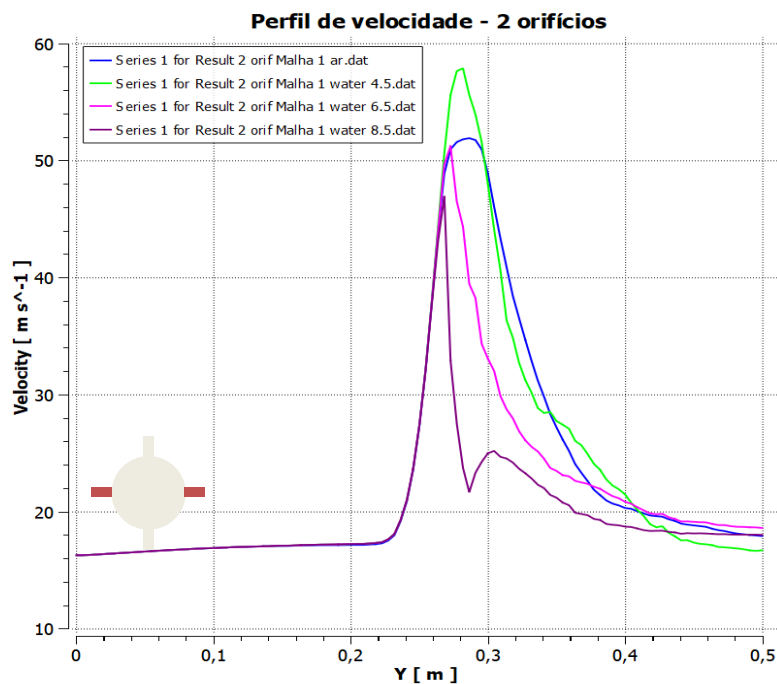
No que se refere à velocidade da mistura, o contorno de velocidade da Figura 4.8 apresenta um estreitamento da passagem de ar e conseqüente aumento de velocidade entre os jatos e, para as velocidades de líquido iguais a 4,5 e 6,5, é possível observar a presença de vórtices. Porém, esse cenário, apesar de maior entrada de água, não atingiu a velocidade esperada de 50 m/s na entrada da garganta para velocidade de 8,5 m/s, de forma que o maior valor ocorreu para entrada de água a 4,5 m/s ao atingir cerca de 60 m/s, como mostrado na Figura 4.9.

Figura 4.8. Contorno de velocidade para injeção por 2 orifícios (malha grosseira). No sentido horário: a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.



Fonte: acervo pessoal.

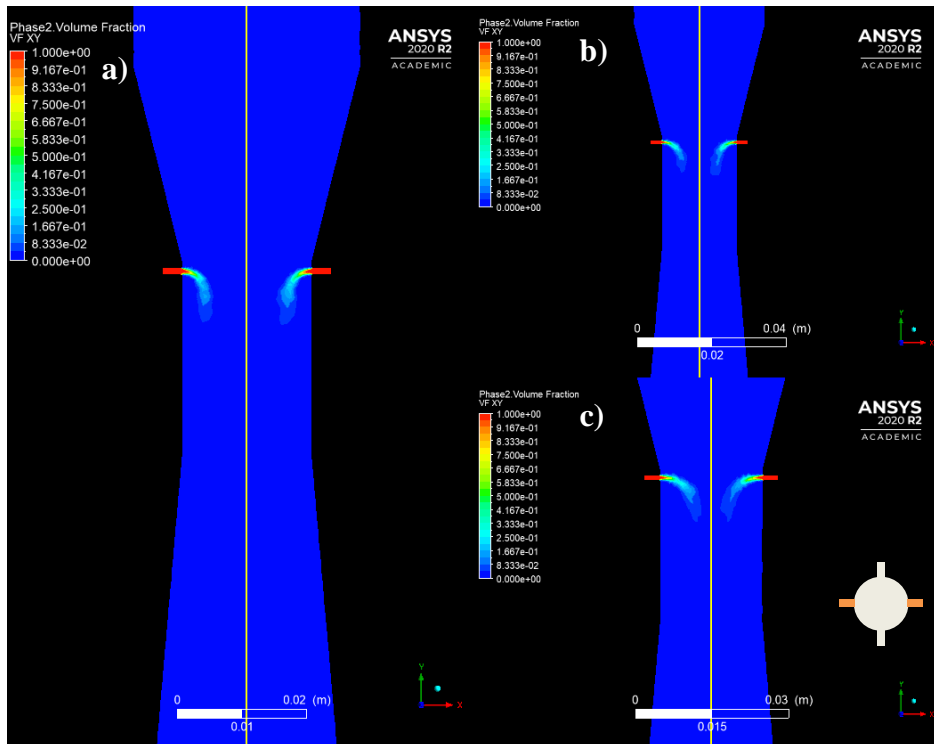
Figura 4.9. Gráfico de velocidade para escoamento de água por 2 orifícios (malha grosseira).



Fonte: acervo pessoal.

Pela Figura 4.10, observa-se a proximidade entre os pares de jato aumentando a cada acréscimo de velocidade.

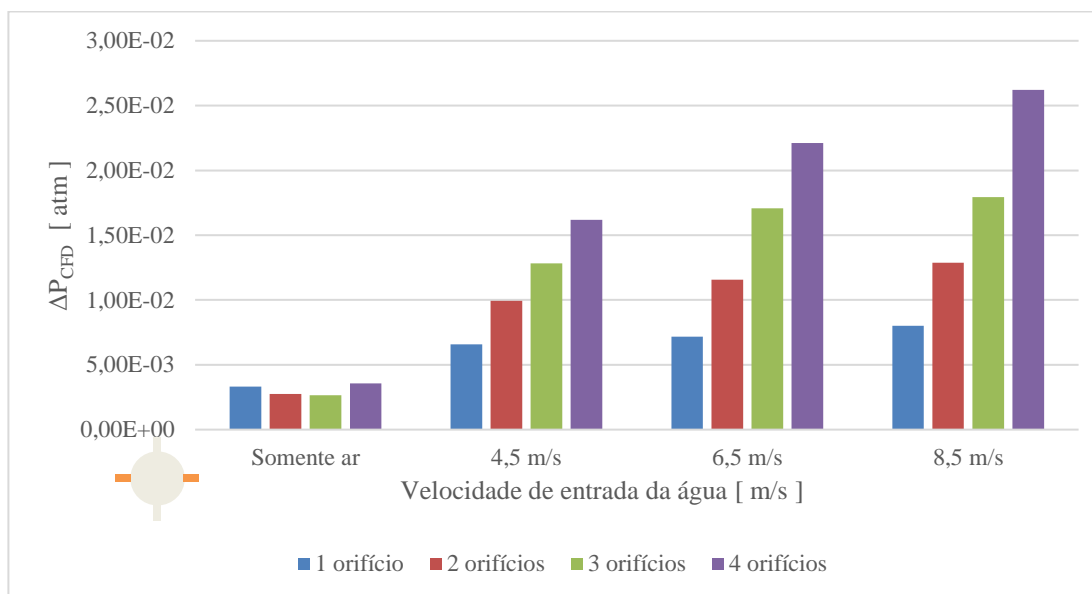
Figura 4.10. Contorno da fração volumétrica de água para injeção por 2 orifícios (malha grosseira). Destaque à esquerda: velocidade da água de 4,5 m/s; Canto superior direito: velocidade da água de 6,5 m/s; Canto inferior esquerdo: velocidade da água de 8,5 m/s.



Fonte: acervo pessoal.

Para as demais configurações na malha grosseira, as quedas de pressão resumidas na Figura 4.11 demonstram o padrão se repetindo na menor redução para o caso do escoamento somente com ar e, para os cenários com injeção de água, a variação aumenta com a crescente injeção de líquido com o aumento de orifícios e com o aumento de velocidade de água devido ao fato de que parte da energia de velocidade da fase dispersa foi utilizada para acelerar a mistura. Dessa forma, não houve conversão total para energia de pressão na área divergente, atingindo o máximo para o cenário de 4 orifícios com injeção de água a 8,5 m/s.

Figura 4.11. Queda de pressão para cada velocidade, considerando as configurações dos orifícios (malha grosseira).



Fonte: acervo pessoal.

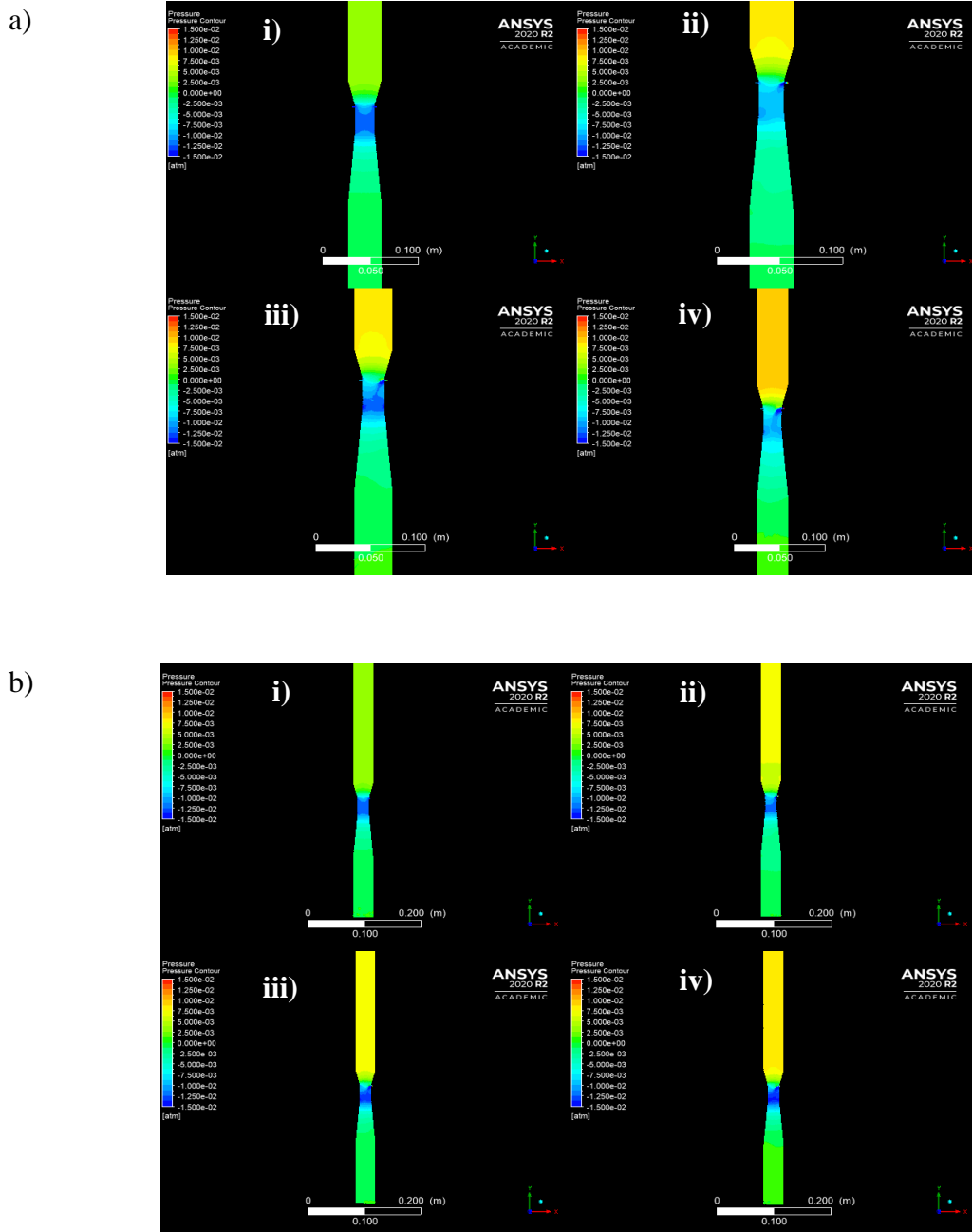
4.1.2 Malha refinada

Como os perfis de pressão para ambas as malhas apresentam comportamento análogo, variando apenas as condições numéricas, os dois próximos tópicos serão dedicados a uma comparação entre os resultados obtidos nas malhas considerando a variação das velocidades. Um comparativo analisando as características das malhas para um cenário específico será realizado na seção 4.3.

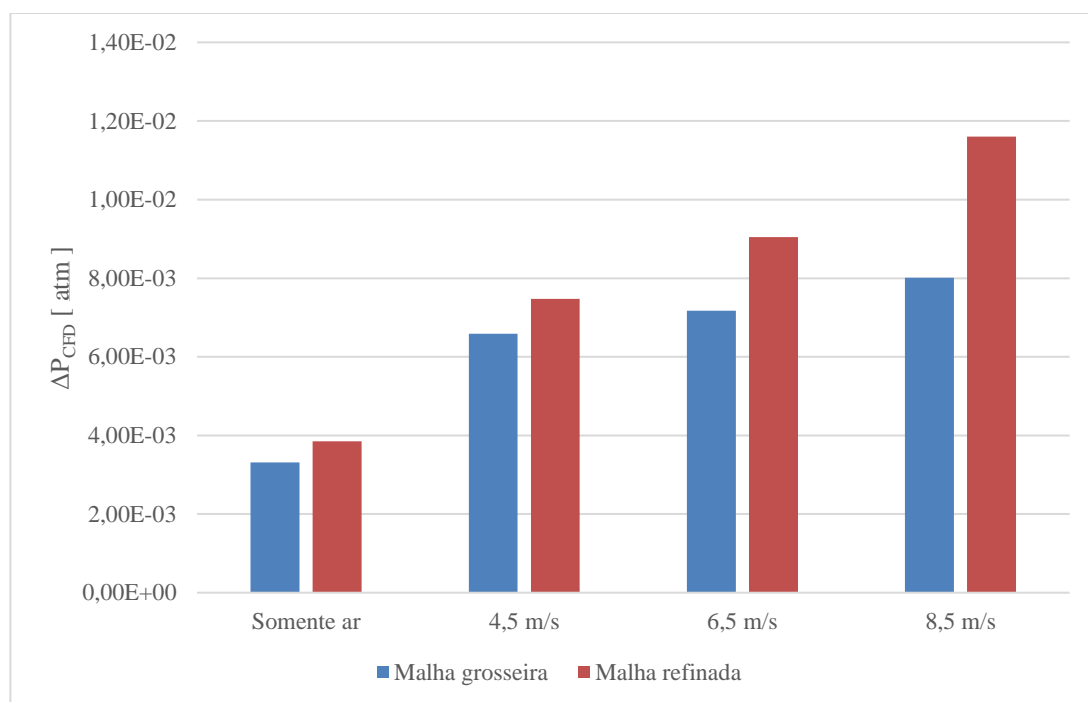
4.1.2.1 Um orifício

Pelas Figuras 4.12a e 4.12b, é possível observar que a pressão no centro da garganta para a malha refinada não apresenta valores tão baixos quanto os valores para a malha grosseira, o que também é comprovado pela análise dos perfis das Figuras 4.2 e B.1, apresentando valores mínimo e máximo maiores que os da malha mais grosseira. Isso pode ter ocorrido porque a malha refinada, por conter mais elementos, possibilitou que os volumes de controle fossem menores e contemplassem maiores intensidades para os valores médios da equação RANS. A discrepância entre as malhas também cresce com o aumento da velocidade de água.

Figura 4.12. Comparativo do comportamento da pressão para injeção por 1 orifício (malha refinada). a) Contorno para malha refinada; b) Contorno para malha grosseira: i) escoamento somente de ar; ii) velocidade de água a 4,5 m/s; iii) velocidade de água a 6,5 m/s; iv) velocidade de água a 8,5 m/s. c) Comparativo entre os valores de queda em cada malha.



c)

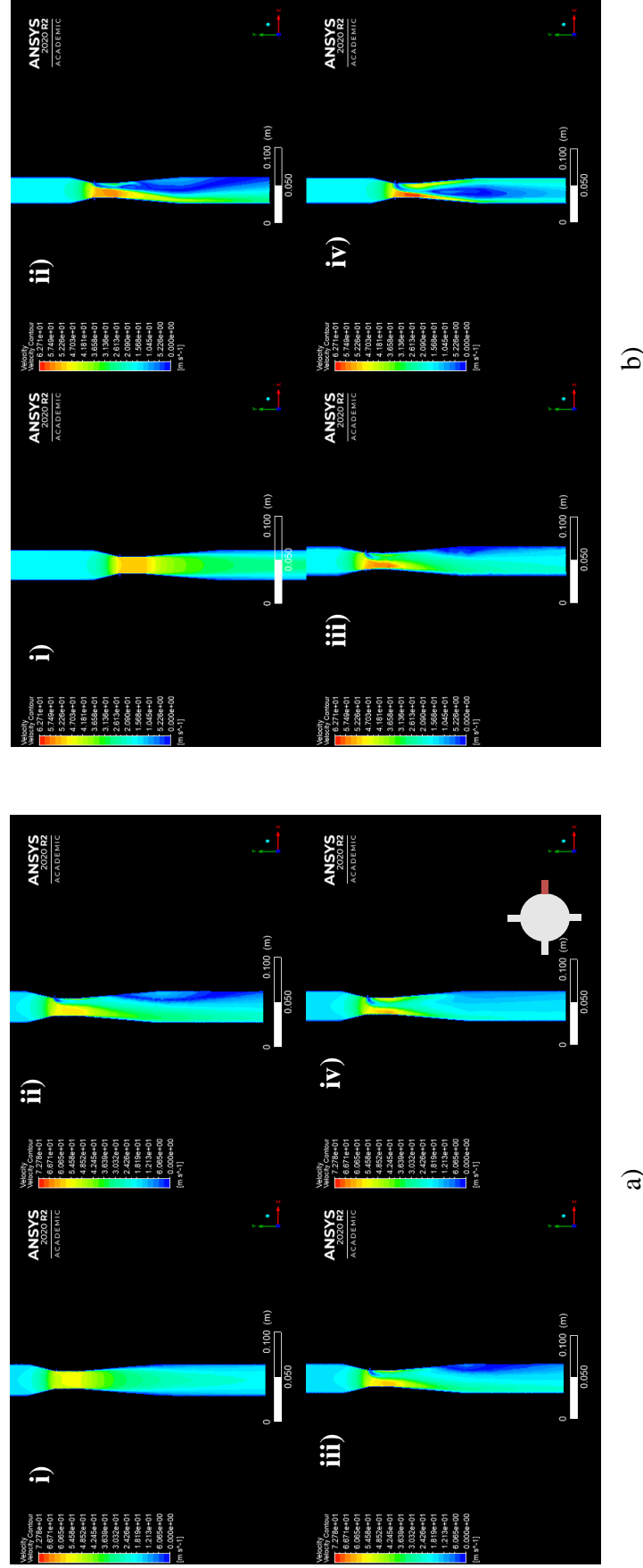


Fonte: acervo pessoal.

No que se refere à velocidade, a Figura 4.13 evidencia que os contrastes dessa grandeza estão mais presentes no contorno da Figura 4.13b (malha refinada) do que na Figura 4.13a (malha grosseira) e, com isso, a intensidade da velocidade da mistura no desvio causado pela injeção é mais nítido, assim como o decréscimo acentuado no centro do equipamento na área do difusor. Essas divergências também podem ser identificadas nos perfis de velocidade da Figura 4.14, na qual a Figura 4.14b atinge um valor mais próximo de 50 m/s do que na Figura 4.14a e a queda de velocidade e a posterior recuperação são melhor representadas, principalmente para entrada de líquido a 8,5 m/s.

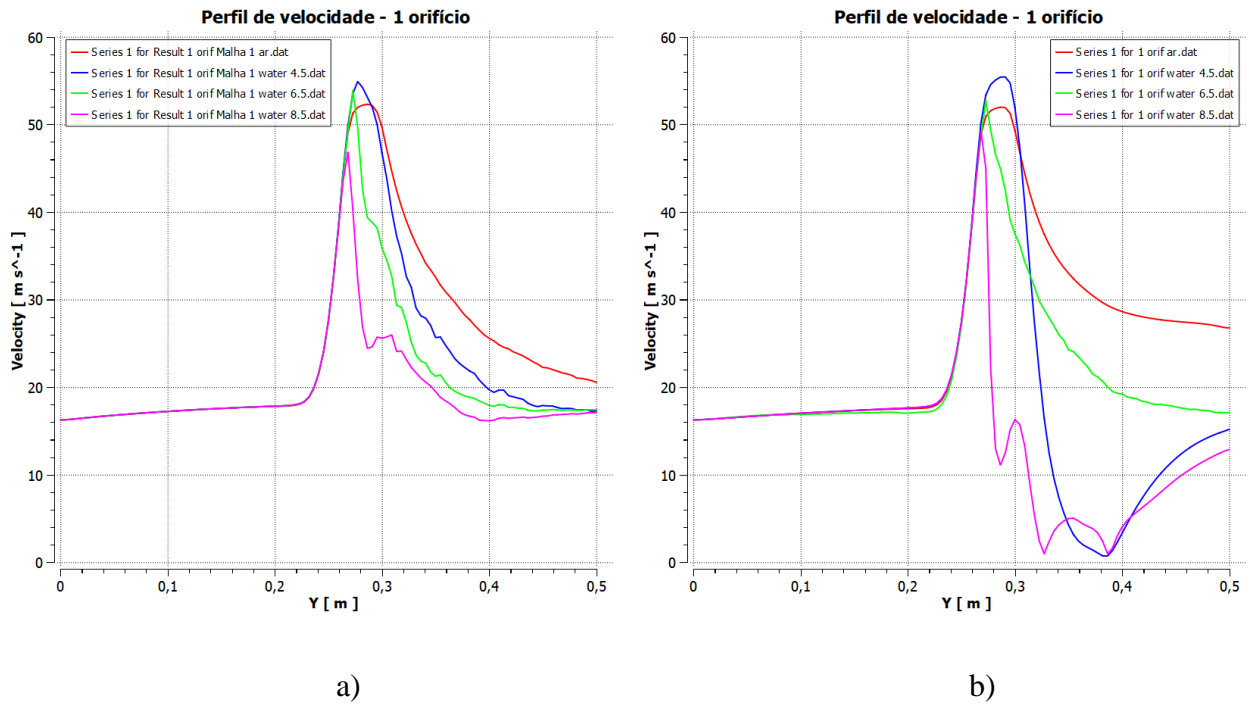
Além disso, pela Figura 4.15, o contorno de fração volumétrica da água da Figura 4.15b (malha refinada) é mais alongado que o da Figura 4.15a (malha grosseira), o que aumenta a compreensão da dinâmica do jato dentro do equipamento, mesmo que a distância até o centro seja praticamente o mesmo para os dois casos.

Figura 4.1313. Comparativo de contornos de velocidade entre malhas para injeção por 1 orifício: a) Malha grosseira; b) Malha refinada; i) escoamento somente de ar; ii) velocidade de água a 4,5 m/s; iii) velocidade de água a 6,5 m/s; iv) velocidade de água a 8,5 m/s.



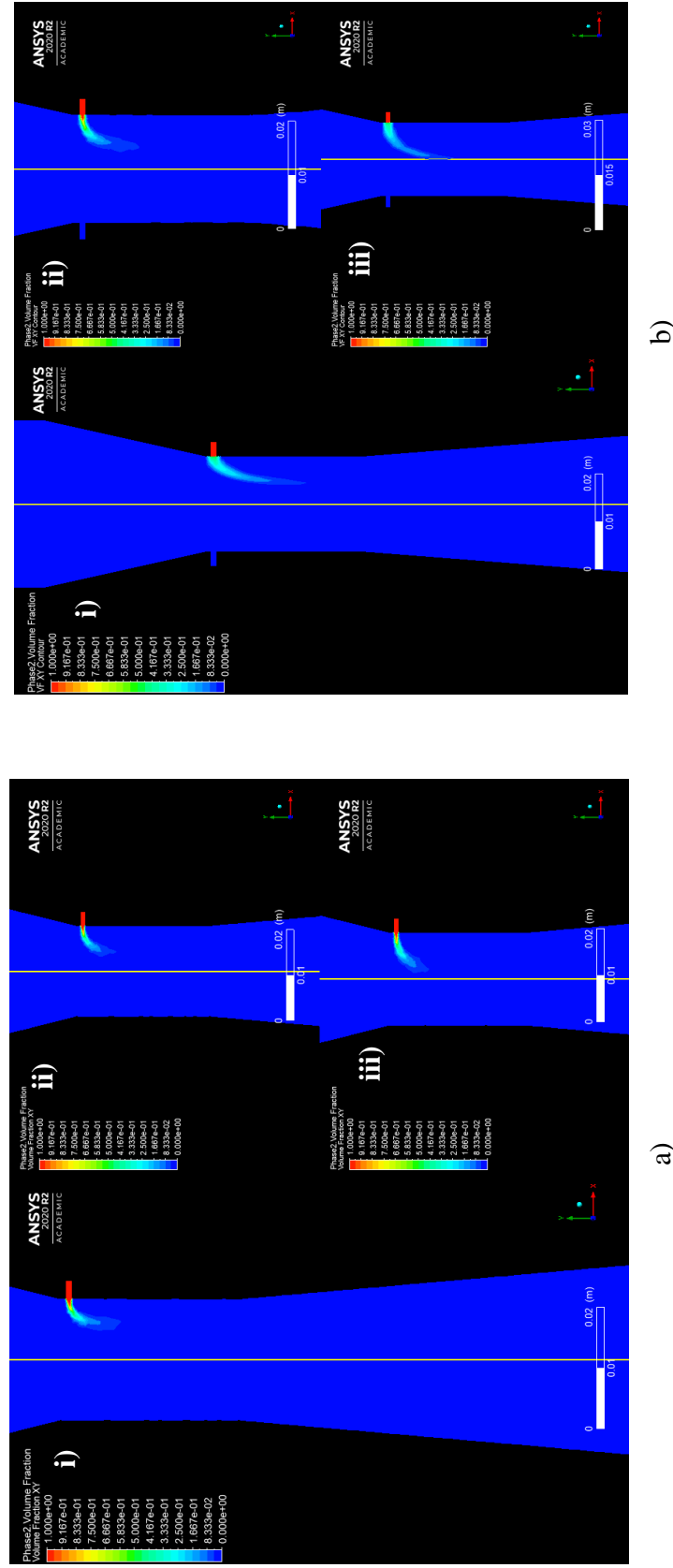
Fonte: acervo pessoal.

Figura 4.14. Gráfico de velocidade para escoamento de água por 1 orifício: a) Malha grosseira; b) Malha refinada.



Fonte: acervo pessoal.

Figura 4.1515. Comparativo de contornos de fração volumétrica de água entre malhas para injeção por 2 orifícios: a) Malha grosseira; b) Malha refinada. i) velocidade de água a 4,5 m/s; ii) velocidade de água a 6,5 m/s; iii) velocidade de água a 8,5 m/s.

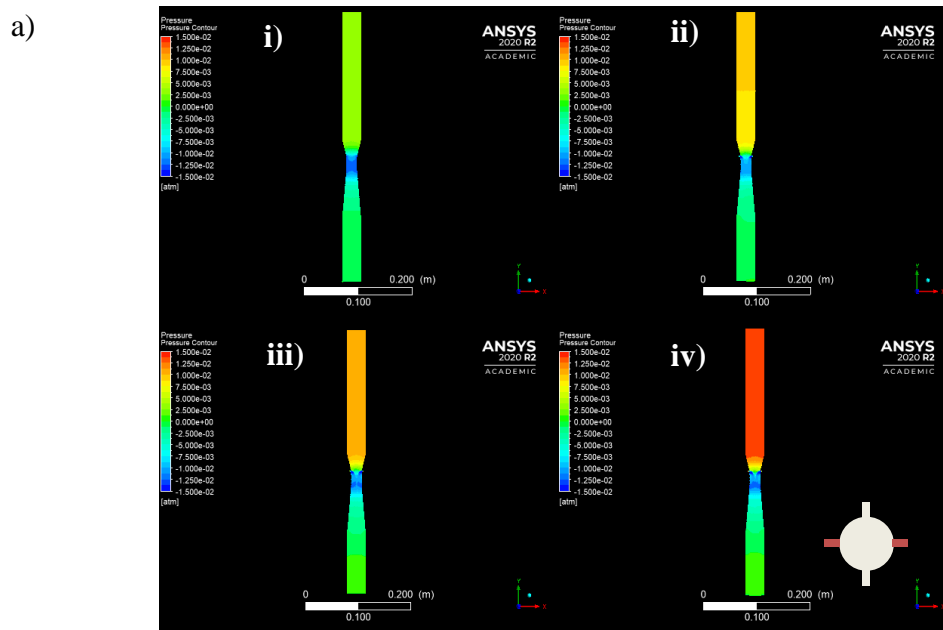


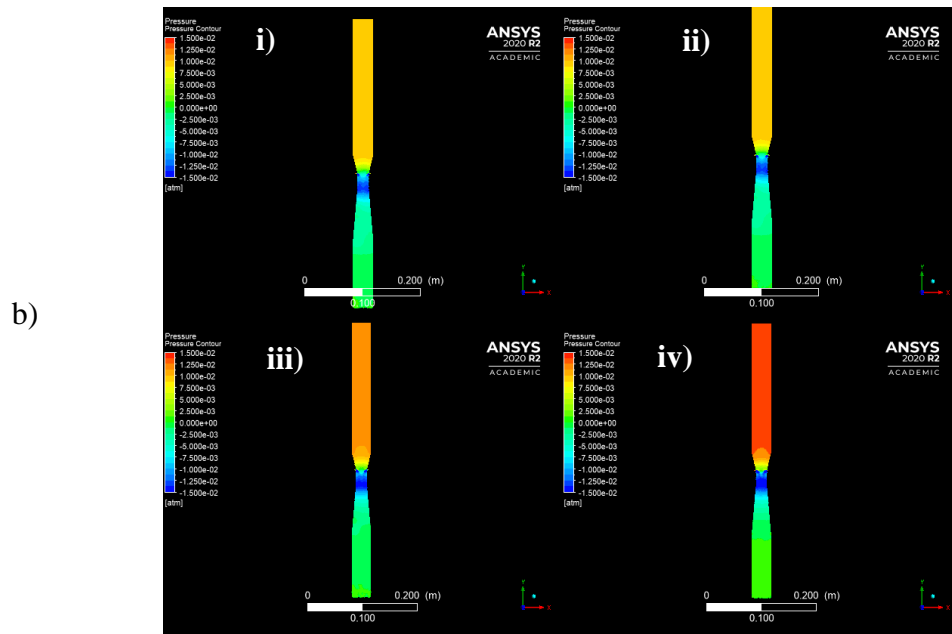
Fonte: acervo pessoal.

4.1.2.2 Dois orifícios

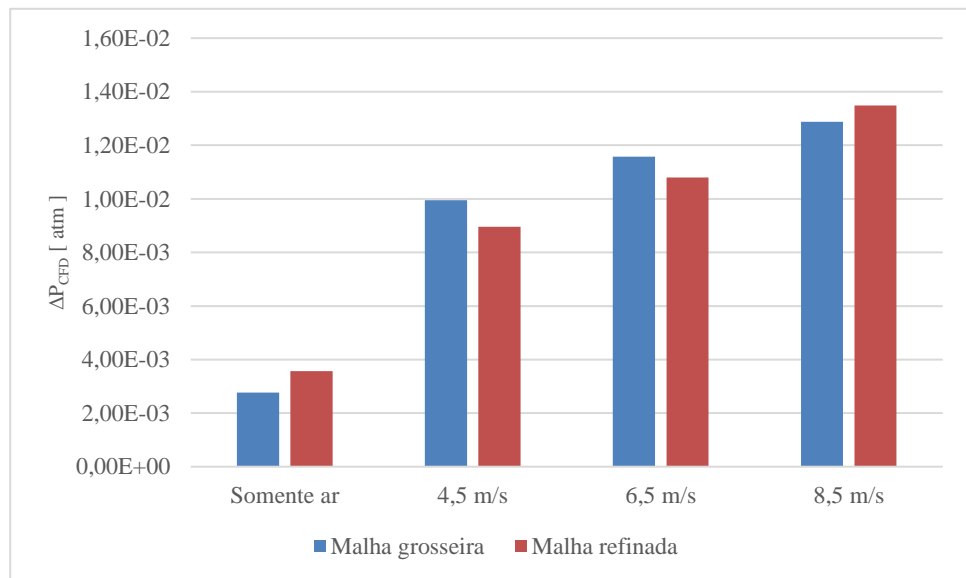
Em contrapartida ao cenário com apenas 1 orifício, o caso com 2 entradas de água apresentou quedas de pressão na malha grosseira maiores que as na malha refinada para as velocidades de entrada de água iguais a 4,5 e a 6,5 m/s, como pode ser identificado na Figura 4.16c, embora a Figura 4.16a apresente pressão na garganta com valores maiores que os da Figura 4.16b, assim como a diferença que ocorreu no cenário anterior.

Figura 4.16. Comportamento da pressão para injeção por 2 orifícios (malha refinada). a) Contorno para malha refinada; b) Contorno para malha grosseira: i) escoamento somente de ar; ii) velocidade de água a 4,5 m/s; iii) velocidade de água a 6,5 m/s; iv) velocidade de água a 8,5 m/s. c) Comparativo entre os valores de queda em cada malha.





c)

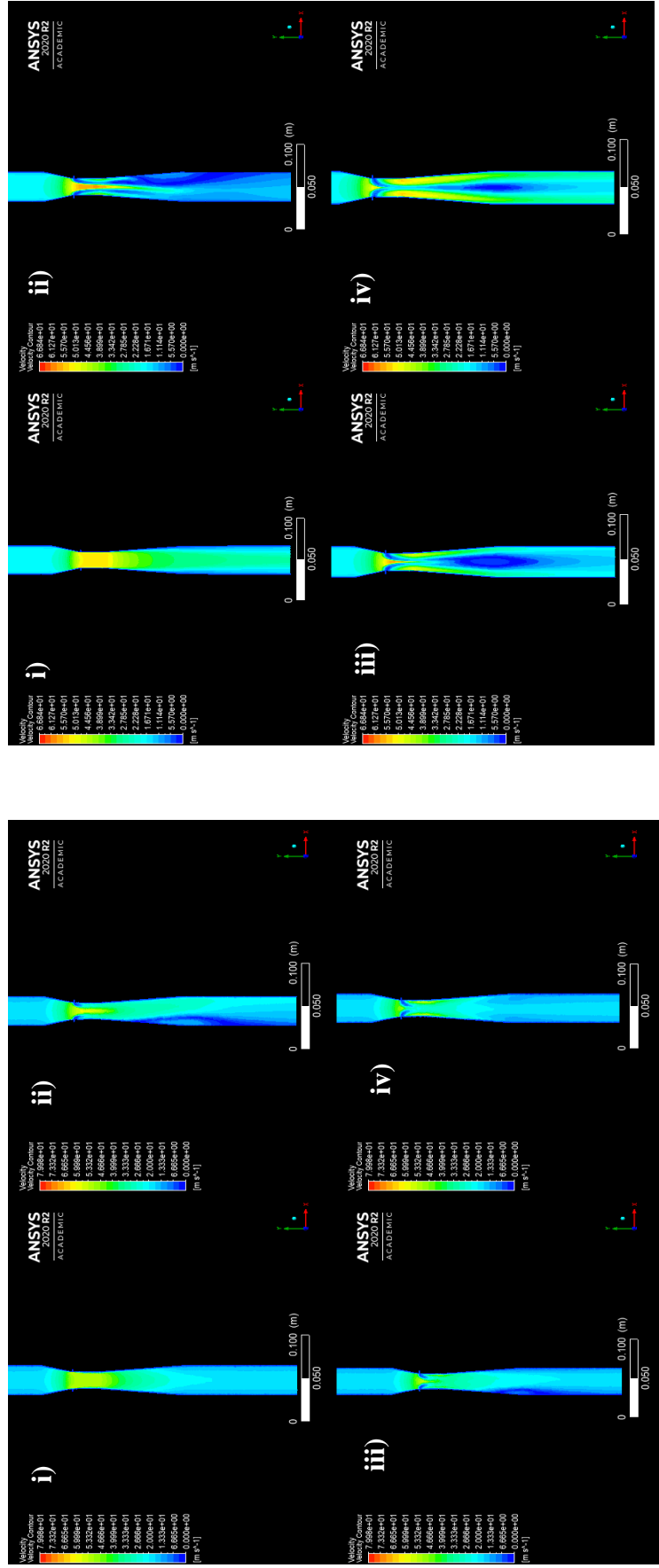


Fonte: acervo pessoal.

Essa diferença pode ser explicada a partir dos perfis da Figura 4.18, em que os valores referentes às velocidades de entrada da água iguais a 4,5 e 6,5 m/s na Figura 4.18b (malha refinada) são maiores que os obtidos na Figura 4.18a (malha grosseira). Isso demonstra que a malha refinada apresentou com mais precisão a conversão da pressão estática em pressão dinâmica para que o líquido pudesse ser acelerado e atomizado na garganta do lavador, o que não acontece de forma tão acentuada no cenário com entrada de líquido a 8,5 m/s. Nessa última configuração, todos os cenários de velocidade de água atingiram a velocidade de 50 m/s na garganta.

Além disso, como pode ser observado na Figura 4.17, a formação desse afunilamento pelo encontro dos jatos resulta em velocidades mais altas perto da parede e menores no centro do equipamento, especialmente no difusor, de modo que, para a menor velocidade de água, a variável atinge maior intensidade nas proximidades da interseção entre as entradas de líquido e, nas velocidades maiores, esse aumento ocorre nas partes mais distantes do centro, principalmente abaixo da saída do jato. As interações entre os jatos podem ser observadas pelos contornos de fração volumétrica de água representados na Figura 4.19.

Figura 4.17. Comparativo de contornos de velocidade entre malhas para injeção por 2 orifícios: a) Malha grosseira; b) Malha refinada: i) escoamento somente de ar; ii) velocidade de água a 4,5 m/s; iii) velocidade de água a 6,5 m/s; iv) velocidade de água a 8,5 m/s.

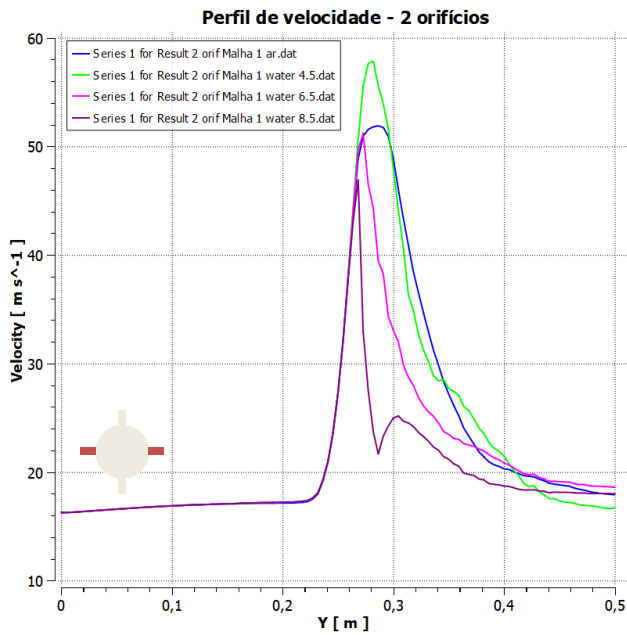


a)

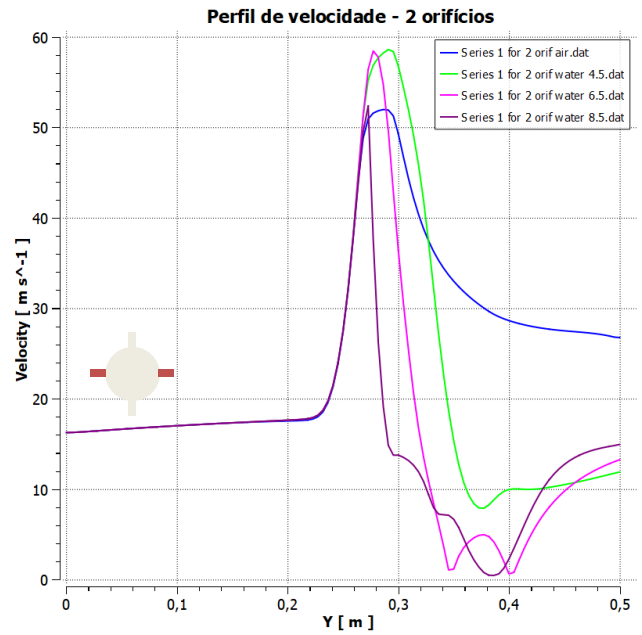
b)

Fonte: acervo pessoal.

Figura 4.18. Comparativo de Perfis de velocidade para escoamento de água por 2 orifícios: a) Malha grosseira; b) Malha refinada.



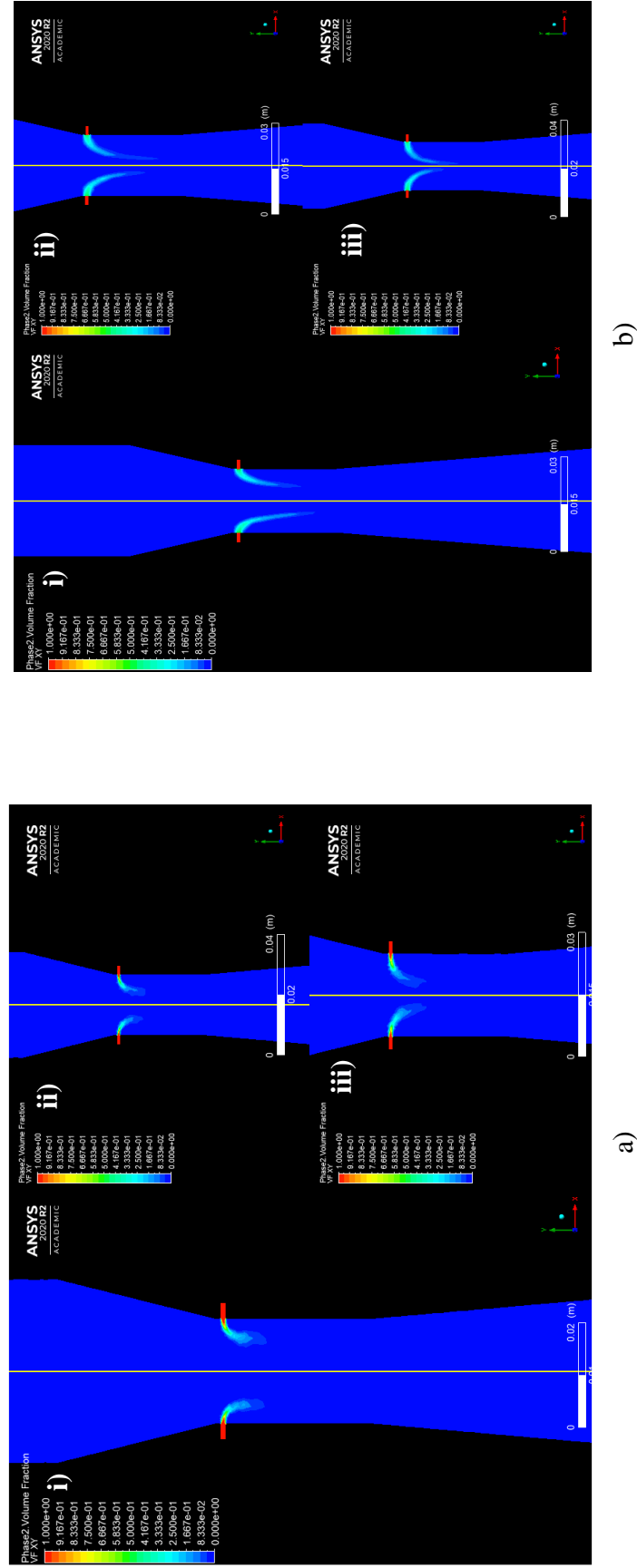
a)



b)

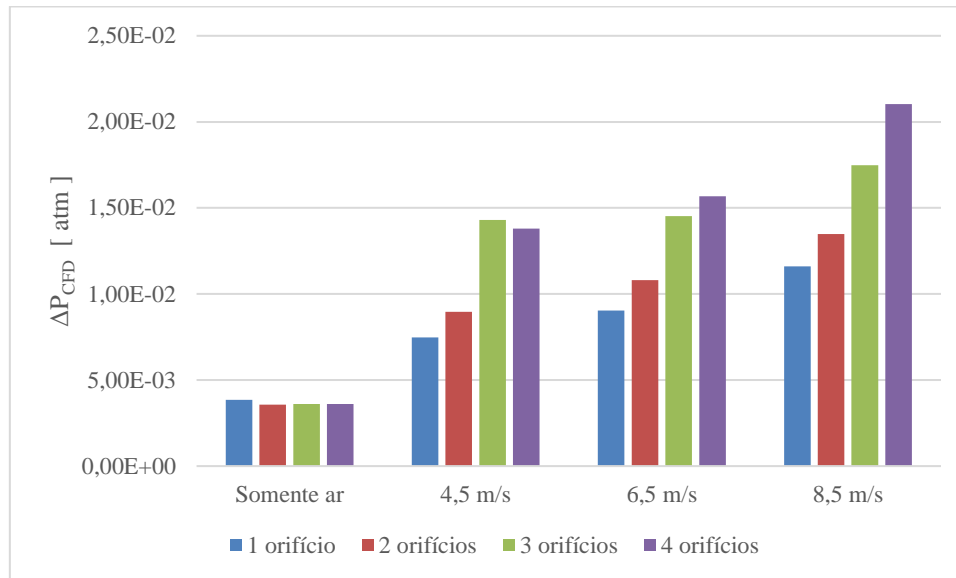
Fonte: acervo pessoal.

Figura 4.19. Comparativo de contornos de fração volumétrica de água entre malhas para injeção por 2 orifícios: a) Malha grosseira; b) Malha refinada: i) velocidade de água a 4,5 m/s; ii) velocidade de água a 6,5 m/s; iii) velocidade de água a 8,5 m/s.



Fonte: acervo pessoal.

Figura 4.20. Queda de pressão para cada velocidade considerando as configurações dos orifícios (malha refinada).



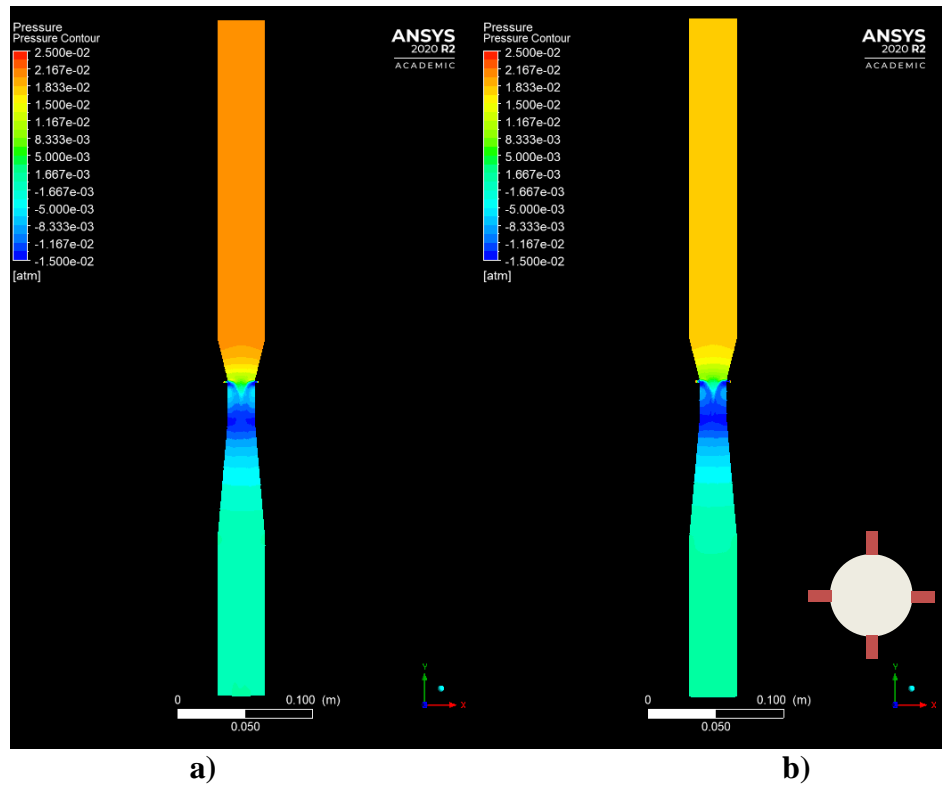
Fonte: acervo pessoal.

4.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS RNG K- ϵ E SST K- ω

Como foi abordado anteriormente, o grupo de equações do tipo $k-\omega$ também faz parte da abordagem RANS para resolução da Equação de Navier-Stokes em termos médios, assim como o grupo $k-\epsilon$. Diante disso, foi realizada a simulação do cenário com 4 orifícios com água entrando pela garganta a 8,5 m/s utilizando a malha refinada para verificar as diferenças nos resultados entre os modelos RNG (*Re-Normalization Group*) $k-\epsilon$ e SST (*Shear-Stress Transport*) $k-\omega$.

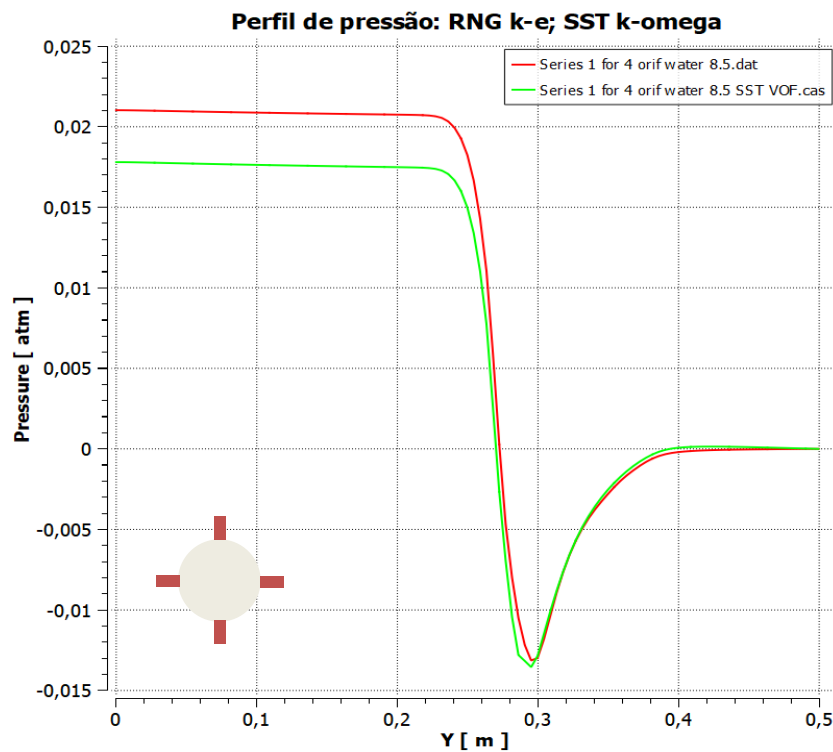
As primeiras diferenças já podem ser verificadas no contorno da Figura 4.21 e no Gráfico de pressão da Figura 4.22: no contorno, o valor inicial da pressão na simulação utilizando o modelo RNG $k-\epsilon$ foi maior e, no perfil da Figura 4.22, apresentou curvas mais suavizadas, o que indicou que, pelo menos no que se refere à combinação do VOF com o RNG $k-\epsilon$, o resultado foi mais preciso do que na combinação do VOF com o SST $k-\omega$. Outra diferença significativa pode ser verificada nos contornos obtidos na garganta, sendo que, para o RNG $k-\epsilon$, existiu uma redução aparentemente gradual desde os orifícios até o final da garganta, enquanto que, para o SST $k-\omega$, o caminho desde a injeção até o final da garganta apresentou baixas pressões, com pequenas áreas de formas semelhantes a círculos abaixo da entrada do jato, nas quais a pressão é pouco maior.

Figura 4.21. Contorno de pressão para injeção em 4 orifícios (comparação entre modelos). Em sentido horário: a) Modelo RNG k- ϵ ; b) Modelo SST k- ω .



Fonte: acervo pessoal.

Figura 4.22. Gráfico de pressão para injeção em 4 orifícios (comparação entre modelos).

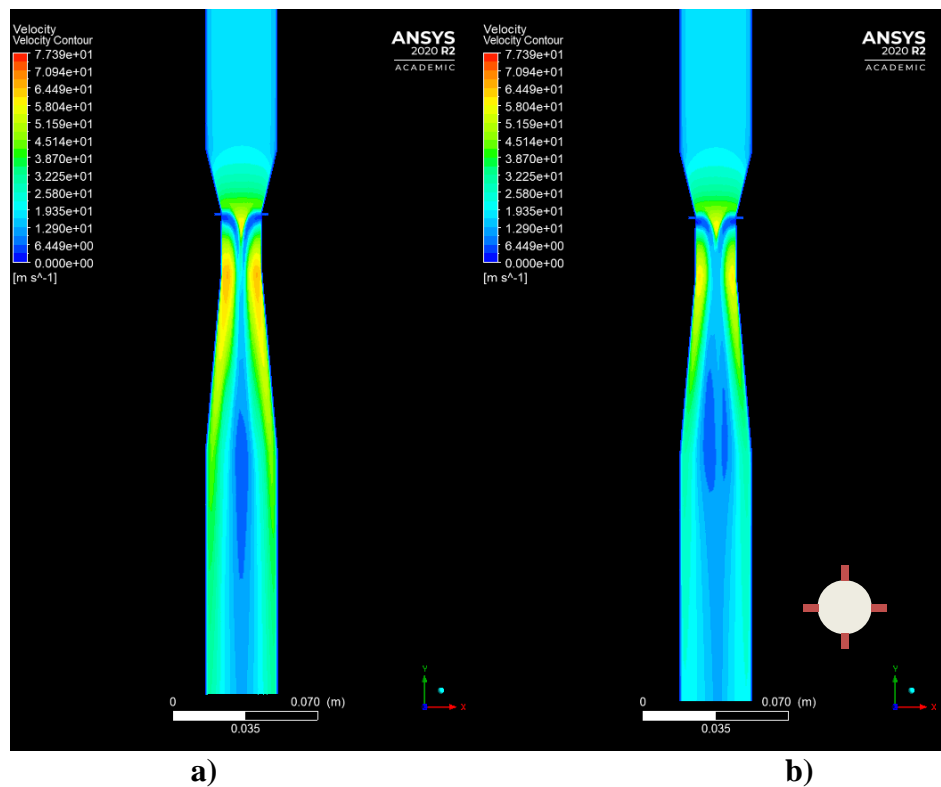


Fonte: acervo pessoal.

No que se refere à velocidade da mistura, o contorno da Figura 4.23 demonstra que o RNG k- ϵ apresentou maior diversidade de cores, apontando maiores quantidades de regiões com diferentes velocidades, logo, maior precisão, ao mesmo tempo que o SST k- ω , embora tenha utilizado cores semelhantes nas mesmas regiões, apresentou tonalidades mais uniformes e uma quebra na velocidade entre o final do difusor e o início do alongamento pós-divergência.

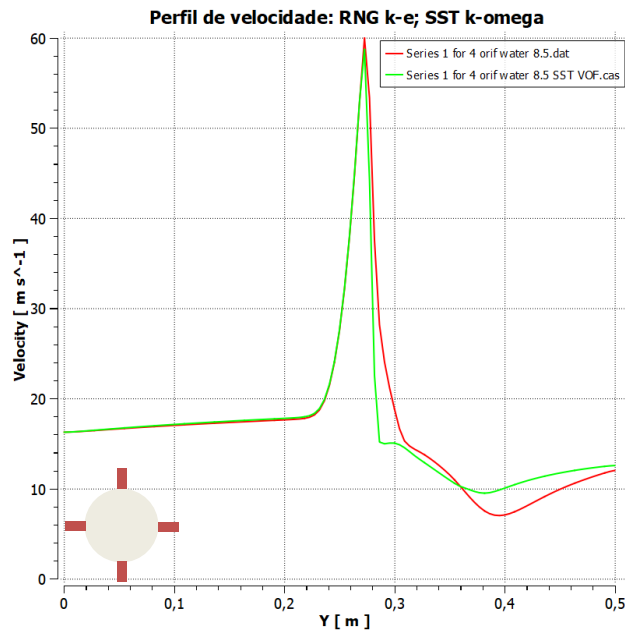
Por outro lado, o perfil da Figura 4.24 elucidada que, no centro do lavador, as velocidades foram muito próximas até atingirem as velocidades máximas – as quais foram superiores a 50 m/s, com maior oscilação posterior para entrada de água a 8,5 m/s, mas as velocidades finais foram quase as mesmas.

Figura 4.23. Contorno de velocidade para injeção por 4 orifícios (comparação entre modelos): a) Modelo RNG k- ϵ ; b) Modelo SST k- ω .



Fonte: acervo pessoal.

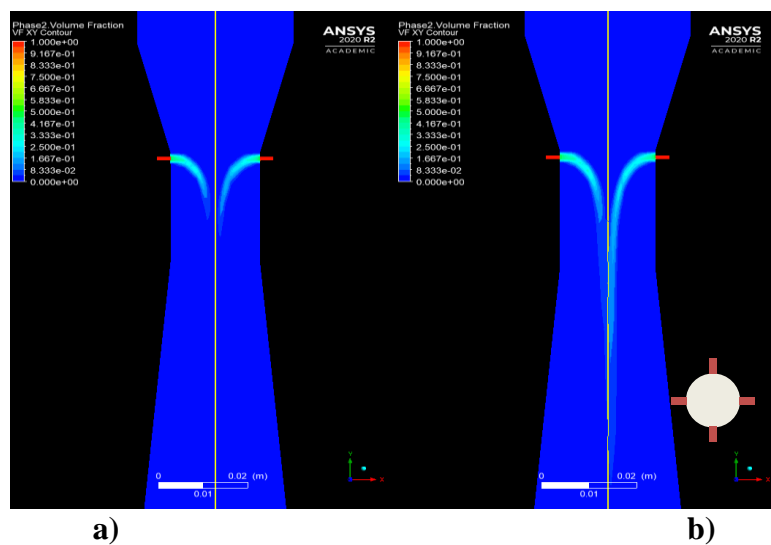
Figura 4.24. Gráfico de velocidade para escoamento de água por 4 orifícios (comparação entre modelos).



Fonte: acervo pessoal.

O único resultado em que o SST k- ω apresentou maior precisão foi no contorno da fração volumétrica de água mostrado na Figura 4.25, em que o caminho simulado percorrido pelo jato foi maior, mas a trajetória do jato descrita pelo modelo RNG k- ϵ já foi satisfatória.

Figura 4.25. Contorno de fração volumétrica da água para injeção por 4 orifícios (comparação entre modelos): a) Modelo RNG k- ϵ ; b) Modelo SST k- ω .



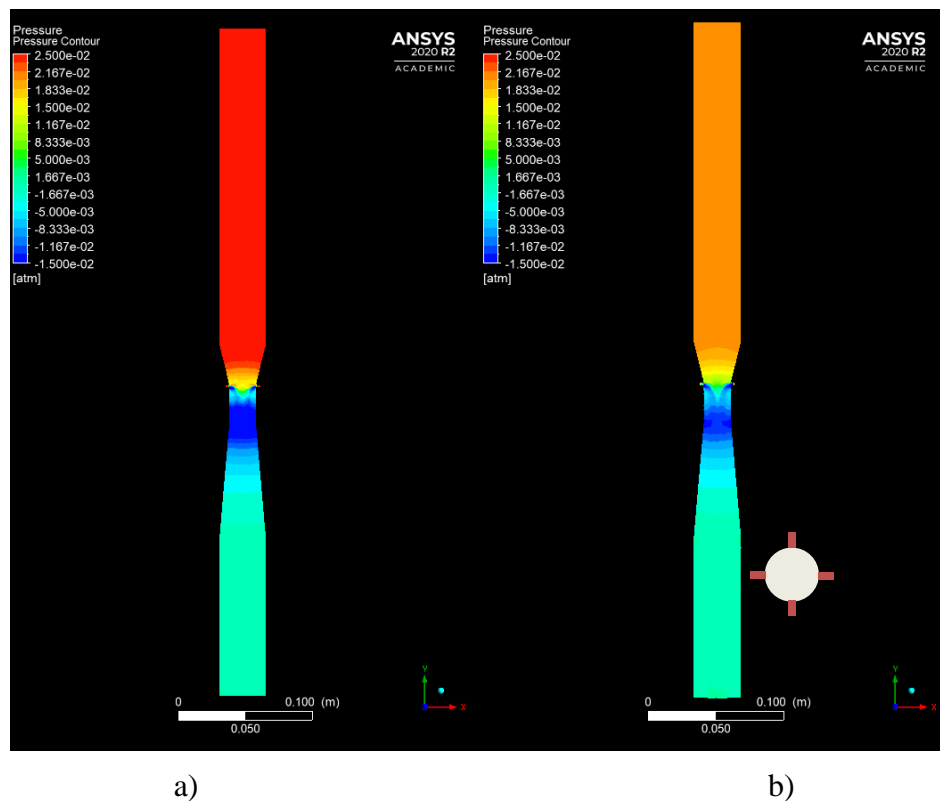
Fonte: acervo pessoal.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE MALHAS

Na última comparação deste estudo, foram analisadas as principais distinções entre os contornos de pressão das malhas geradas considerando a configuração de 4 orifícios com entrada de água no equipamento a 8,5 m/s. Para essa comparação, nos perfis de pressão e de velocidade, a malha grosseira será chamada de malha 1, e a malha refinada será referenciada a partir do tipo de configuração e da velocidade de entrada do líquido.

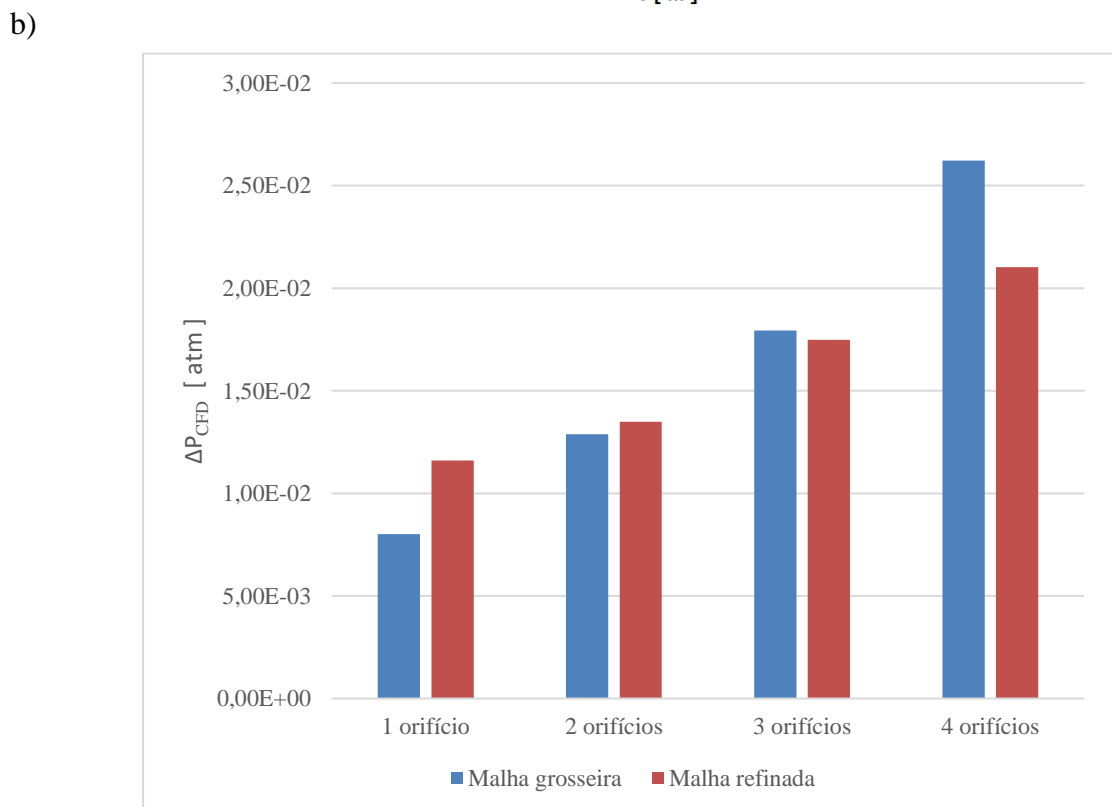
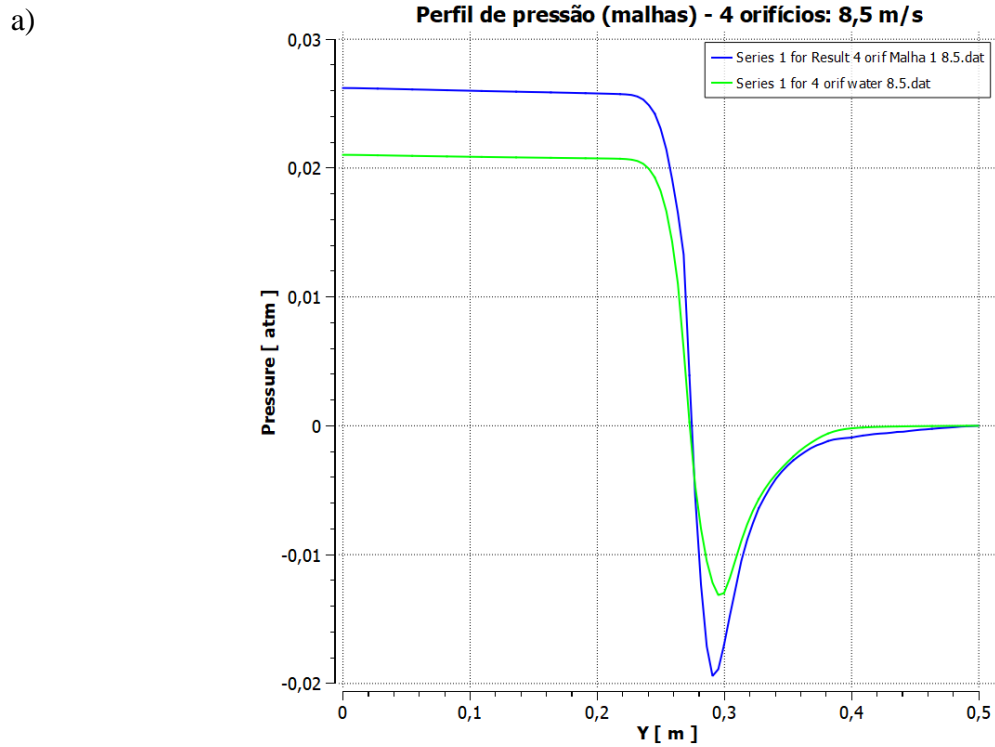
O contorno de pressão da Figura 4.26 e o perfil representado na Figura 4.27 apresentam o resultado da malha refinada como tendo o menor valor máximo inicial, assim como menor módulo do valor mínimo. Isso pode ter ocorrido porque a malha grosseira contém muito menos elementos e, com isso, a resolução das equações ocorreu tomando em cada volume de controle uma porção consideravelmente extensa do domínio, não levando em conta os valores de forma mais específica para cada área, o que prejudicou a precisão do modelo ao atingir valores maiores que o da malha refinada.

Figura 4.26. Contorno de pressão para injeção em 4 orifícios (comparação entre malhas): a) Malha grosseira; b) Malha refinada.



Fonte: acervo pessoal.

Figura 4.27. Gráfico de pressão para injeção em 4 orifícios (comparação entre malhas).

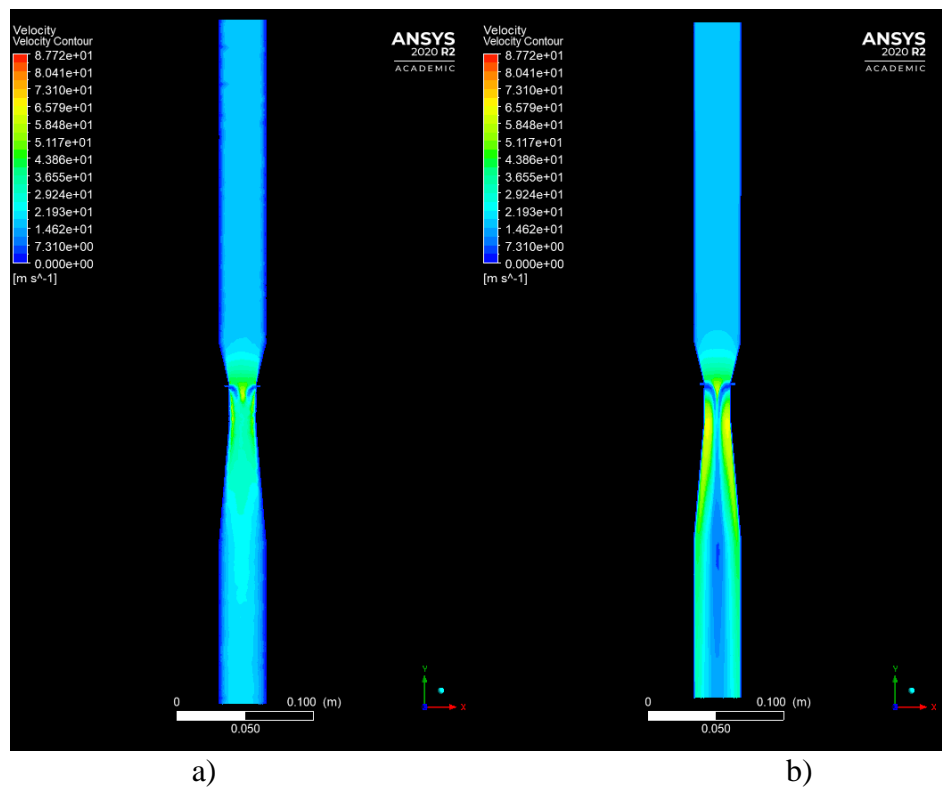


Fonte: acervo pessoal.

De maneira análoga à discussão relativa à pressão, no contorno de velocidade da Figura 4.28, é possível observar que, apesar de existir a diferença entre as cores, os limites entre elas

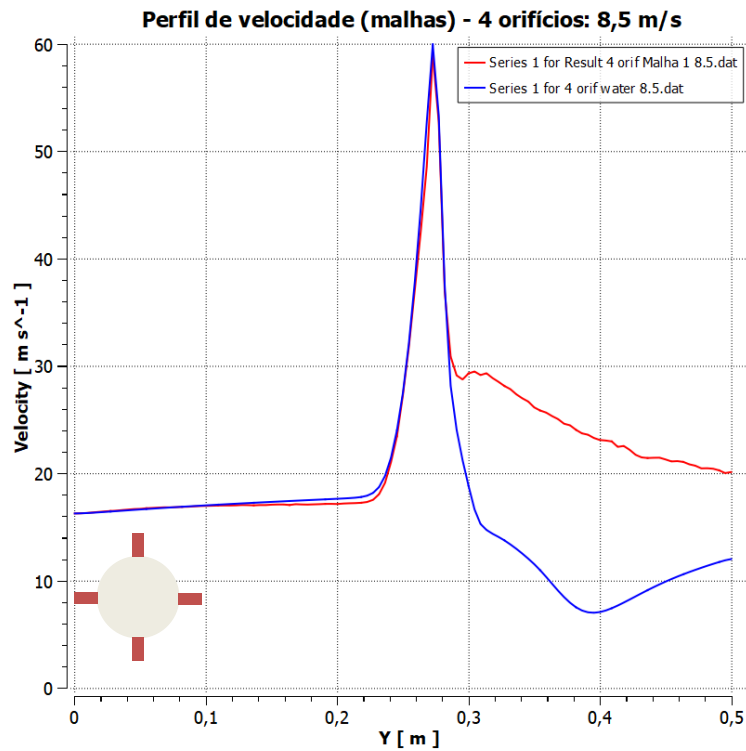
não ocorrem de forma tão distinta e nítida como na malha refinada. Outro fator que vale ser destacado e que reforça isso é a curva da malha grosseira não apresentar o decréscimo significativo como o da malha refinada no Gráfico de velocidades da Figura 4.29, visto que, no centro do equipamento, não houve grande distinção para os contrastes. Por fim, no contorno de fração volumétrica da Figura 4.30, a penetração de água da malha grosseira foi menor que a da malha refinada: isso pode ter ocorrido por problemas na resolução numérica do problema ou pela demanda da quantidade de iterações ser maior que a realizada durante a simulação, o que também significaria que o refinamento da malha atinge maior precisão com custo computacional relativamente menor.

Figura 4.28. Contorno de velocidade para injeção em 4 orifícios (comparação entre malhas): a) Malha grosseira; b) Malha refinada.



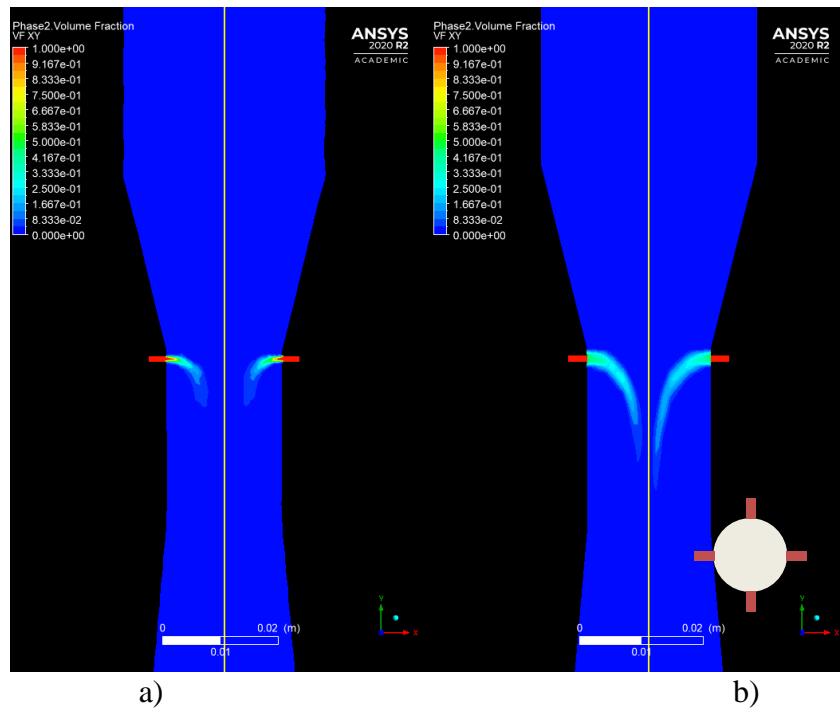
Fonte: acervo pessoal.

Figura 4.29. Gráfico de velocidade para injeção em 4 orifícios (comparação entre malhas).



Fonte: acervo pessoal.

Figura 4.30. Contorno de fração volumétrica de água para injeção em 4 orifícios (comparação entre malhas): a) Malha grosseira; b) Malha refinada.



Fonte: acervo pessoal.

Ambas as malhas, cujas características estão descritas nos Quadros 3.2 e 3.3 respectivamente, apresentaram os seguintes valores para os critérios de qualidade de assimetria (*skewness*) e ortogonalidade (*Orthogonal Quality* - OQ), apresentados na Tabela 4.1. Isso explica as diferenças tanto de valores quanto de nitidez nos contornos, visto que a malha única apresentou valores máximo e médio de *skewness* menores que os das outras (com seu valor máximo significativamente inferior) e OQ próximos a 1 e muito superiores aos valores das outras malhas, sendo uma forte candidata à malha mais adequada e verossímil.

Tabela 4.1. Valores dos critérios de qualidade *Skewness* e *Orthogonal Quality* para as malhas geradas.

	1 orifício	2 orifícios	3 orifícios	4 orifícios	Única
<i>Skewness</i> Mínima	5,09E-04	1,16E-05	5,78E-06	3,84E-05	4,39E-03
<i>Skewness</i> Máxima	0,81647	0,79889	0,82107	0,80123	0,50315
<i>Skewness</i> Média	0,18524	0,22888	0,22878	0,22914	0,10747
OQ mínima	0,18353	0,20111	0,17893	0,19877	0,79317
OQ máxima	0,99317	0,99399	0,99744	0,99284	0,99997
OQ média	0,81359	0,7693	0,76944	0,76921	0,98824

Fonte: acervo pessoal.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que, em uma mesma malha, quanto maior a quantidade de orifícios, maior o valor inicial da pressão, e o aumento da velocidade de entrada da água resulta em pressões menores no final da garganta. Além disso, injeções por mais de um orifício possibilitam que o escoamento da mistura seja mais uniforme e se evitam desvios na direção da parede oposta à entrada de líquido. Isso é o que facilitaria no controle do escoamento e maior aproveitamento da energia proveniente do gás para atomização dos jatos de água, principalmente para velocidade de entrada da fase secundária igual a 8,5 m/s, devido à maior penetração de água, logo, maior aproximação em relação ao centro do lavador Venturi. Além disso, também considerando a qualidade da malha como um fator constante, foi possível observar que, para o modelo multifásico *Volume of Fluid*, o modelo de turbulência RNG k- ϵ apresentou boa precisão e nitidez para os contornos e perfis de pressão e de velocidade, embora o modelo SST k- ω tenha tido melhor desempenho no contorno de fração volumétrica.

No que se refere à comparação entre malhas para mesma quantidade de orifícios e mesma velocidade de entrada da água, a malha grosseira apresentou valores maiores de pressão nos comprimentos iniciais do equipamento e de velocidade nos comprimentos finais, o que indicou problemas na resolução das equações devido ao tamanho dos volumes de controle e consequente prejuízo na acurácia dos resultados. Dentre os cenários estudados, o indicado seria o de configuração operacional com 4 orifícios com água entrando a 6,5 m/s, visto que não haveria a formação de vórtices, a velocidade da mistura na entrada da garganta é a mais alta – aproveitando a energia transportada pelo gás para atomização do jato de água - constante, e a distribuição de líquido é mais uniforme que no cenário com entrada a 8,5 m/s, onde ocorre concentração de água no centro do equipamento. Por fim, a malha com os resultados considerados mais adequados foi a refinada, devido à maior nitidez nos contornos – o que contribui para o estudo da trajetória dos jatos –, e os critérios de qualidade indicaram sua maior precisão em relação ao grupo das malhas grosseiras.

Para os próximos trabalhos, algumas sugestões – acompanhadas de dados experimentais para fins de validação dos modelos – são: utilizar as combinações *Multi-Fluid VOF + RNG k- ϵ* e *Multi-Fluid VOF + SST k- ω* , aplicar a abordagem Euler-Lagrange por meio do *Discrete Phase Model*; ativação e configuração dos modelos de Filme de parede Euleriana (*Eulerian Wall Film*), acoplar as duas abordagens multifásicas através do modelo VOF-to-DPM, e gerar malhas mais refinadas utilizando licenças com capacidade máxima de número de elementos maior que 256.000.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAZE, E. et al. Current status of CFD modeling of liquid loading phenomena in gas wells: a literature review. **Journal of Petroleum Exploration and Production Technology**, 2019.
- AHMADVAND, F.; TALAIE, M. R. CFD modeling of droplet dispersion in a Venturi scrubber. **Chemical Engineering Journal**, 2010.
- AHMED, S. et al. Investigation of dust particle removal efficiency of self-priming venturi scrubber using computational fluid dynamics. **Nuclear Engineering and Technology**, 2018.
- ALI, M. et al. CFD simulation of prediction of pressure drop in venturi scrubber. **Applied Mechanics and Materials**, v. 166–169, p. 3008–3011, 2012.
- ALI, M. et al. CFD simulation of dust particle removal efficiency of a venturi scrubber in CFX. **Nuclear Engineering and Design**, 2013.
- ANANTHANARAYANAN, N. V.; VISWANATHAN, S. Effect of nozzle arrangement on Venturi scrubber performance. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 38, n. 12, p. 4889–4900, 1999.
- ANSYS INC. ANSYS Fluent Meshing User 's Guide. v. 15317, n. April, p. 724–746, 2015.
- ANSYS INC. FLUENT User's Guide 21 R1. n. January, 2021.
- AZZOPARDI, B. J. Liquid distribution in venturi scrubbers: the importance of liquid films on the channel walls. **Chemical Engineering Science**, 1993.
- BAL, M.; MEIKAP, B. C. Prediction of hydrodynamic characteristics of a venturi scrubber by using CFD simulation. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 24, p. 222–231, 2017.
- CAETANO, N. M. **Modelagem e Simulação do Escoamento em um Venturi**. 2014. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.
- CAMARINHA, A. B. **Avaliação da dispersão de líquido em um lavador Venturi utilizando CFD**. 2018. 35 f. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2018.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2018**. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2019/07/Relatório-de-Qualidade-do-Ar-2018.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2022.
- CROWDER, J. W.; NOLL, K. E.; DAVIS, W. T. Modeling of venturi scrubber efficiency. **Atmospheric Environment**, v. 16, n. 8, p. 2009–2013, 1982.

- DAHER, M. DE A. F. **Fração de filme líquido nas paredes de um lavador venturi**. 2008. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.
- DASTANE, G. G. et al. Single and multiphase CFD simulations for designing cavitating venturi. **Chemical Engineering Research and Design**, 2019.
- DENNER, F.; VAN WACHEM, B. G. M. Compressive VOF method with skewness correction to capture sharp interfaces on arbitrary meshes. **Journal of Computational Physics**, 2014.
- DURST, F.; MILOJEVIC, D.; SCHOENUNG, B. Eulerian and Lagrangian predictions of particulate two-phase flows. **Applied Mathematical Modelling**, v. 8, p. 101–115, 1984.
- GONÇALVES, J. A. S. et al. Evaluation of the models available for the prediction of pressure drop in venturi scrubbers. **Journal of Hazardous Materials**, v. 81, n. 1–2, p. 123–140, 2001.
- GONÇALVES, J. A. S. et al. Atomization of liquids in a Pease-Anthony Venturi scrubber: Part I. Jet dynamics. **Journal of Hazardous Materials**, 2003.
- GONÇALVES, J. A. S. et al. Atomization of liquids in a Pease-Anthony Venturi scrubber: Part II. Droplet dispersion. **Journal of Hazardous Materials**, 2004.
- GUERRA, A. P. **Fração de Filme em Lavadores Venturi**. 2010. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.
- GUERRA, V. G. **Investigação do efeito de injeção de líquido por orifícios múltiplos na formação de gotas em um lavador venturi**. 2009. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
- GUERRA, V. G. et al. Pressure drop and liquid distribution in a venturi scrubber: Experimental data and CFD simulation. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 51, n. 23, p. 8049–8060, 2012.
- GUERRERO, E.; MUÑOZ, F.; RATKOVICH, N. Comparison between Eulerian and VOF models for two-phase flow assessment in vertical pipes.pdf. **CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro**, v. 7, n. 1, p. 73–84, 2017.
- HAMED, M. H.; ABDEL-HAMIED, A. A. Prediction of Venturi Scrubber Performance. **ERJ. Engineering Research Journal**, v. 24, n. 3, p. 35–51, 2001.
- HUANG, J. et al. Experimental investigation on the effect of throat size on bubble transportation and breakup in small Venturi channels. **International Journal of Multiphase Flow**, 2021.
- JITSCHIN, W.; RONZHEIMER, M.; KHODABAKHSHI, S. Gas flow measurement by means of orifices and Venturi tubes. **Vacuum**, 1999.
- MANSOUR, A.; LAURIEN, E. Numerical error analysis for three-dimensional CFD

simulations in the two-room model containment THAI+: Grid convergence index, wall treatment error and scalability tests. **Nuclear Engineering and Design**, 2018.

MARINI, L. M.; GUERRA, V. G.; BÉTTEGA, R. **Avaliação Da Dispersão De Líquido Em Um Lavador Venturi Utilizando CFD E Balanço Populacional**. Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. **Anais...**Uberlândia: 2019

MARTINS COSTA, M. A. et al. Performance of a Venturi scrubber in the removal of fine powder from a confined gas stream. **Materials Research**, v. 8, n. 2, p. 177–179, 2005.

MEILI, L. et al. Effects of operational variables on the performance of venturi scrubbers with circular section. **Materials Science Forum**, 2006.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Guia Técnico para o Monitoramento e Avaliação da Qualidade do Ar**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/ar-puro/GuiaTecnicoParaQualidadedoAr.pdf>>.

MOHEBBI, A. et al. Prediction of pressure drop in an orifice scrubber based on a Lagrangian approach. **Journal of the Air and Waste Management Association**, 2002.

PÁDUA, T. F. DE. **Simulação de um alimentador Venturi em trecho ascendente no transporte pneumático de sólidos**. 2012. 143 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

PAK, S. I.; CHANG, K. S. Performance estimation of a Venturi scrubber using a computational model for capturing dust particles with liquid spray.pdf. **Journal of Hazardous Materials**, p. 560–573, 2006.

PUENTES, N. A. G. et al. DROPLET DISPERSION ANGLE MEASUREMENTS (2012).pdf. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 29, n. 1, p. 99–106, 2012.

RIBEIRO, A. P. R. A. **Estudo da eficiência de coleta de material particulado em um lavador Venturi com injeção de líquido por multi-orifícios**. 2005. 93 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

SAFDAR, I. et al. **Numerical Simulation of Particulate Removal Efficiency in Venturi Scrubber**. Proceedings - 2017 13th International Conference on Emerging Technologies, ICET2017. **Anais...**2018

SHI, H. et al. Experimental and numerical study of cavitation flows in venturi tubes: From CFD to an empirical model. **Chemical Engineering Science**, v. 207, p. 672–687, 2019.

VARGAFTIK, N. B.; VOLKOV, B. N.; VOLJAK, L. D. International Tables of the Surface Tension of Water. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**. Moscou: 1983.

VISWANATHAN, S.; GNYP, A. W.; PIERRE, C. C. S. Examination of Gas-Liquid Flow in a Venturi Scrubber. **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, 1984.

WANG, L. K.; PEREIRA, N. C.; HUNG, Y.-T. Wet and Dry Scrubbing. In: WANG, L. K.; PEREIRA, N. C.; HUNG, Y.-T. (Eds.). **Air Pollution Control Engineering**. 1. ed. Totowa, New Jersey: Humana Press, 2004, cap. 5, p. 197- 305.

WU, H. et al. Prediction of pressure drop in Venturi based on drift-flux model and boundary layer theory. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 71, n. August 2019, p. 101673, 2020.

YUNG, S. C. et al. Venturi Scrubber Performance Model. **Environmental Science and Technology**, v. 12, n. 4, p. 456–459, 1978.

YUSOF, S. N. A. et al. A short review on rans turbulence models. **CFD Letters**, v. 12, n. 11, p. 83–96, 2020.

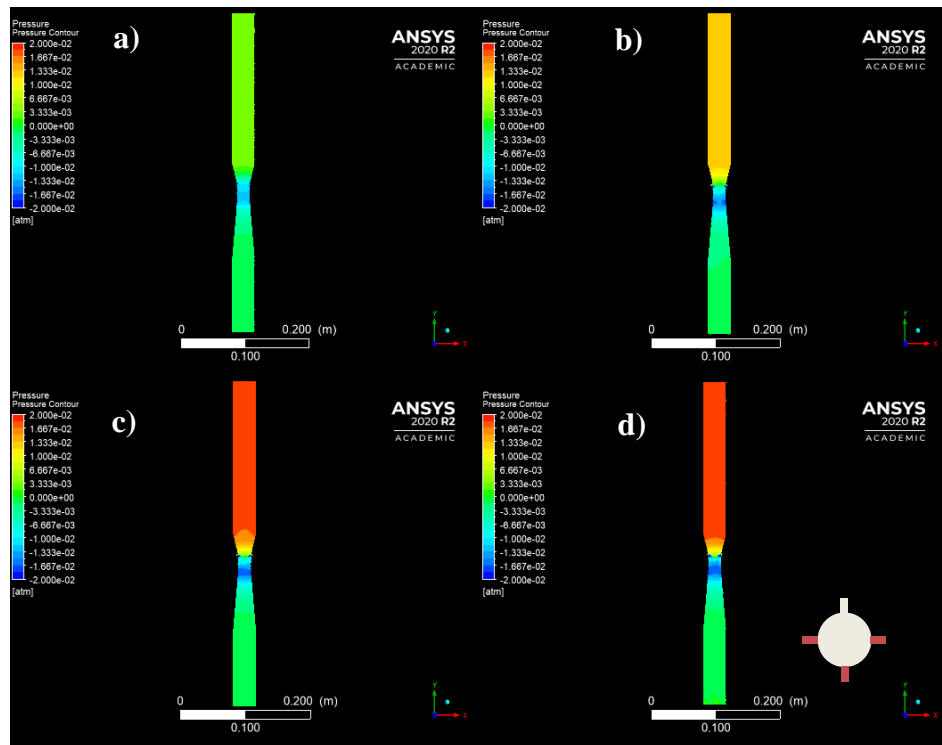
APÊNDICE A - Malha grosseira: Resultados gerados para 3 e 4 orifícios.

Resultados e discussões de contornos de pressão, velocidade e fração volumétrica e perfis de pressão e de velocidade para 3 e 4 orifícios, todos para a malha grosseira.

A.1 3 ORIFÍCIOS

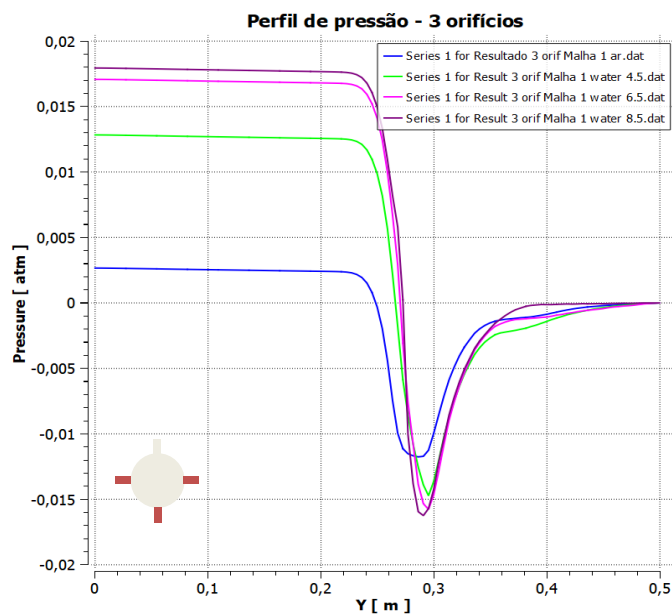
No contorno de pressão da Figura A.1, é possível verificar que a faixa de pressão no final da garganta aumenta conforme cresce a velocidade de água e, para esse caso, as pressões na entrada para os cenários com velocidades 6,5 e 8,5 apresentaram valores muito próximo entre si, ao passo que, assim como nos casos anteriores, o escoamento monofásico teve queda de pressão quase nula, como fica mais evidenciado pelas curvas na Figura A.2.

Figura A.1: Contorno de pressão para injeção por 3 orifícios (malha grosseira):
a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.



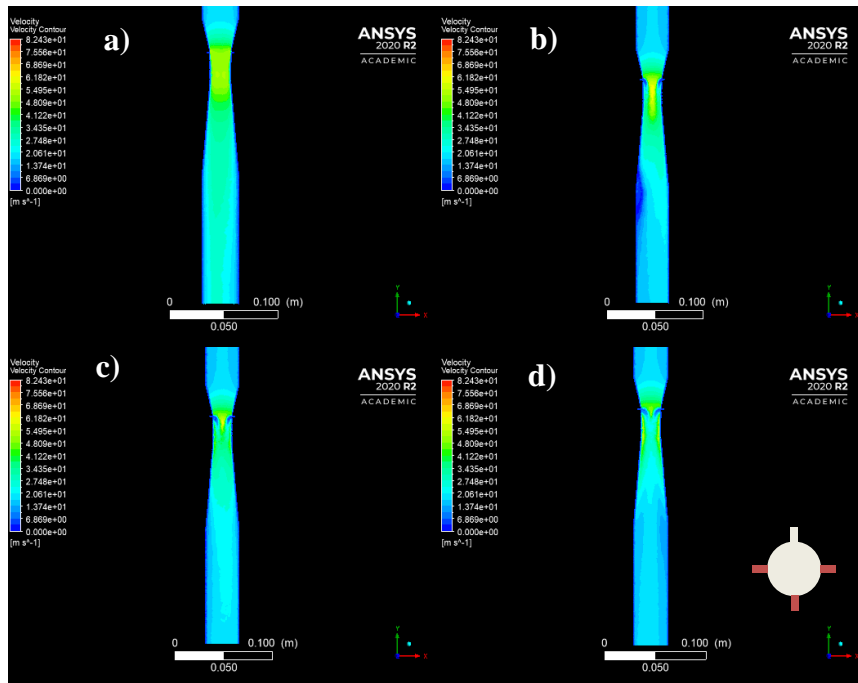
Fonte: acervo pessoal.

Figura A.2. Gráfico de pressão para injeção por 3 orifícios (malha grosseira).



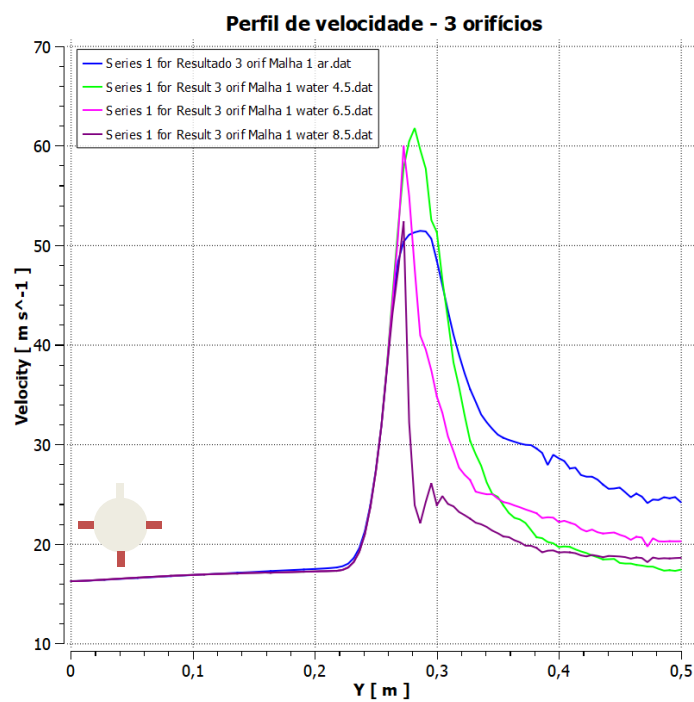
Considerando o contorno na Figura A.3 e o Gráfico de velocidade da Figura A.4, a entrada dos jatos de água resultou no afinilamento do escoamento de gás, assim como nos outros casos, porém, a velocidade da mistura de 50 m/s é atingida em todos os cenários de entrada de água, com a maior intensidade para a menor velocidade de entrada de água, e o valor sendo reduzido conforme é aumentada a velocidade do líquido.

Figura A.3. Contorno de velocidade para injeção por 3 orifícios (malha grosseira): a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.



Fonte: acervo pessoal.

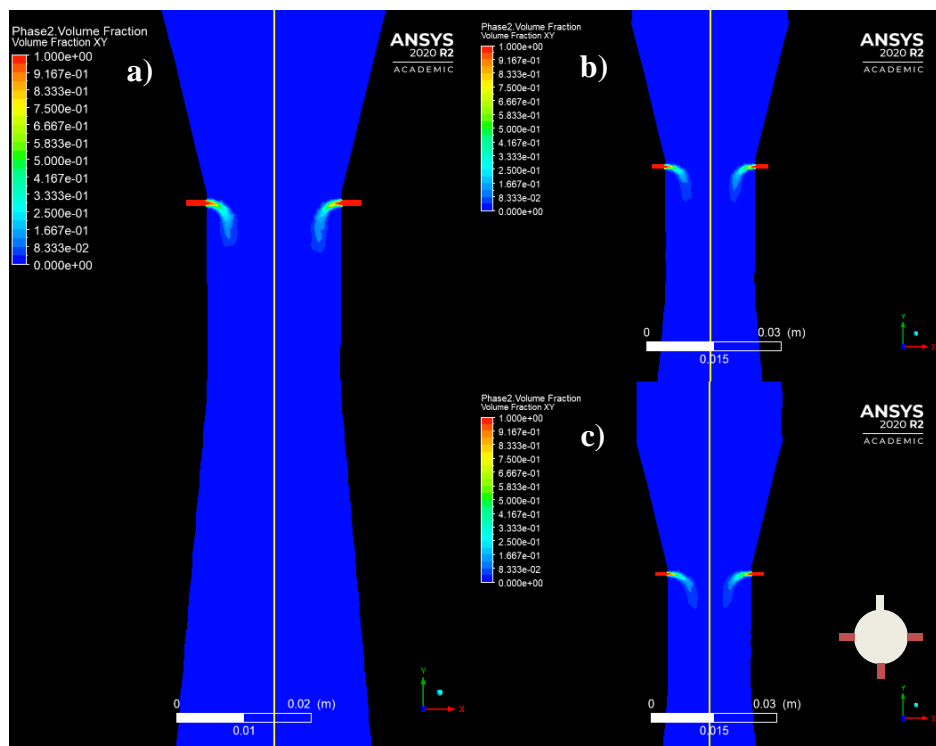
Figura A.4. Gráfico de velocidade para escoamento de água por 3 orifícios (malha grosseira).



Fonte: acervo pessoal.

No contorno da fração volumétrica de água na Figura A.5, embora sejam representadas as distâncias de penetração dos jatos, a diferença entre os jatos a 6,5 e 8,5 m/s é pouco perceptível.

Figura A.5. Contorno de fração volumétrica da água para injeção por 3 orifícios (malha grosseira). Destaque à esquerda: velocidade da água de 4,5 m/s; Canto superior direito: velocidade da água de 6,5 m/s; Canto inferior esquerdo: velocidade da água de 8,5 m/s.

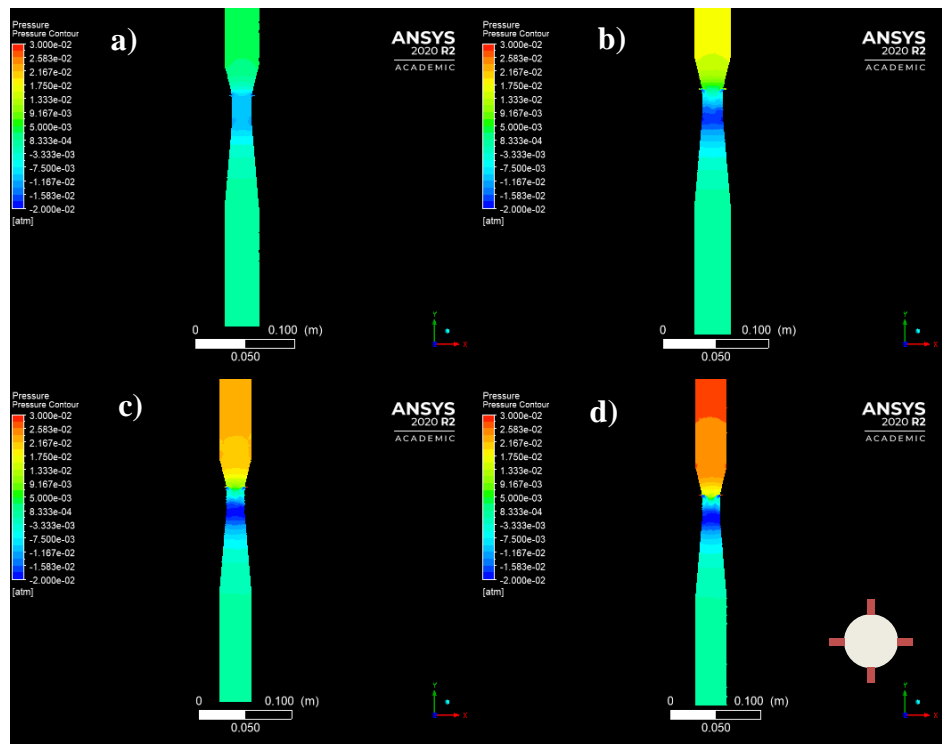


Fonte: acervo pessoal.

A.2. 4 ORIFÍCIOS

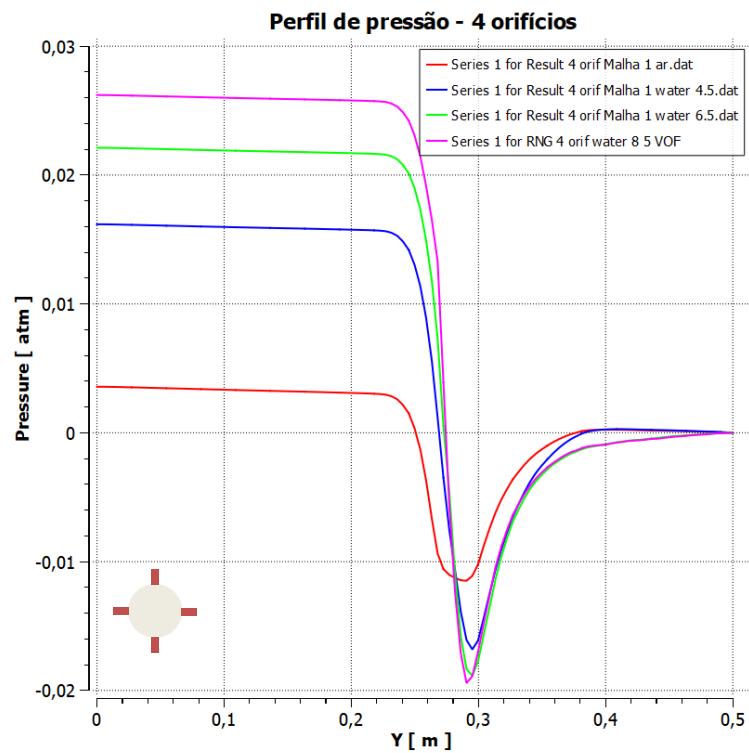
O último dos casos da malha grosseira, assim como nas simulações anteriores, apresentou maior queda de pressão para velocidade de entrada de água a 8,5 m/s, no entanto, em comparação com o cenário da injeção por 3 orifícios, a mudança de tom no contorno de pressão da Figura A.6 ocorreu a uma distância maior da garganta e, pelo perfil da Figura A.7, o valor máximo de pressão foi o maior em relação aos cenários anteriores; é possível verificar pela mesma figura o maior distanciamento entre os casos das velocidades de 6,5 m/s.

**Figura A.6. Contorno de pressão para injeção por 4 orifícios (malha grosseira).
Em sentido horário: a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c)
velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.**



Fonte: acervo pessoal.

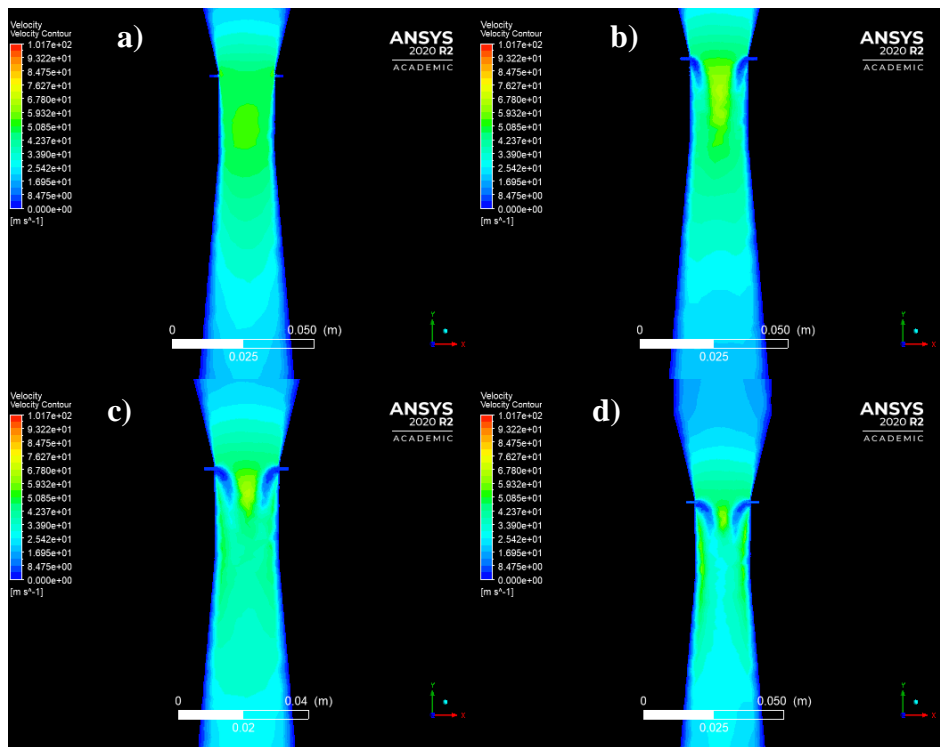
Figura A.7. Gráfico de pressão para injeção por 4 orifícios (malha grosseira).



Fonte: acervo pessoal.

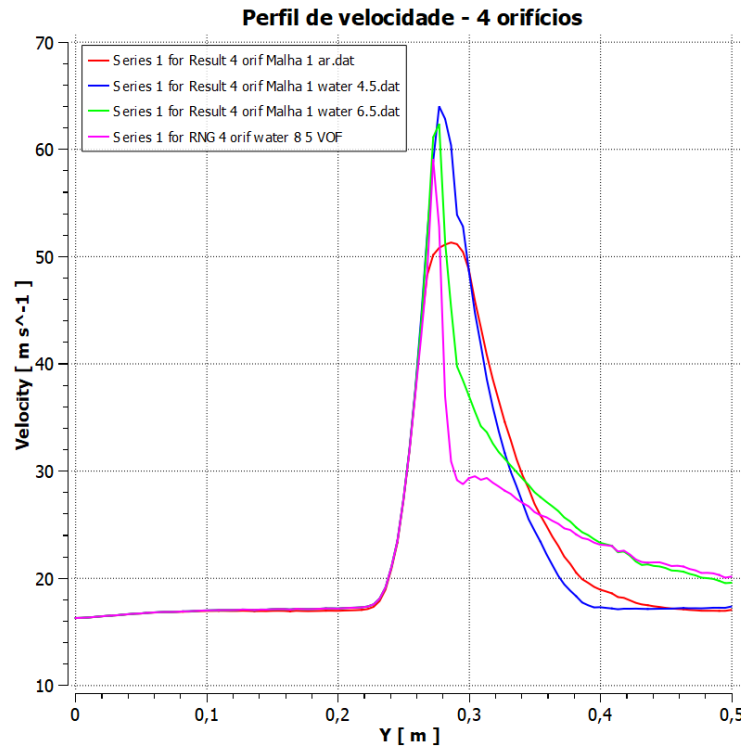
Quanto à velocidade da mistura, novamente ocorre a formação de uma área de maior intensidade no mesmo plano horizontal das injeções, como explicitado no contorno da Figura A.8. Entretanto, nos casos de maiores velocidades de entrada de água, logo abaixo já começa a redução da velocidade, sendo que, para a entrada de líquido a 8,5 m/s, a grandeza tem sua intensidade diminuída em grau relativamente drástico ao passar de um tom esverdeado para o azul claro em uma distância muito curta. Esses fenômenos ficam ainda mais evidentes pelo perfil da Figura A.9, com a presença de picos na área relativa à injeção de água e a redução brusca de velocidade – em adição a isso, para a injeção por 4 orifícios, todas as simulações apresentaram velocidades máximas da mistura acima de 50 m/s.

Figura A.8. Contorno de velocidade para injeção por 4 orifícios (malha grosseira). No sentido horário: a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.



Fonte: acervo pessoal.

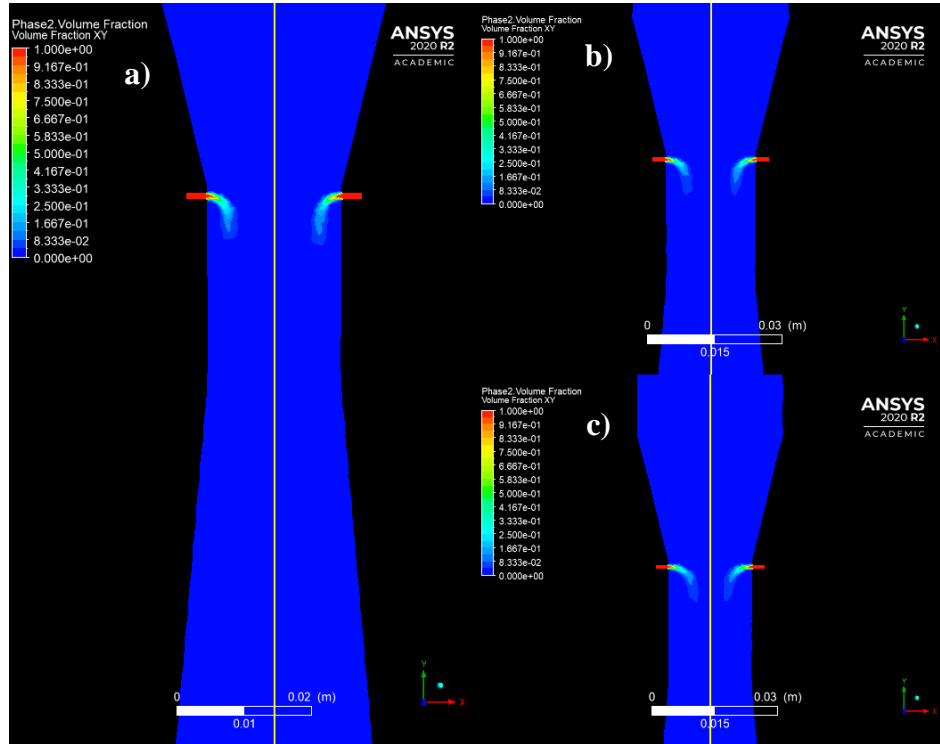
Figura A.9. Gráfico de velocidade para escoamento de água por 4 orifícios (malha grosseira).



Fonte: acervo pessoal.

Mesmo nesta simulação, não ficou clara a distinção visual na Figura A.10 entre as distâncias de penetração dos jatos para as frações volumétricas de água para entrada de líquido a 6,5 e a 8,5 m/s – o que é esperado, devido à menor qualidade da malha.

Figura A.10. Contorno de fração volumétrica de água (malha grosseira).
Destaque à esquerda: velocidade da água de 4,5 m/s; Canto superior direito:
velocidade da água de 6,5 m/s; Canto inferior esquerdo: velocidade da água de 8,5
m/s.



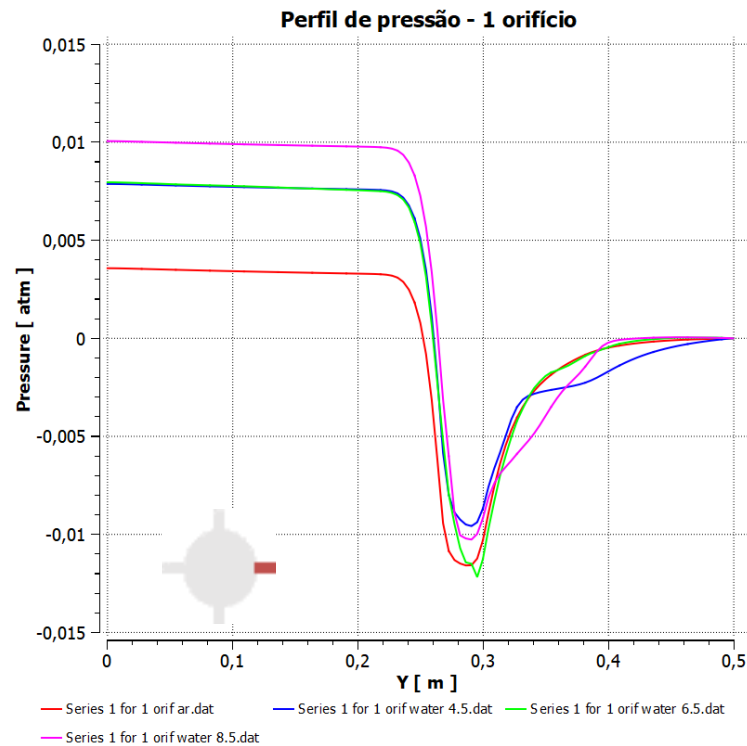
Fonte: acervo pessoal.

APÊNDICE B – Malha refinada: perfis (1 e 2 orifícios) e todos os resultados gerados para 3 e 4 orifícios.

Resultados de perfis de pressão e de velocidade para 1 e 2 orifícios e resultados e discussões de contornos de pressão, velocidade e fração volumétrica e perfis de pressão e de velocidade para 3 e 4 orifícios, todos para a malha refinada.

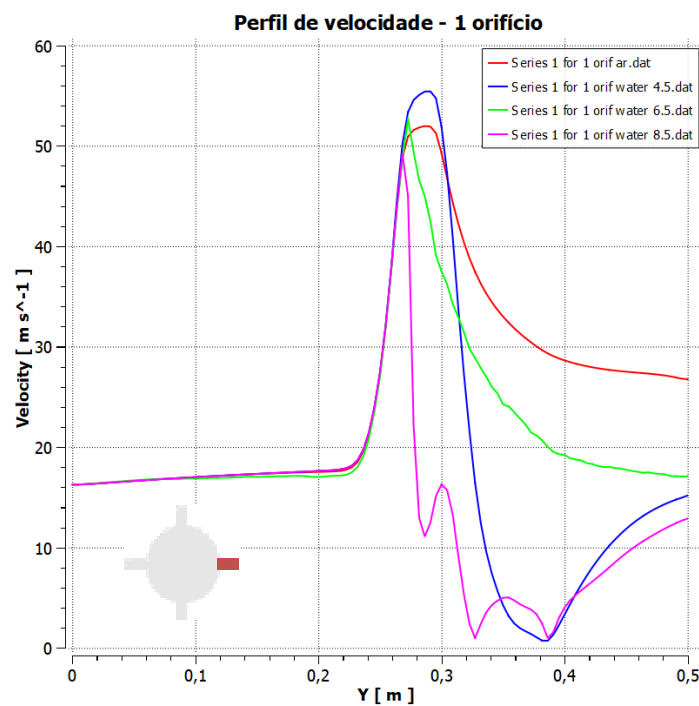
B.1. 1 ORIFÍCIOS

Figura B.1. Gráfico de pressão para injeção por 1 orifício (malha refinada).



Fonte: acervo pessoal.

Figura B.2. Gráfico de velocidade para escoamento de água por 1 orifício (malha refinada).



Fonte: acervo pessoal.

B.2. 2 ORIFÍCIOS

Figura B.3. Gráfico de pressão para injeção por 2 orifícios (malha refinada).

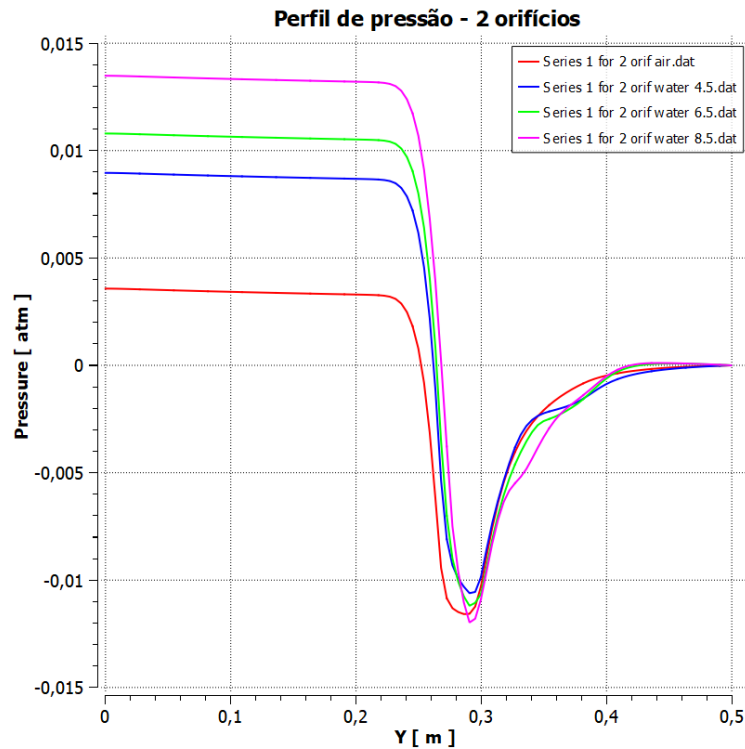
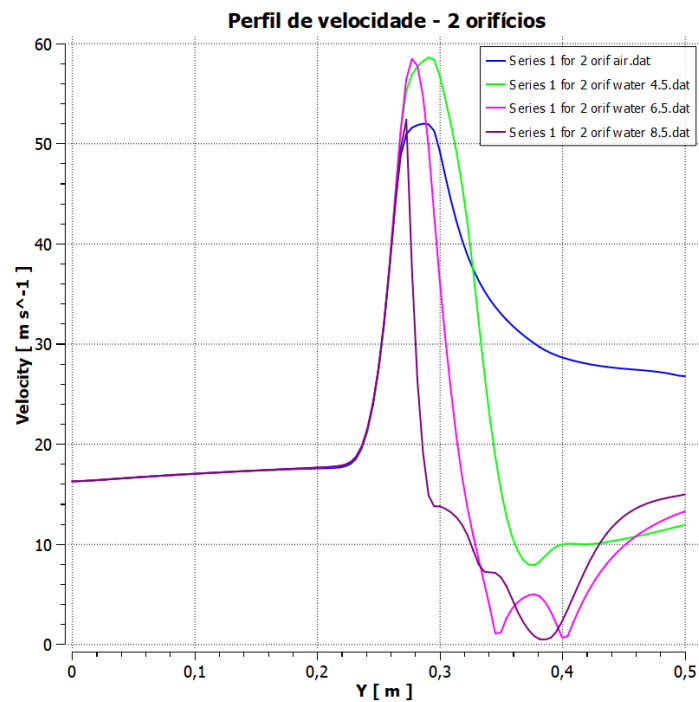


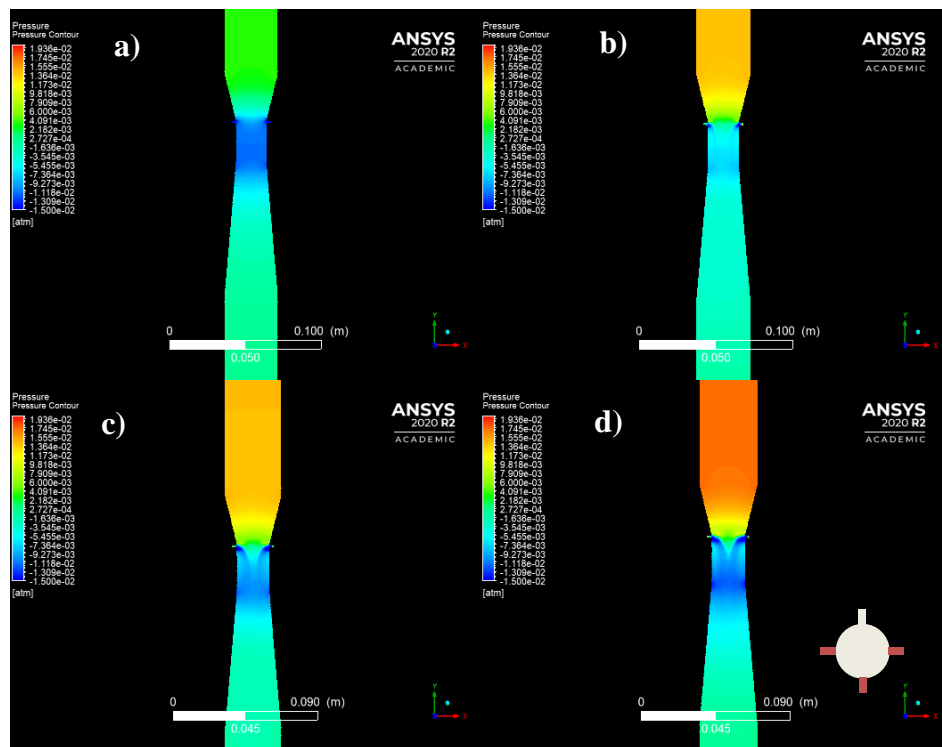
Figura B.4. Gráfico de velocidade para escoamento de água por 2 orifícios (malha refinada).



B.3. 3 ORIFÍCIOS

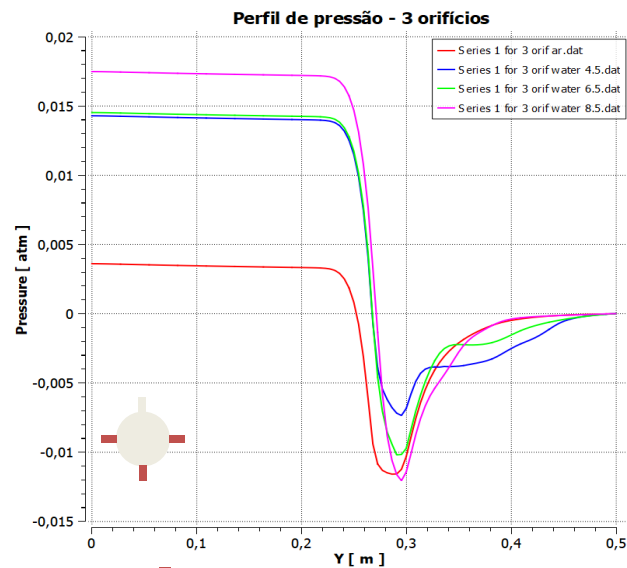
Assim como nas outras configurações, o cenário com maior velocidade de entrada da água apresenta a maior queda de pressão e a redução mais brusca na garganta, com valor mínimo pouco menor que o mínimo do escoamento somente com ar – como verificado nas Figuras B.5 e B.6, podendo ser vista a pressão associada à injeção de líquido no contorno - e, tal qual no caso com apenas um jato de água, os valores de pressão para as velocidades de 4,5 e 6,5 m/s para a fase secundária foram quase coincidentes. Isso pode ter ocorrido devido à menor interação entre as correntes de água que adentram o lavador Venturi, o que não acontece para a velocidade de líquido de 8,5 m/s devido à maior penetração de água.

Figura B.5. Contorno de pressão para injeção por 3 orifícios (malha refinada). Em sentido horário: a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.



Fonte: acervo pessoal.

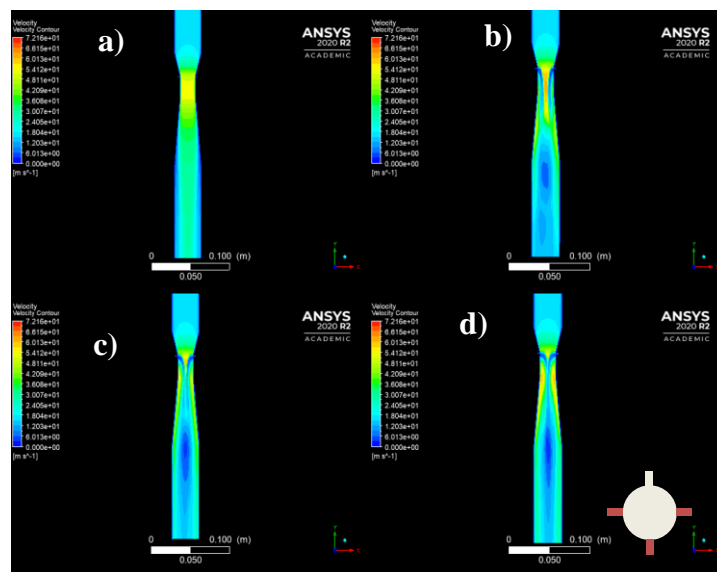
Figura B.6. Gráfico de pressão para injeção por 3 orifícios (malha refinada).



Fonte: acervo pessoal.

O contorno da velocidade da mistura apresenta comportamento semelhante à obtida na injeção por 2 orifícios, como apresentado na Figura B.7, ao direcionar o fluxo do ar para o centro do equipamento, porém, com uma área menor na qual essa grandeza é menor que os valores do cenário anterior – e isso em contraste com o contorno por 1 orifício, no qual ocorre o desvio da corrente e maior intensidade na área da parede.

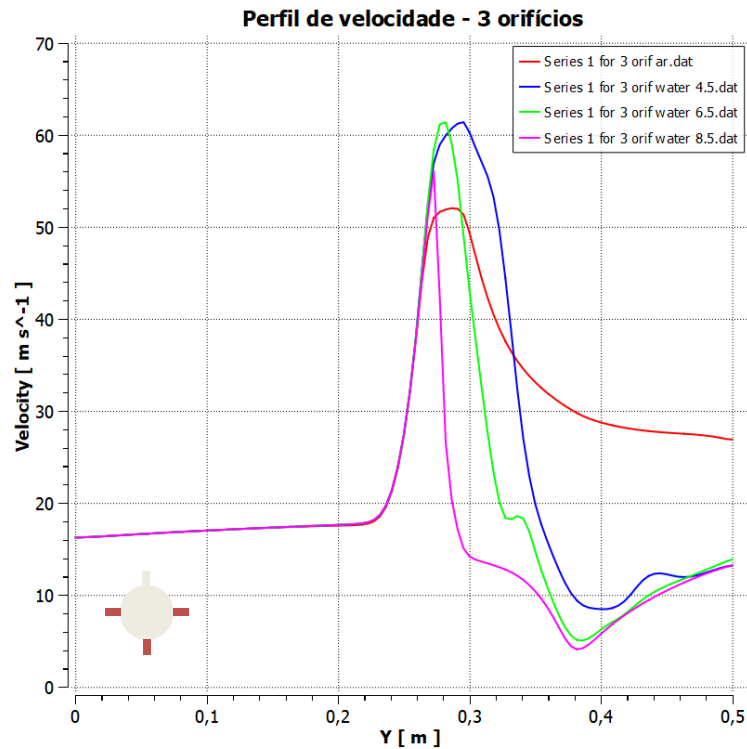
Figura B.7. Contorno de velocidade para injeção por 3 orifícios (malha refinada). No sentido horário: a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.



Fonte: acervo pessoal.

Outra diferença no gráfico de velocidade em relação à simulação com apenas 1 orifício é que a velocidade de 50 m/s para o ar na entrada da garganta é atingida também na área central do lavador Venturi – como pode ser verificado na Figura B.8 -, porém, o valor máximo não é tão grande como no primeiro cenário.

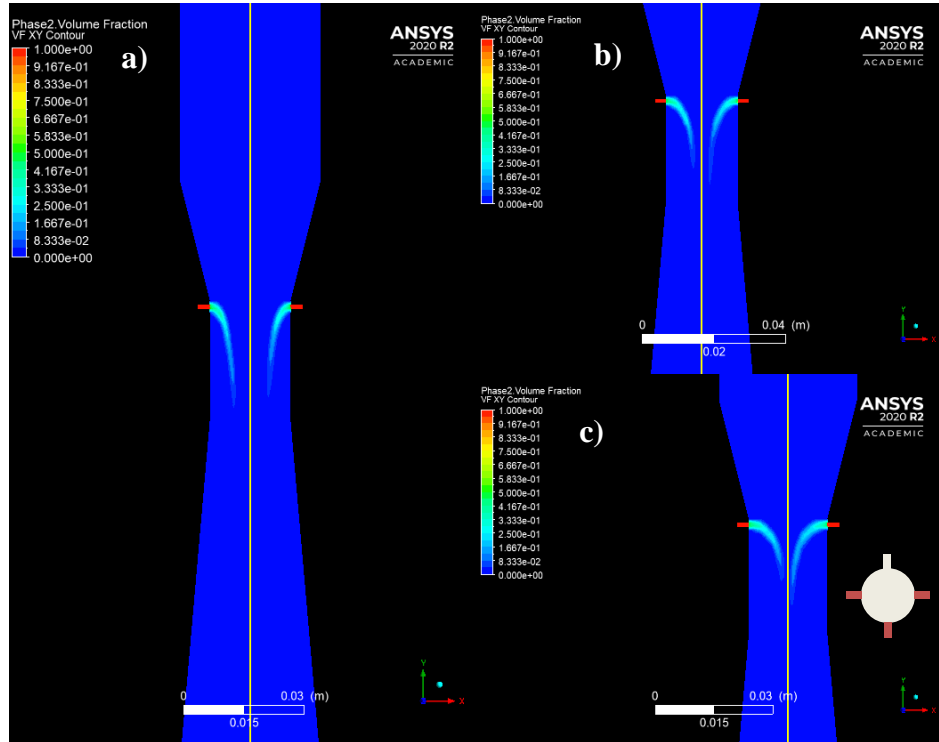
Figura B.8. Gráfico de velocidade para escoamento de água por 3 orifícios (malha refinada).



Fonte: acervo pessoal.

A Figura B.9, por sua vez, permite a melhor averiguação da distância entre os dois jatos de líquido e o consequente direcionamento do escoamento de ar ao longo do lavador Venturi. É possível observar a canalização do fluxo na área da garganta com maior clareza, sendo que o diâmetro desse “cilindro” formado é reduzido conforme é aumentada a velocidade de entrada da água.

Figura B.9. Contorno da fração volumétrica de água para injeção por 3 orifícios (malha refinada). Destaque à esquerda: velocidade da água de 4,5 m/s; Canto superior direito: velocidade da água de 6,5 m/s; Canto inferior esquerdo: velocidade da água de 8,5 m/s.

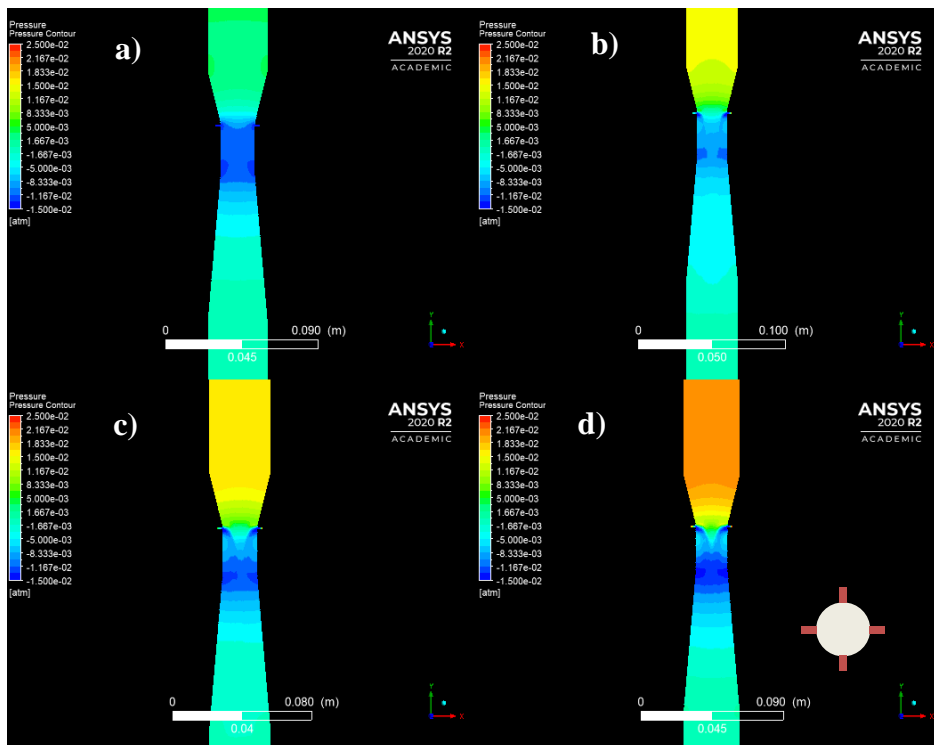


Fonte: acervo pessoal.

B.4. 4 ORIFÍCIOS

Para a última configuração de orifícios, é possível verificar pela Figura B.10 que a maior queda de pressão global e o menor valor mínimo dessa variável no centro do equipamento, novamente, estão associados à maior velocidade de entrada de água, visto que, pouco acima da área de transição entre a garganta e o difusor, é formada uma faixa uniforme de baixa pressão, enquanto que, nas velocidades menores, as menores intensidades de pressão estão presentes mais perto das paredes.

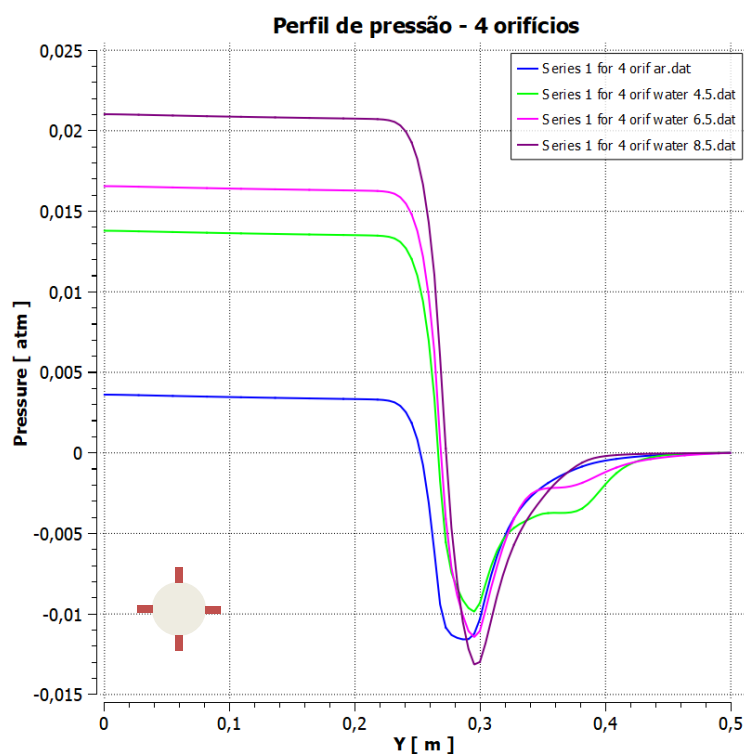
Figura B.10. Contorno de pressão para injeção por 4 orifícios (malha refinada). Em sentido horário: a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.



Fonte: acervo pessoal.

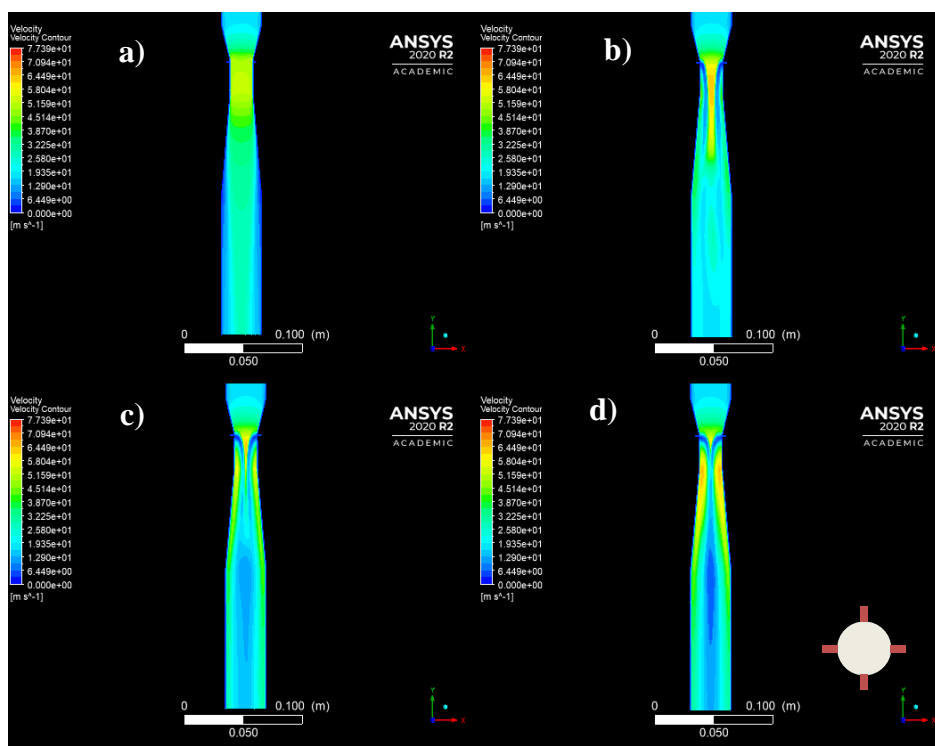
Um efeito relacionado à pressão que pode ser observado em relação à quantidade de orifícios é o progressivo aumento do valor máximo de pressão em progressão ao aumento do número de injeções, demonstrado na Figura B.11 em comparação aos perfis de pressão anteriores, considerando também os limites do eixo Y desses gráficos. Esse resultado ocorreu para que a redução de pressão pudesse ser calculada, já que a condição de contorno da pressão na saída do equipamento foi fixada em zero e a velocidade da mistura é aumentada. É possível verificar isso tanto pela ordem crescente entre os valores máximos de pressão na entrada quanto na ordem decrescente dos valores mínimos, sendo que o escoamento somente com o ar apresentou uma redução muito pequena em comparação com os outros cenários.

Figura B.11. Gráfico de pressão para injeção por 4 orifícios (malha refinada).



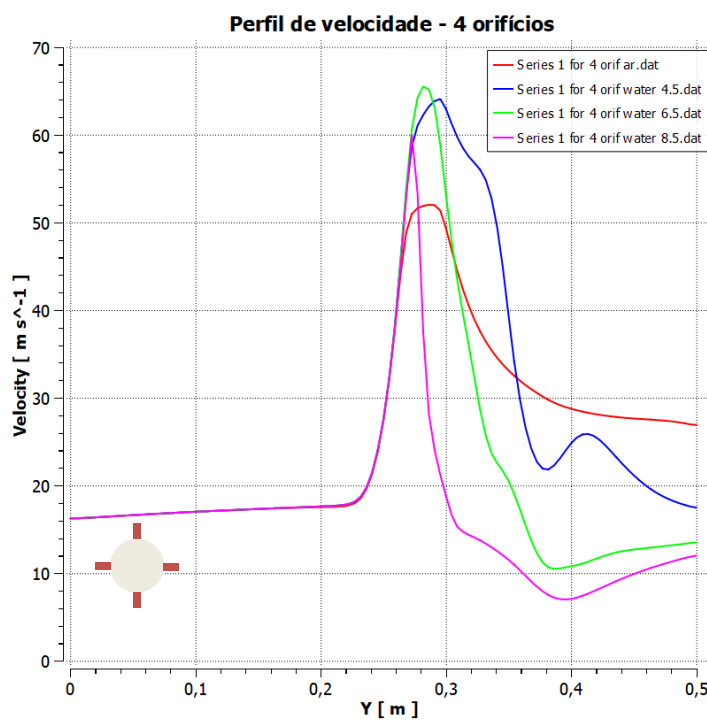
Em relação à velocidade, a Figura B.12 representa o afinamento do escoamento e isso, como descrito no perfil da Figura B.13, apresentou velocidade da mistura no centro do lavador com o maior valor quando realizada comparação com as configurações de orifício anteriores, assim como a formação de uma área de menor velocidade a partir do final do difusor. Além disso, o breve aumento da velocidade da mistura no caso da menor velocidade de entrada de água no perfil da Figura B.13 explica a breve oscilação presente no Gráfico de pressão relacionada à velocidade de 4,5 m/s do líquido.

Figura B.12. Contorno de velocidade para injeção por 4 orifícios (malha refinada).
 No sentido horário: a) escoamento somente de ar; b) velocidade de água a 4,5 m/s; c) velocidade de água a 6,5 m/s; d) velocidade de água a 8,5 m/s.



Fonte: acervo pessoal.

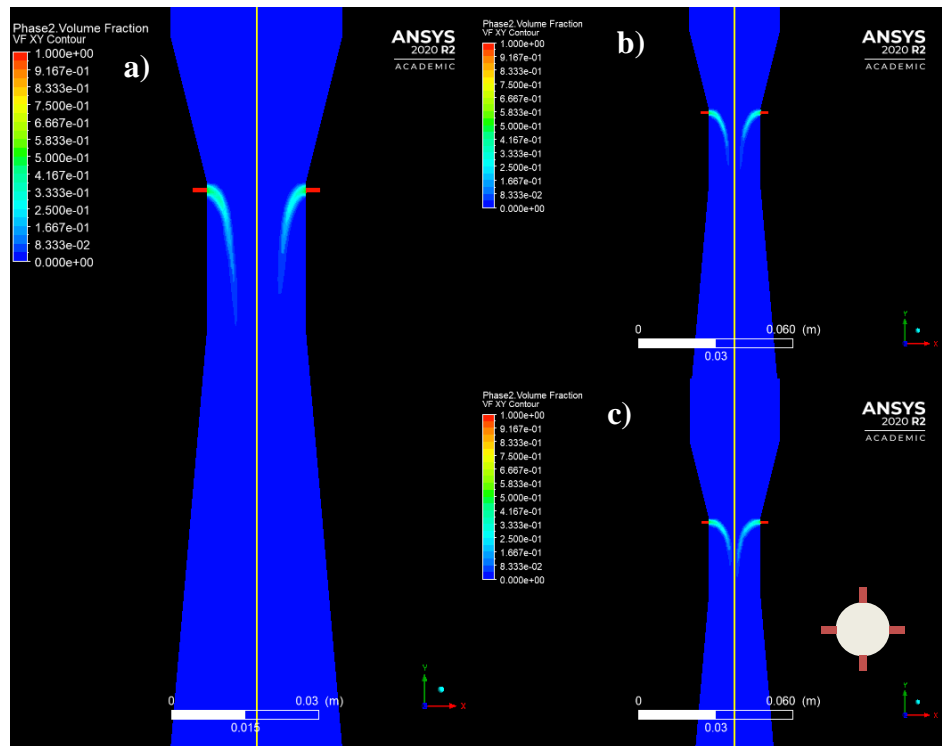
Figura B.13. Gráfico de velocidade para escoamento de água por 4 orifícios (malha refinada).



Fonte: acervo pessoal.

Os perfis das penetrações dos jatos estão destacadas na Figura B.14, na qual pode ser verificada a proximidade dos jorros entre si e em relação ao centro do lavador Venturi.

Figura B.14. Contorno de fração volumétrica da água por 4 orifícios (malha refinada). Destaque à esquerda: velocidade da água de 4,5 m/s; Canto superior direito: velocidade da água de 6,5 m/s; Canto inferior esquerdo: velocidade da água de 8,5 m/s.



Fonte: acervo pessoal.