



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

JORDAN AMARO GUTIERREZ

Modelo de escoamento núcleo-anular frio para o atomizador efervescente

Guaratinguetá
2022

Jordan Amaro Gutierrez

Modelo de escoamento núcleo-anular frio para o atomizador efervescente

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica em área de Energia.

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior

Coorientadora: Prof. Dra. Leila Ribeiro dos Santos

Coorientador: Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos

Guaratinguetá
2022

G984m Gutierrez, Jordan Amaro
Modelo de escoamento núcleo-anular frio para o
atomizador efervescente / Jordan Amaro Gutierrez -
Guaratinguetá, 2023.
112 f : il.
Bibliografia: f. 101-112

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023.

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Leila Ribeiro dos Santos
Coorientador: Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu
Zevallos

1. Mecânica dos fluidos. 2. Atomização. 3. Escoamento
bifásico. I. Título.

CDU 532(043)

IMPACTO DESTA PESQUISA NA SOCIEDADE

A atomização é um processo físico importante para diversos contextos na indústria, sendo o setor transporte um dos setores onde é mais utilizada. No setor transporte, a atomização é realizada para combustão de combustíveis líquidos. O objetivo da presente pesquisa consiste em estimar um conjunto de variáveis medidas no orifício de saída de um atomizador efervescente. Depois de estimar esse conjunto de variáveis é possível realizar melhores previsões de parâmetros característicos do spray os quais são muito importantes tais como o diâmetro médio de gotas, ângulo de spray, penetração, entre outros. Essas previsões ajudaram para melhorar o projeto dos equipamentos de combustão reduzindo seus volumes e custos de material de fabricação. Por esta razão, a presente pesquisa tem um impacto na sociedade.

IMPACT OF THIS RESEARCH ON SOCIETY

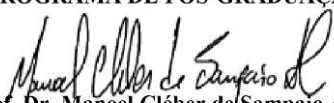
Atomization is an important physical process for several contexts in industry, with the transport sector being one of the sectors where it is most used. In the transport sector, atomization is carried out for the combustion of liquid fuels. The aim of this research is to estimate a set of variables measured at the outlet of an effervescent atomizer. After estimating this set of variables, it is possible to make better predictions of characteristic parameters of the spray, which are very important, such as the average droplet diameter, spray angle, penetration, among others. These predictions helped to improve the design of combustion equipment by reducing their volumes and manufacturing material costs. For this reason, the present research has an impact on society.

JORDAN AMARO GUTIERREZ

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: DOUTORADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Documento assinado digitalmente
JOAO ANDRADE DE CARVALHO JUNIOR
Data: 13/03/2023 17:18:02-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JÚNIOR
Orientador - UNESP

participou por videoconferência

ALEX MENDONÇA
BIMBATO:9510887
4120

Assinado de forma digital por
ALEX MENDONÇA
BIMBATO:95108874120
Dados: 2023.03.14 07:34:56
-03'00'

Prof. Dr. ALEX MENDONÇA BIMBATO
UNESP

participou por videoconferência



Assinado de forma digital por Jose
Alexandre Matelli:16726602898
Dados: 2023.03.13 17:25:49 -03'00'

Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI
UNESP

participou por videoconferência



Documento assinado digitalmente
CHRISTIAN JEREMI CORONADO RODRIGUEZ
Data: 14/03/2023 18:40:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. CHRISTIAN JEREMI RODRIGUEZ CORONADO
UNIFEI

participou por videoconferência



Prof. Dr. PEDRO TEIXEIRA LACAVA
ITA

participou por videoconferência

AGOSTO de 2022

DADOS CURRICULARES

JORDAN AMARO GUTIERREZ

NASCIMENTO	14.03.1993 – Trujillo / La Libertad – Perú
FILIAÇÃO	Rosario Amaro Mamani Florcelita Gutiérrez Florian
2010/2014	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica Universidad Nacional de Trujillo, Perú
2016/2018	Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica Mestrado na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
2018/2022	Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica Doutorado na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Dedico este trabalho a todas as pessoas que em algum determinado momento da minha vida tenham me ajudado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus de permitir-me realizar, até agora, a maior satisfação que encontrei na minha vida, que é o estudar.

Ao professor Dr. João Andrade de Carvalho Junior pelo apoio constante para culminar o desenvolvimento da minha pesquisa, e por ser uma ótima pessoa comigo.

À professora Dr. Leila Ribeiro dos Santos pelo apoio para desenvolver minha pesquisa e sua disponibilidade constante para me ajudar.

Ao professor Dr. Andrés Mendiburu Zevallos pelas frutíferas conversações mantidas.

Ao professor Dr. José Olivencia Quiñones pelas longas conversações mantidas durante muitos anos as quais convergiram em ajudar-me em desfrutar do maravilhoso universo que é a ciência.

Ao professor MSc. Guillermo Quevedo Novoa por ajudar-me em desfrutar da ciência e poder realizar uma das minhas metas acadêmicas que foi de realizar meu mestrado.

A meus pais por terem me ajudado em minha formação como ser humano e a ensinar-me a lutar por meus sonhos.

A meus irmãos e amigos pela compreensão e as palavras de alento para continuar com meus sonhos.

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de doutorado (134366/2015-8).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 134366/2015-8.

“Penso 99 vezes e nada descubro. Deixo de pensar, mergulho no silêncio e a verdade me é revelada”

Albert Einstein

RESUMO

A atomização é um processo fundamental para muitas aplicações na engenharia, por exemplo, a combustão de combustíveis líquidos. A atomização efervescente é um processo de atomização bifásica que consiste em utilizar baixas pressões de injeção dos fluidos para introduzir bolhas de gás no escoamento líquido, e assim produzir um spray de alta qualidade. Este trabalho consiste em desenvolver um modelo de escoamento bifásico para estimar um conjunto de variáveis físicas dos fluidos no orifício de saída de um atomizador efervescente. O modelo de escoamento núcleo-anular frio é validado utilizando-se resultados experimentais da espessura média dos ligamentos da atomização, obtendo-se excelentes estimativas para a razão das vazões mássicas do gás e do líquido maior ou igual a 1,0%. Os fluidos utilizados para as validações são a água e o ar. O modelo de escoamento núcleo-anular frio é utilizado para simular cinco condições operacionais em dezessete atomizadores efervescentes. Os fluidos utilizados para as simulações são o óleo leve de aquecimento e o ar. Segundo os resultados obtidos, as variáveis geométricas que definem o projeto do atomizador efervescente não influenciam significativamente as variáveis físicas estimadas. As variáveis físicas estimadas são: (a) fração volumétrica do gás, (b) pressão bifásica adimensional, (c) temperatura adimensional do gás, (d) massa específica bifásica adimensional, (e) velocidade do líquido, (f) velocidade do gás, e (g) espessura do líquido, sendo suas faixas [0,815, 0,967], [0,587, 0,856], [0,928, 0,962], [0,642, 0,900], [7,991, 22,391 m/s], [147,166, 200,555 m/s], e [176, 637 μm], respectivamente. Finalmente, é estabelecido um modelo adimensional para a estimativa do diâmetro médio integral de Sauter (ID_{32}) das gotas do spray. O modelo adimensional é caracterizado por ter $R^2 = 0,705$ e $RMSE = 3,274$, razão pela qual é considerado que é bom para realizar futuras previsões.

PALAVRAS-CHAVE: mecânica dos fluidos; método de volume de controle; atomização efervescente; spray; modelo.

ABSTRACT

Atomization is a fundamental process for many engineering applications, for example, the combustion of liquid fuels. Effervescent atomization is a two-phase atomization process that uses low fluid injection pressures to introduce bubbles into the liquid flow, and thus produce a high-quality spray. This work consists in the development of a two-phase flow model to estimate a set of physical variables of the fluids in the exit orifice of the effervescent atomizer. The frozen core-annular flow model is validated through experimental results of the mean thickness of the atomization ligaments, obtaining excellent estimates for the gas-liquid-to-mass ratio greater or equal than 1.0%. The fluids used for validations are water and air. The frozen core-annular flow model is used to simulate five operating conditions in seventeen effervescent atomizers. The fluids used for simulations are light heating oil and air. According to the results obtained, the geometric variables that define the effervescent atomizer design do not significantly influence the estimated physical variables. The estimated physical variables are: (a) gas volume fraction, (b) dimensionless two-phase pressure, (c) dimensionless gas temperature, (d) dimensionless two-phase density, (e) liquid velocity, (f) gas velocity, and (g) liquid thickness, with their intervals being [0.815, 0.967], [0.587, 0.856], [0.928, 0.962], [0.642, 0.900], [7.991, 22.391 m/s], [147.166, 200.555 m/s], and [176, 637 μm], respectively. Finally, a dimensionless model is established to estimate the mean Sauter integral diameter (ID_{32}) of the spray droplets. The dimensionless model is characterized by having $R^2 = 0.705$ and $RMSE = 3.274$, so it is considered good for making future predictions.

KEYWORDS: fluid mechanics; control volume method; effervescent atomization; spray; model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de atomização	20
Figura 2 – Tipos de atomizadores efervescentes: (a) tipo A, (b) tipo B, e (c) tipo C	27
Figura 3 – Variáveis geométricas de um atomizador efervescente de tipo A	29
Figura 4 – Esquema do ângulo de cone de um <i>spray</i>	30
Figura 5 – Esquema do dispositivo para a avaliação da distribuição radial do <i>spray</i>	33
Figura 6 – Distribuição radial do <i>spray</i>	33
Figura 7 – Escoamento núcleo-anular	49
Figura 8 – Seções transversais do escoamento núcleo-anular: (a) seção transversal de entrada, (b) seção transversal intermediária, e (c) seção transversal de saída	50
Figura 9 – Volume de controle do escoamento líquido	57
Figura 10 – Volume de controle do escoamento gasoso	59
Figura 11 – Volume de controle do escoamento núcleo-anular	63
Figura 12 – Esquema da validação do modelo de escoamento núcleo-anular frio	74
Figura 13 – SMD das gotas em função da espessura média dos ligamentos	76
Figura 14 – Fração volumétrica do gás na câmara de mistura em função de GLR	82
Figura 15 – SMD em função do GLR	83
Figura 16 – Fração volumétrica do gás de saída em função do índice politrópico	84
Figura 17 – Pressão bifásica adimensional de saída em função do índice politrópico	86
Figura 18 – Temperatura adimensional do gás de saída em função do índice politrópico ..	87
Figura 19 – Massa específica bifásica adimensional de saída em função do índice politrópico	89
Figura 20 – Velocidade do líquido de saída em função do índice politrópico	90
Figura 21 – Velocidade do gás de saída em função do índice politrópico	92
Figura 22 – Espessura do líquido de saída em função do índice politrópico	94
Figura 23 – Comparação dos resultados experimentais e estimados de ID_{32}	97
Figura 24 – Comparação do número de Weber em função do número de Reynolds	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pesquisas sobre a atomização efervescente	35
Tabela 2 – Conclusões importantes em pesquisas sobre a atomização efervescente	42
Tabela 3 – Tensões superficiais adimensionais de alguns líquidos.....	55
Tabela 4 – Propriedades físicas dos fluidos para a validação do modelo de escoamento núcleo-anular frio.....	75
Tabela 5 – Condições operacionais para a validação do modelo de escoamento núcleo-anular frio	77
Tabela 6 – Resultados da validação do modelo de escoamento núcleo-anular frio	77
Tabela 7 – Propriedades físicas dos fluidos para a simulação do modelo de escoamento núcleo-anular frio	80
Tabela 8 – Condições operacionais para a simulação do modelo de escoamento núcleo-anular frio	81
Tabela 9 – Diâmetro médio integral de Sauter (ID_{32}) para dezessete atomizadores efervescentes de tipo A	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LHO	Óleo leve de aquecimento (Light heating oil)
RMSE	Erro quadrático médio (Root mean square error)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área, m^2
$c_{v,L}$	Calor específico meio a volume constante de um líquido, $kJ/(kg \cdot K)$
$c_{p,G}$	Calor específico meio a pressão constante de um gás, $kJ/(kg \cdot K)$
d	Diâmetro, mm
e	Número de orifícios de saída do atomizador, -
E	Transferência de energia, kJ
$e_{j,i}$	Expoente da variável independente adimensional “i” correspondente ao termo “j” de $M_{i,k}\pi_1$, baseado sobre o modelo adimensional, -
F_{Obj}	Função objetivo
g	Aceleração da gravidade, m/s^2
GLR	Razão das vazões mássicas do gás e do líquido (<i>gas-liquid ratio by mass</i>), -
h	Entalpia específica, kJ/kg
ID_{32}	Diâmetro médio integral de Sauter (<i>Integral Sauter mean diameter</i>), mm
J	Velocidade superficial, m/s
$\dot{m}$	Vazão mássica, kg/s
$\vec{n}$	Vetor unitário normal à superfície de controle
N	Grandeza escalar ou vetorial referente ao volume de controle
p	Índice politrópico, -
P	Pressão absoluta, Pa
P_{Atm}	Pressão atmosférica, Pa
$\dot{Q}$	Vazão volumétrica total, m^3/s
$\dot{q}$	Vazão volumétrica em um específico orifício de saída do atomizador, m^3/s
rv	Razão de velocidades (<i>slip ratio</i>), -
Re	Número de Reynolds, -
R_G	Constante do gás, $kPa \cdot m^3/(kg \cdot K)$
S	Superfície
SMD	Diâmetro médio de Sauter (<i>Sauter mean diameter</i>), mm
E	Transferência de energia, kJ
T	Temperatura, K
t	Tempo, s
u	Energia interna específica, kJ/kg

$\vec{V}$ Velocidade vetorial

V Velocidade escalar, m/s

$\bar{V}$ Velocidade média, m/s

We Número de Weber, -

Símbolos gregos

α Fração superficial, -

β Fração volumétrica, -

λ Coeficiente de energia cinética, -

γ Tensão superficial do líquido, kg/s²

δ_{Esp} Espessura do líquido, μm

η Variável para o estudo de uma grandeza escalar ou vetorial (N) relativa ao volume de controle

μ Viscosidade, kg/(m*s)

ρ Massa específica, kg/m³

π_P Razão das pressões em uma posição e na câmara de mistura, -

π_T Razão das temperaturas em uma posição e na câmara de mistura, -

π_ρ Razão das massas específicas em uma posição e na câmara de mistura, -

π_1 Variável dependente adimensional, -

π_i Variável independente adimensional “i” ($i \geq 2$), -

$_{E,k}\pi_1$ Valor experimental da variável dependente adimensional para o estado experimental genérico “k”, -

$_{M,k}\pi_1$ Valor calculado do modelo adimensional para o estado experimental genérico “k”, -

$_{k}\pi_i$ Valor experimental da variável independente adimensional “i” para o estado experimental genérico “k”, -

$\forall$ No contexto do uso do Teorema de Transporte de Reynolds expressa o volume, e no contexto de uma condição para alguma variável tem o significado do símbolo lógico $\forall$

Subíndice

Bi Referente ao escoamento bifásico

Cal Referente à transferência de energia por calor

CM Referente à câmara de mistura

$Eixo$ Referente à transferência de energia por trabalho de eixo

G Referente ao gás

G,CM Referente ao gás na câmara de mistura

G,k Referente ao gás no orifício de saída número “k” do atomizador

G,sai Referente ao gás no orifício de saída do escoamento núcleo-anular

i Referente ao diâmetro de interface

i,ato Referente ao diâmetro de interface para qualquer orifício de saída do atomizador

i,k Referente ao diâmetro de interface no orifício de saída número “k” do atomizador

i,sai Referente ao diâmetro de interface no orifício de saída do escoamento núcleo-anular

L Referente ao líquido

L,CM Referente ao líquido na câmara de mistura

L,k Referente ao líquido no orifício de saída número “k” do atomizador

L,sai Referente ao líquido no orifício de saída do escoamento núcleo-anular

o Referente ao diâmetro maior transversal ao escoamento núcleo-anular

o,ato Referente ao diâmetro de saída para qualquer orifício de saída do atomizador

o,k Referente ao diâmetro de saída no orifício de saída número “k” do atomizador

o,sai Referente ao diâmetro de saída no orifício de saída do escoamento núcleo-anular

P,G Referente à pressão do gás

P,G,sai Referente à pressão do gás no orifício de saída do escoamento núcleo-anular

P,L Referente à pressão do líquido

P,L,sai Referente à pressão do líquido no orifício de saída do escoamento núcleo-anular

P,sai Referente à pressão no orifício de saída do escoamento núcleo-anular

T,G Referente à temperatura do gás

T,G,sai Referente à temperatura do gás no orifício de saída do escoamento núcleo-anular

T,L Referente à temperatura do líquido

T,L,sai Referente à temperatura do líquido no orifício de saída do escoamento núcleo-anular

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	ATOMIZAÇÃO	20
1.2	TIPOS DE ATOMIZADORES	21
1.2.1	Atomizadores de pressão	21
1.2.2	Atomizador rotativo	22
1.2.3	Atomizador assistido por ar (<i>Air-assisted atomizer</i>)	22
1.2.4	Atomizador por jato de ar (<i>Airblast atomizer</i>)	22
1.2.5	Atomizador efervescente	23
1.3	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	23
1.4	OBJETIVOS	24
1.4.1	Objetivo geral	24
1.4.2	Objetivos específicos	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	ATOMIZAÇÃO EFERVESCENTE	24
2.2	TIPOS DE ATOMIZADORES EFERVESCENTES	26
2.3	VARIÁVEIS INDEPENDENTES DA ATOMIZAÇÃO EFERVESCENTE	28
2.4	VARIÁVEIS DEPENDENTES DA ATOMIZAÇÃO EFERVESCENTE	29
2.4.1	Diâmetro médio das gotas	29
2.4.2	Ângulo de cone	30
2.4.3	Penetração	31
2.4.4	Dispersão	32
2.4.5	Padrão	32
2.4.6	Distribuição radial do spray	32
2.5	ESTADO DE ARTE	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1	MODELO DE ESCOAMENTO NÚCLEO-ANULAR FRIO	48
3.1.1	Concepção do modelo de escoamento núcleo-anular	48
3.1.2	Definições	50
3.1.3	Hipóteses	51
3.1.4	Aplicação da lei de Young-Laplace	54
3.1.5	Teorema de Transporte de Reynolds	56
3.1.6	Aplicação da equação de conservação da massa	57

3.1.6.1	Conservação da vazão volumétrica do líquido	57
3.1.6.2	Espessura do líquido no orifício de saída	58
3.1.6.3	Velocidades dos fluidos na câmara de mistura	58
3.1.6.4	Velocidade do líquido no orifício de saída	59
3.1.6.5	Pressão bifásica adimensional	59
3.1.6.6	Análise do índice politrópico	60
3.1.6.7	Temperatura adimensional do gás	61
3.1.6.8	Velocidade do gás no orifício de saída	61
3.1.6.9	Massa específica bifásica adimensional	62
3.1.7	Aplicação da equação de conservação da energia	62
3.1.8	Definição do modelo de escoamento núcleo-anular frio	66
3.2	MODELO ADIMENSIONAL	67
3.2.1	Modelo adimensional monômico	67
3.2.1.1	Modelo adimensional geral	67
3.2.1.2	Aplicação da condição necessária de otimização para obtenção do modelo adimensional ótimo	68
3.2.1.3	Análise do modelo adimensional monômico para diferentes valores de “p” e “m”	70
3.2.2	Modelo adimensional polinomial	70
3.2.3	Condição suficiente de otimização para funções convexas	72
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1	VALIDAÇÃO DO MODELO DE ESCOAMENTO NÚCLEO-ANULAR FRIO	73
4.1.1	Procedimento de validação do modelo de escoamento núcleo-anular frio ...	73
4.1.2	Resultados experimentais da espessura média dos ligamentos	74
4.1.3	Análise dos resultados da validação do modelo de escoamento núcleo- anular frio	77
4.2	SIMULAÇÃO DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS	79
4.2.1	Análise da fração volumétrica do gás na câmara de mistura	81
4.2.2	Análise da fração volumétrica do gás de saída	83
4.2.3	Análise da pressão bifásica adimensional de saída	85
4.2.4	Análise da temperatura adimensional do gás de saída	87
4.2.5	Análise da massa específica bifásica adimensional de saída	88
4.2.6	Análise da velocidade do líquido de saída	90
4.2.7	Análise da velocidade do gás de saída	91

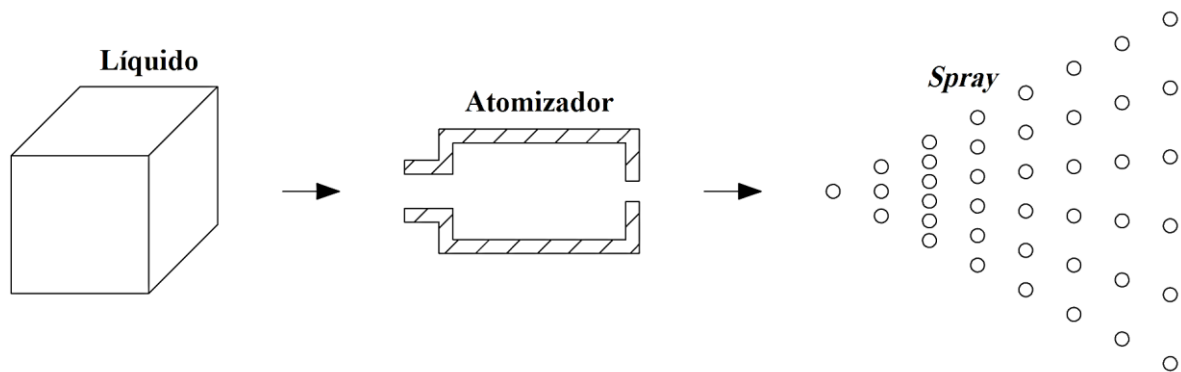
4.2.8	Análise da espessura do líquido de saída	93
4.3	MODELO ADIMENSIONAL DO DIÂMETRO MÉDIO DAS GOTAS DO	
	SPRAY	95
5	CONCLUSÕES	99
	TRABALHOS FUTUROS	100
	REFERÊNCIAS	101

1 INTRODUÇÃO

1.1 ATOMIZAÇÃO

A atomização é um processo que consiste na divisão de um volume líquido em um conjunto de pequenas partículas denominadas gotas (geralmente medidas em micrometros), sendo o conjunto de gotas denominado spray. A atomização define-se como a redução da razão do volume do líquido e a área superficial do spray. Para a atomização se utiliza um dispositivo denominado atomizador. A Figura 1 apresenta um esquema de atomização padrão.

Figura 1 - Esquema de atomização



Fonte: Elaborado pelo autor

A atomização inicia no orifício de saída do atomizador com a quebra do escoamento líquido em ligamentos ou porções, para depois ser divididos em gotas formando o spray (NASR; YULE; BENDIG, 2002; ZHOU et al., 2010). Basicamente, para uma atomização eficiente é necessária uma alta velocidade relativa entre a velocidade do líquido de saída no atomizador e a velocidade do gás externo ao atomizador (LEFEBVRE; MCDONELL, 2017). Os sprays têm muitas aplicações, por exemplo, na pintura, nebulização, deposição de partículas, secagem, resfriamento, limpeza e combustão (LEFEBVRE; MCDONELL, 2017; WILLIAMS, 1990). O tamanho das gotas do spray é medido por um diâmetro médio. Nos sprays utilizados em processos de combustão, o diâmetro médio mais empregado é o diâmetro médio de Sauter (Sauter mean diameter, SMD). Na combustão, existem três vantagens para obter um pequeno diâmetro médio das gotas que são as seguintes: (1) melhor transferência de calor devido à melhor distribuição das gotas com o agente oxidante (SAZHIN, 2014; SIRIGNANO, 2010), (2) redução do tempo de vaporização das gotas (ASHGRIZ, 2011; BASU et al., 2018), e (3) aumento da área superficial do líquido

(LEFEBVRE; MCDONELL, 2017). O uso da atomização aplicada à combustão ocorre, por exemplo, em turbinas a gás, motores de ciclo Otto, Diesel, motores de foguete e fornos industriais (LEFEBVRE; MCDONELL, 2017).

No presente trabalho, os diversos tipos de atomizadores são classificados segundo o número de fases dos fluidos que interatuam para a atomização, assim podem ser divididos em atomizadores monofásicos (talvez os mais conhecidos e utilizados) e atomizadores bifásicos (conhecidos como atomizadores de duplo-fluido). Os atomizadores monofásicos funcionam baseados na transformação da energia de pressão em energia cinética. Exemplos de atomizadores monofásicos são os atomizadores de pressão e rotativos. Os atomizadores bifásicos funcionam baseados na transferência da quantidade de movimento entre os fluidos. Exemplos de atomizadores bifásicos são os atomizadores assistidos por ar, por jato de ar e efervescentes. A seguir serão apresentados brevemente alguns tipos de atomizadores considerados os mais utilizados; para maior conhecimento de cada um deles e outros pode-se consultar os trabalhos de Lefebvre e McDonell (2017) e Nasr et al. (2002).

1.2 TIPOS DE ATOMIZADORES

1.2.1 Atomizadores de pressão

Os atomizadores de pressão transformam a energia de pressão em energia cinética para produzir o aumento da velocidade relativa entre o líquido e o gás externo. Os tipos de atomizadores de pressão são os seguintes:

- a) Atomizador de orifício plano (plain-orifice atomizer): Este é um atomizador de construção simples, possui uma cavidade cilíndrica com um orifício plano para a saída do líquido (BIROUK; LEKIC, 2009; TAN et al., 2017).
- b) Atomizador simplex (Pressure-swirl atomizer): O ângulo de cone do spray obtido dos atomizadores de orifício plano é pequeno, por isto foram projetados os atomizadores simplex que permitem produzir maiores ângulos. No atomizador simplex é gerado um movimento rotacional do líquido produzindo uma maior velocidade tangencial de saída o qual produz um maior ângulo de cone (LAN et al., 2014; RONCEROS et al., 2022).
- c) Atomizador duplex (Duplex atomizer): Uma desvantagem dos atomizadores de pressão de orifício plano e simplex é que a razão entre a vazão mássica do líquido e a raiz quadrada da pressão manométrica é aproximadamente $10 \text{ (kg*m)}^{0.5}$. Este limite pode ser superado utilizando o atomizador duplex, atingindo até um limite aproximadamente de $40 \text{ (kg*m)}^{0.5}$, sem necessidade de utilizar grandes pressões de

injeção (LEFEBVRE; MCDONELL, 2017). O sentido físico desta razão é estimar a área do orifício de saída de um atomizador de pressão para um líquido específico. Este tipo de atomizador caracteriza-se pela perfuração de dois conjuntos de orifícios em uma câmara de redemoinho para o líquido, esses orifícios são classificados em primários e secundários. O conjunto de orifícios primários são os de área transversal muito menor comparados com o conjunto de orifícios secundários. Para baixas vazões mássicas, o líquido flui pelos orifícios primários; e para altas vazões mássicas, o líquido flui pelos orifícios primários e secundários (DAFSARI et al., 2021; LEFEBVRE; MCDONELL, 2017).

1.2.2 Atomizador rotativo

O atomizador rotativo é caracterizado pela entrada do líquido no centro de um disco plano ou um copo giratório. O líquido flui primeiro radialmente para fora no disco e, em seguida, é liberado dos limites externos do disco a uma velocidade relativamente alta por meio da força centrífuga (AHMED; YOUSSEF, 2012). Se um disco plano é utilizado, o líquido é expulso do atomizador através de um conjunto de orifícios de saída localizados no disco (AHMED; YOUSSEF, 2014). Para baixas vazões mássicas, formam-se gotas próximas ao disco plano giratório e, para altas vazões mássicas, formam-se ligamentos próximos ao disco plano giratório para, posteriormente, desintegrar-se em gotas (FROST, 1981).

1.2.3 Atomizador assistido por ar (Air-assisted atomizer)

Em geral, os atomizadores de duplo-fluido misturam o líquido e gás para reduzir a área da superfície transversal do líquido no orifício de saída do atomizador e, conseqüentemente, reduzir o diâmetro médio das gotas do spray. O atomizador assistido por ar é caracterizado pela alta velocidade e a baixa vazão mássica do gás. Usualmente a velocidade do gás é próxima à velocidade do som (LEFEBVRE; MCDONELL, 2017). De acordo com o contato entre as fases, podem-se classificar em atomizadores de mistura interna ou externa. Ambos os tipos de atomizadores são muito eficientes para líquidos de elevada viscosidade (LEFEBVRE; MCDONELL, 2017).

1.2.4 Atomizador por jato de ar (Airblast atomizer)

Em princípio, os atomizadores por jato de ar funcionam de forma muito similar aos atomizadores assistidos por ar. A diferença entre eles, consiste em que nos atomizadores

por jato de ar a velocidade do gás é menor e a vazão mássica do gás é maior que nos atomizadores assistidos por ar. Usualmente a velocidade máxima de saída do gás é menor que 120 m/s (LEFEBVRE; MCDONELL, 2017). Os atomizadores por jato de ar são comumente utilizados na câmara de combustão das turbinas a gás (JASUJA, 1981; RIZK; MONGIA, 1991). Existem essencialmente dois tipos de atomizadores por jato de ar, que são de tipo pré-filme (prefilming) e jato plano (plain-jet). A atomização do tipo pré-filme, consiste em que o líquido é espalhado em um fino e contínuo filme líquido, que depois é submetida à alta velocidade de saída do ar (LEFEBVRE; MILLER, 1966; ROUDINI; WOZNIAK, 2019). A atomização do tipo jato plano, consiste na injeção do líquido em um escoamento anular gasoso de alta velocidade (ADEFONABI ADEFUYE; IFENNA OKOLI, 2017; LORENZETTO; LEFEBVRE, 1977).

1.2.5 Atomizador efervescente

A atomização efervescente consiste em fazer borbulhar uma pequena quantidade de gás no líquido antes de ser ejetado do atomizador. A geração de bolhas de gás no escoamento líquido dentro do atomizador é a diferença em relação aos outros métodos de atomização de duplo-fluido (seja mistura interna ou externa) e leva a melhorias significativas no desempenho, fundamentalmente no diâmetro médio das gotas.

1.3 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Desde o começo da pesquisa sobre a atomização efervescente (LEFEBVRE; WANG; MARTIN, 1988), foram estudadas as características do spray tais como o diâmetro médio das gotas, velocidade das gotas, ângulo de cone, penetração, estabilidade do spray, entre outras (KONSTANTINOV et al., 2010; SOVANI; SOJKA; LEFEBVRE, 2001). O projeto do atomizador efervescente foi melhorado mediante os estudos experimentais sobre a influência das variáveis geométricas na redução do diâmetro médio das gotas do spray (CHIN; LEFEBVRE, 1995; JEDELSKY et al., 2008, 2009; JEDELSKY; OTAHAL; JICHA, 2007; JICHA et al., 2002; WANG; CHIN; LEFEBVRE, 1989). Esses estudos experimentais fornecem importantes resultados, mas não oferecem uma explicação física detalhada do processo de atomização. Apesar das muitas pesquisas envolvendo as características do spray, ainda não existe um modelo completo da atomização efervescente que consiga estimar o escoamento bifásico dentro e fora do atomizador (LEFEBVRE; MCDONELL, 2017). Por isto, um maior conhecimento físico do escoamento bifásico no

orifício de saída do atomizador efervescente, permitirá conhecer melhor sua influência nas características do spray.

O presente estudo propõe desenvolver um modelo de escoamento núcleo-anular frio para a estimação de um conjunto de variáveis físicas dos fluidos no orifício de saída do atomizador efervescente. O conjunto de variáveis físicas estimadas são as seguintes: (1) fração volumétrica do gás, (2) pressão bifásica adimensional, (3) temperatura adimensional do gás, (4) massa específica bifásica adimensional, (5) velocidade média do líquido, (6) velocidade média do gás, e (7) espessura do líquido. A determinação dessas variáveis ajudará a compreender melhor fisicamente o escoamento bifásico quando a atomização inicia. O modelo proposto ajudará o desenvolvimento de futuros modelos da atomização primária (formação de ligamentos) e a atomização secundária (formação de gotículas e coalescência), e permitirá estimar as características do spray. O desenvolvimento do modelo proposto seria um avanço importante não apenas para melhorar o projeto do atomizador efervescente, mas também para melhorar o projeto da câmara de combustão estimando a penetração, ângulo de cone e a velocidade das gotas do spray (PANCHAGNULA; SOJKA, 1999) e, assim, estimar melhor seus desempenhos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Modelagem do escoamento bifásico para o atomizador efervescente.

1.4.1 Objetivos específicos

1. Realizar a revisão bibliográfica do atomizador efervescente.
2. Estimar um conjunto de variáveis físicas dos fluidos no orifício de saída do atomizador efervescente.
3. Desenvolver um modelo adimensional do diâmetro médio das gotas para a atomização efervescente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ATOMIZAÇÃO EFERVESCENTE

A atomização efervescente teve sua origem em um estudo realizado por Lefebvre, Wang e Martin (1988). Em pesquisas posteriores (CHIN; LEFEBVRE, 1995; LUND et al., 1993, 1998; PANCHAGNULA; SOJKA, 1999; PANCHAGNULA; SOJKA; SANTANGELO, 1996; SOVANI; SOJKA; LEFEBVRE, 2001) foi denominado o novo

atomizador de duplo-fluido como é atualmente conhecido o atomizador efervescente. O funcionamento deste atomizador consiste no uso de um tubo cilíndrico perfurado (denominado aerador) com um determinado número de orifícios (denominados orifícios aeradores) para a injeção do gás (bolhas) no escoamento líquido antes do orifício de saída do atomizador. Estes atomizadores são dispositivos de duplo-fluido, em que a energia cinética do gás não é a força motriz da atomização, sendo utilizada uma baixa velocidade de injeção do gás no escoamento líquido. Nos atomizadores efervescentes, a velocidade de injeção do gás é ainda menor que nos atomizadores assistidos por ar e atomizadores por jato de ar (LEFEBVRE; MCDONELL, 2017). A diferença de pressões de injeção do gás e do líquido é de alguns kilopascals (kPa), geralmente não maior de 10 kPa, que é a pressão suficiente para impedir que o líquido entre no canal do gás. O mecanismo básico da atomização efervescente ainda não foi estudado em detalhe (LEFEBVRE; MCDONELL, 2017), mas é considerado que no orifício de saída do atomizador, o líquido é comprimido pelas bolhas, produzindo um escoamento núcleo-anular que, posteriormente, devido à rápida expansão do gás quando sai do atomizador, o escoamento líquido se transforma em ligamentos que se desintegram em pequenas gotas.

O interesse na atomização efervescente aumentou significativamente nos últimos anos, o que levou ao desenvolvimento de muitos estudos (BRONIARZ-PRESS; OCHOWIAK; WOZIWODZKI, 2010; HANNA; ZOUGHAIB, 2017; JEDELSKY; JICHA, 2013; JICHA et al., 2002; OCHOWIAK, 2012, 2013, 2016; OCHOWIAK et al., 2012; OTAHAL; FISER; JICHA, 2007; ROESLER; LEFEBVRE, 1989; WANG; CHIN; LEFEBVRE, 1989) que foram importantes para aprofundar o conhecimento sobre diferentes aspectos fundamentais deste novo atomizador. Alguns dos aspectos fundamentais pesquisados foram: tipos de atomizadores de acordo com a injeção de gás (BRONIARZ-PRESS; OCHOWIAK; WOZIWODZKI, 2010; JEDELSKY et al., 2014; JEDELSKY; JICHA, 2013; OCHOWIAK, 2013; OTAHAL; FISER; JICHA, 2007), faixas adequadas de condições de operação (JEDELSKY et al., 2008; JEDELSKY; JICHA, 2008), estabilidade do spray (JEDELSKY; JICHA, 2006, 2012), dimensionamento dos atomizadores (CHIN; LEFEBVRE, 1995; JEDELSKY et al., 2009; JEDELSKY; OTAHAL; JICHA, 2007; JICHA et al., 2002; KOKATE; SAVALIA; MAHANT, 2018), entre outros aspectos (KONSTANTINOV et al., 2010; SOVANI; SOJKA; LEFEBVRE, 2001).

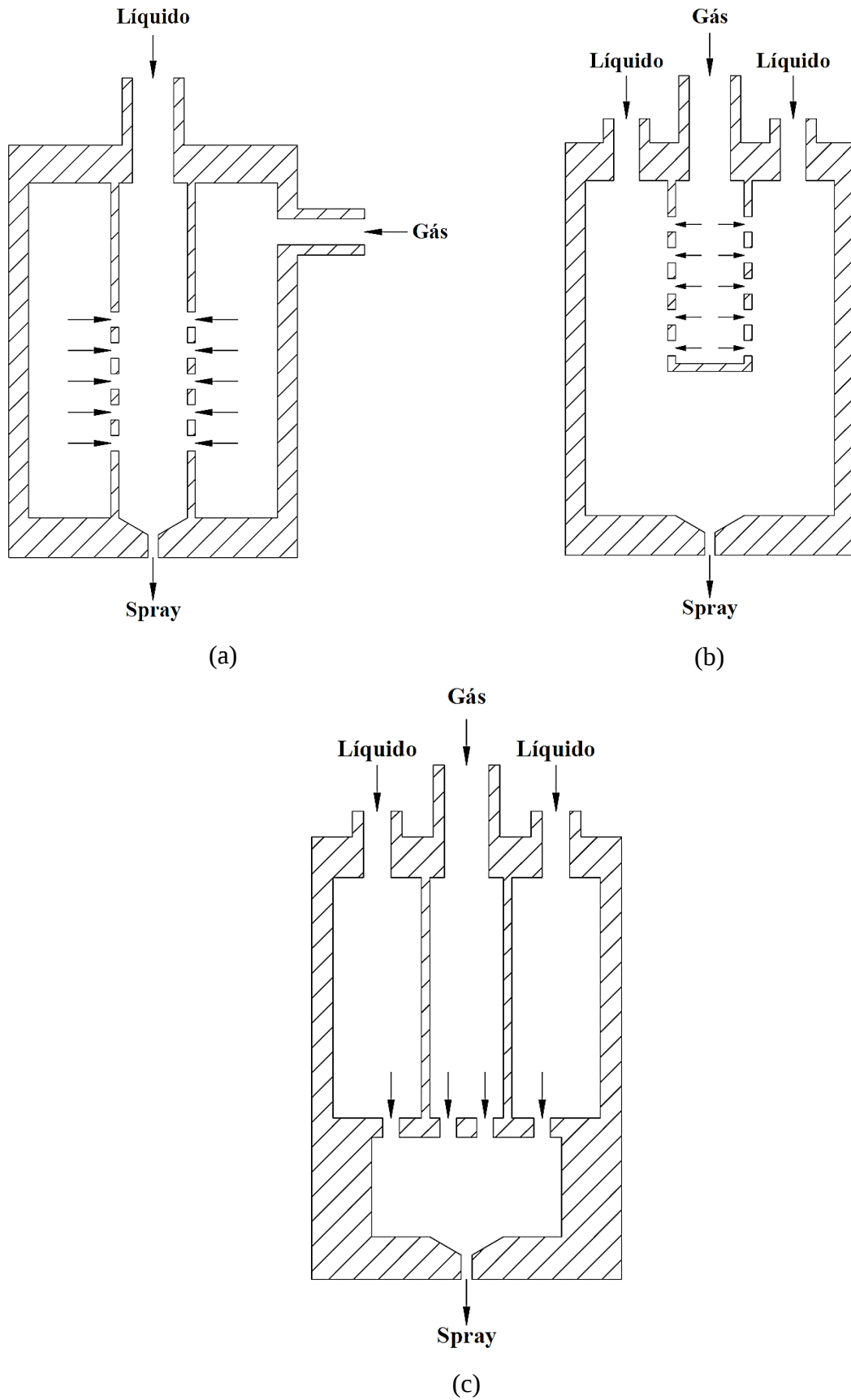
As vantagens do uso dos atomizadores efervescentes são fundamentalmente as seguintes: (1) uso de baixa pressão de injeção do líquido (JEDELSKY; JICHA, 2013; LEFEBVRE; WANG; MARTIN, 1988), (2) uso de um baixo GLR (LEFEBVRE; WANG;

MARTIN, 1988; MLKVIK et al., 2016), (3) obtenção de um pequeno SMD das gotas (JICHA et al., 2002; LEFEBVRE; WANG; MARTIN, 1988), e (4) atomização estável para relativamente altos GLR (JEDELSKY; JICHA, 2006). Devido às vantagens do uso do atomizador efervescente, este atomizador é utilizado em aplicações de combustão (LEFEBVRE; MCDONELL, 2017) e é útil para a atomização de líquidos de alta viscosidade. Na pesquisa da atomização efervescente, um dos líquidos residuais mais estudados é o óleo leve de aquecimento (JEDELSKY et al., 2008, 2009; JEDELSKY; JICHA, 2006; JEDELSKY; JÍCHA, 2016; JEDELSKY; OTAHAL; JICHA, 2007, 2008).

2.2 TIPOS DE ATOMIZADORES EFERVESCENTES

Os atomizadores efervescentes são classificados em três tipos de acordo com a injeção do gás no escoamento líquido (JEDELSKY et al., 2009). Os tipos de atomizadores efervescentes são: (a) tipo A (injeção de gás de fora para dentro), (b) tipo B (injeção de gás de dentro para fora), e (c) tipo C (injeção de escoamentos paralelos em uma câmara de mistura). Os tipos de atomizadores efervescentes são apresentados na Figura 2.

Figura 2 - Tipos de atomizadores efervescentes: (a) tipo A; (b) tipo B; (c) tipo C



Fonte: Elaborado pelo autor

2.3 VARIÁVEIS INDEPENDENTES DA ATOMIZAÇÃO EFERVESCENTE

As variáveis que influenciam as características do spray são denominadas variáveis independentes da atomização. Para a identificação destas variáveis foi realizada uma revisão bibliográfica da atomização efervescente. Para maiores detalhes da revisão bibliográfica da atomização efervescente é sugerido consultar a Tabela 1. As variáveis independentes são: (1) variáveis físicas, (2) operacionais, e (3) geométricas; sendo descritas a seguir:

1. Variáveis físicas:

- Massa específica do gás (ρ_G).
- Massa específica do líquido (ρ_L).
- Viscosidade do gás (μ_G).
- Viscosidade do líquido (μ_L).
- Tensão superficial do líquido (γ).

2. Variáveis operacionais:

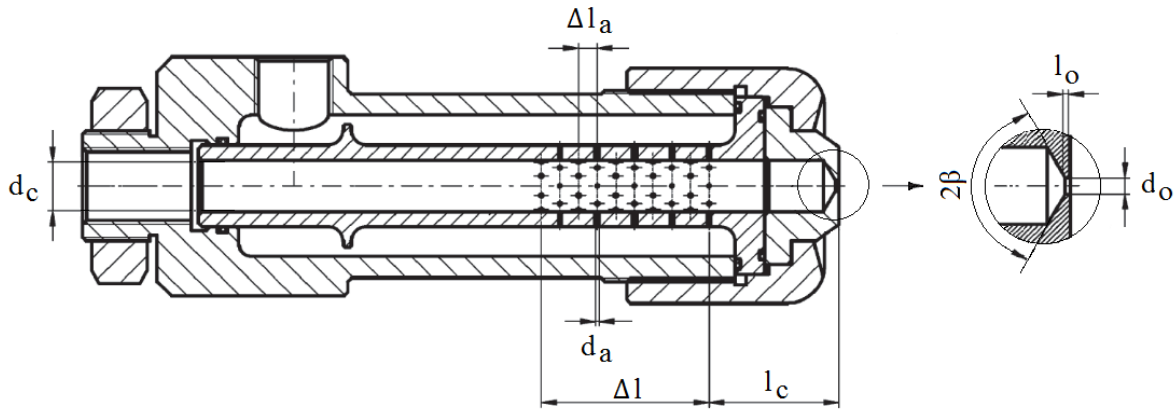
- Vazão mássica do gás ($\dot{m}_G$).
- Vazão mássica do líquido ($\dot{m}_L$).
- Razão das vazões mássicas do gás e do líquido (GLR).
- Pressão absoluta do gás (P_G).
- Temperatura do gás (T_G).
- Pressão absoluta do líquido (P_L).
- Temperatura do líquido (T_L).

3. Variáveis geométricas:

- Número de orifícios de entrada do gás na câmara de mistura (i_G).
- Diâmetro dos orifícios de entrada do gás na câmara de mistura (d_a).
- Comprimento entre a primeira e a última fileira de orifícios de entrada do gás na câmara de mistura (Δl).
- Diâmetro da câmara de mistura (d_c).
- Comprimento entre a última fileira de orifícios de entrada do gás (em relação à direção do escoamento bifásico) na câmara de mistura e o orifício de saída do atomizador (l_c).
- Diâmetro do orifício de saída do atomizador (d_o).
- Comprimento do orifício de saída do atomizador (l_o).
- Ângulo de convergência do escoamento bifásico a jusante da câmara de mistura (2β).

As variáveis geométricas de um atomizador efervescente de tipo A são apresentadas na Figura 3.

Figura 3 - Variáveis geométricas de um atomizador efervescente de tipo A



Fonte: Adaptado de Jedelsky et al. (2009)

Na descrição das variáveis independentes, não foram consideradas as propriedades do gás externo ao atomizador, por exemplo, a massa específica, vazão mássica ou direção e sentido do gás (SOVANI; SOJKA; LEFEBVRE, 2001).

2.4 VARIÁVEIS DEPENDENTES DA ATOMIZAÇÃO EFERVESCENTE

As variáveis que avaliam as características do spray são denominadas variáveis dependentes da atomização. As variáveis dependentes da atomização efervescente são apresentadas nesta seção (ASHGRIZ, 2011; KONSTANTINOV et al., 2010; LEFEBVRE; MCDONELL, 2017; SAZHIN, 2014; SOVANI; SOJKA; LEFEBVRE, 2001).

2.4.1 Diâmetro médio das gotas

Em muitos processos de transferência de calor e massa, é conveniente utilizar apenas o diâmetro médio das gotas do spray em vez da distribuição completa do diâmetro médio das gotas (LEFEBVRE; MCDONELL, 2017). No trabalho de Mugele e Evans (1951) é definido o diâmetro médio das gotas do spray de uma maneira geral para que depois possa ser utilizado em um processo específico. O diâmetro médio das gotas do spray é definido na equação (1).

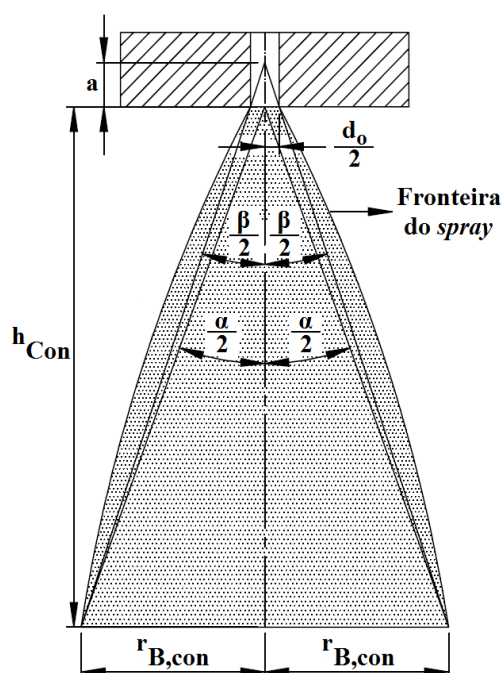
$$D_{ab} = \left(\frac{\sum n_i D_i^a}{\sum n_i D_i^b} \right)^{\frac{1}{a-b}} \quad (1)$$

sendo “i” uma específica faixa de medida para o diâmetro médio das gotas do spray, “ n_i ” é o número de gotas que tem um diâmetro na faixa “i”, e “ D_i ” é o diâmetro médio da faixa “i”. Como caso particular, o diâmetro médio de Sauter é o diâmetro D_{32} .

2.4.2 Ângulo de cone

O spray tem uma forma similar a um cone, mas não é exatamente um cone devido às interações das gotas desprendidas na periferia do spray com o gás exterior ao atomizador, gerando mudanças significativas no balanço de forças nestas gotas. Para propor um ângulo que caracterize o spray, é necessário estabelecer que a partir do centro do orifício de saída do atomizador (vértice) seja projetado um segmento de linha reta (geratriz) que corte a superfície curva do spray correspondente a alguma distância axial estabelecida (altura, h_{Con}). Movendo a geratriz de modo equidistante ao redor da altura, pode-se definir um cone que caracteriza ao spray. Naturalmente, o cone define um ângulo convexo representado por “ α ” denominado ângulo de cone. O esquema de como medir o ângulo de cone α é apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Esquema do ângulo de cone de um spray



Fonte: Elaborado pelo autor

Existe outra maneira de definir o ângulo do cone, que é semelhante com a definição anterior. Essa outra maneira consiste em que um segmento de linha reta intercepte um ponto na borda do orifício de saída e que também intercepte algum ponto do eixo do atomizador. O ponto de interceptação entre o segmento de linha reta e o eixo do atomizador será o novo vértice; depois este segmento é girado de modo equidistante ao redor do eixo do atomizador e assim é definido um novo cone. Naturalmente, o novo cone define um novo ângulo convexo representado por “ β ” que também pode ser denominado ângulo de cone. O esquema de como medir o ângulo de cone β é apresentado na Figura 4. Na equação (2), define-se o ângulo β em função do ângulo α .

$$\beta = 2\arctan \left[\tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{d_o}{h_{Con}} \right) \right] \quad (2)$$

Observa-se que a razão $d_o/h_{Con} \approx 0$ produzindo $\beta \approx \alpha$. Assim, para evitar maiores cálculos na medida do ângulo de cone é sugerido utilizar a definição do ângulo de cone α .

2.4.3 Penetração

Esta característica é definida como a máxima distância que atingem as gotas do spray. Existem dois modos de medir esta característica, de acordo com a velocidade do gás externo, podendo ser a velocidade total igual a zero ou a velocidade transversal ao eixo do atomizador diferente de zero (LEFEBVRE; MCDONELL, 2017).

A penetração depende das forças aplicadas nas gotas do spray. Quando o líquido é expelido pelo orifício de saída do atomizador, a velocidade do líquido de saída é alta (por ser muito pequena a área da superfície transversal que ocupa no orifício de saída), mas quando o spray se desenvolve axialmente, a velocidade das gotas começa a diminuir porque a área da superfície transversal que ocupam as gotas começa a aumentar (devido à conservação da massa). Adicionalmente, é considerada a força de resistência do gás exterior como uma força contrária ao avanço das gotas, limitando o avanço das gotas até uma determinada distância. De maneira geral, um spray com um ângulo de cone pequeno (por exemplo no uso de atomizadores de orifício plano) tem uma penetração grande, e vice-versa.

2.4.4 Dispersão

A dispersão é definida como a razão entre o volume do espaço que ocupa o spray (pode-se considerar por exemplo um cone) e o volume das gotas do spray. A vantagem de uma grande dispersão é proporcionar uma melhor mistura do spray com o gás exterior ao atomizador, produzindo uma combustão mais homogênea (LEFEBVRE; MCDONELL, 2017). De maneira geral, o spray com um ângulo de cone pequeno (obtido, por exemplo, de atomizadores de orifício plano) ou grande (obtido, por exemplo, de atomizadores simplex ou duplex) é caracterizado por ter uma dispersão pequena ou grande, respectivamente.

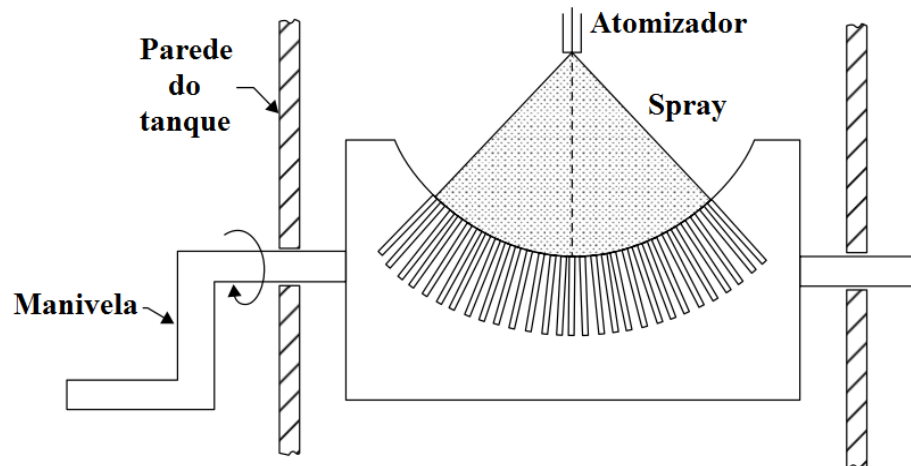
2.4.5 Padrão

O padrão, consiste na avaliação do spray em relação ao eixo do atomizador. Para avaliar este parâmetro é necessário realizar um estudo quantitativo da distribuição do diâmetro das gotas em uma superfície transversal ao eixo do atomizador. Por exemplo, em sistemas de combustão uma distribuição uniforme do combustível produz alta eficiência de combustão e maior tempo de vida dos materiais (LEFEBVRE; MCDONELL, 2017).

2.4.6 Distribuição radial do spray

Para a avaliação desta característica precisa-se incorporar externamente ao atomizador um conjunto de pequenos tubos os quais precisam estar equidistantes radialmente ao orifício de saída do atomizador. Quando inicia a atomização, o conjunto de tubos é colocado na parte inferior ao atomizador para que o líquido seja distribuído nos tubos e assim, medir qual é o volume do líquido em determinado ângulo em relação ao eixo do atomizador (LEFEBVRE; MCDONELL, 2017). Um esquema do dispositivo usado para o estudo da distribuição radial do spray é apresentado na Figura 5.

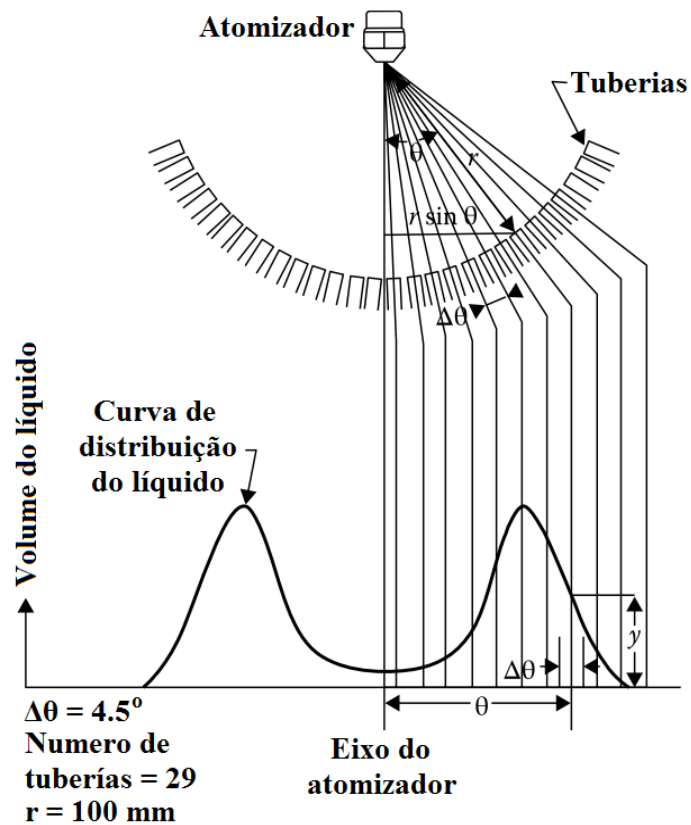
Figura 5 - Esquema do dispositivo para a avaliação da distribuição radial do spray



Fonte: Adaptado de Lefebvre e McDonell (2017)

Depois de ter medido o volume (ou massa) do líquido em cada tubo, pode-se fazer uma correlação entre o conteúdo volumétrico (ou mássico) do líquido e o ângulo formado pelo tubo e o eixo do atomizador. Um esquema desta análise é mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Distribuição radial do spray



Fonte: Adaptado de Lefebvre e McDonell (2017)

2.5 ESTADO DE ARTE

A revisão bibliográfica sobre atomização efervescente é organizada de modo que alguns trabalhos relevantes e suas principais contribuições sejam destacadas. No levantamento bibliográfico, foram identificadas características importantes tais como, o tipo de atomizador efervescente, variáveis independentes, variáveis dependentes, e conclusões importantes. As características e contribuições destas pesquisas são divididas em duas tabelas para que fiquem mais ordenadas. Na Tabela 1 é apresentado um resumo da informação referente ao tipo de atomizador efervescente utilizado, as variáveis independentes informadas, e as variáveis dependentes pesquisadas. Na Tabela 2 são apresentadas algumas conclusões importantes das pesquisas mencionadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Pesquisas sobre a atomização efervescente
(continua)

Nº	Referência	Atomizador efervescente		Variáveis físicas				Variáveis operacionais		Variável dependente pesquisada
		Tipo	e [-]/ d _o [mm]	Líquido	ρ_L [kg/m ³]	μ_L [kg/(m*s)]	Gás	P _T - P _{Atm} [kPa]	GLR [%]	
1	Lefebvre, Wang e Martin (1988)	B	1/ 0,8, 1,6 e 2,4	Água	1000	0,001	Nitrogênio	134,5 – 790	0,2 – 2,2	1. Diâmetro médio das gotas
2	Wang, Chin e Lefebvre (1989)	B	1/ 0,8, 1,6 e 2,4	Água	1000	0,001	Nitrogênio	134,5 – 790	0,2 – 2,3	1. Diâmetro médio das gotas
3	Buckner e Sojka (1991)	A	1/-	Glicerol/Água	1200 – 1300	0,400 – 0,968	Ar	1120 – 2350	5 – 35	1. Diâmetro médio das gotas
4	Lefebvre (1992)	-	-	-	-	-	-	-	-	1. Diâmetro médio das gotas
5	Lund et al. (1993)	B	1/-	SNO/Glicerol/Água	-	0,02 – 0,08	Ar	239 – 515	1 – 7	1. Diâmetro médio das gotas
6	Buckner e Sojka (1993)	A	1/-	Polímero/ Glicerol/Água	1130 – 1220	-	Ar	1,05 – 1,75	3 - 47	1. Diâmetro médio das gotas
7	Sutherland, Sojka e Plesniak (1997)	B	1/0,38	SNO Texaco/benzoil/ Glicerol/Água	840 – 1217	0,001 – 0,080	Ar	200 – 800	0,5 – 4	1. Diâmetro médio das gotas
8	Lund et al. (1998)	B	1/-	Óleo cru doce de Alberta	816	0,005	Dióxido de carbono /Hélio	239 – 515	5 - 50	1. Diâmetro médio das gotas

Tabela 1 - Pesquisas sobre a atomização efervescente
(continuação)

Nº	Referência	Atomizador efervescente		Variáveis físicas				Variáveis operacionais		Variável dependente pesquisada
		Tipo	e [-]/ d _o [mm]	Líquido	ρ_L [kg/m ³]	μ_L [kg/(m*s)]	Gás	P _T - P _{Atm} [kPa]	GLR [%]	
9	Panchagnula e Sojka (1999)	A	1/3 – 4,5	Xarope de milho com alto teor de frutose	1200	0,900	Ar	-	2 – 10	1. Diâmetro médio das gotas a diferentes distâncias axiais 2. Velocidade das gotas a diferentes distâncias axiais
10	Jicha et al. (2002)	A	1/2,5	LHO	874	0,0185	Ar	300 – 1100	1 – 10	1. Amplitude e frequência da pressão 2. Distribuição da vazão mássica líquida 3. Diâmetro médio das gotas

Tabela 1 - Pesquisas sobre a atomização efervescente
(continuação)

Nº	Referência	Atomizador efervescente		Variáveis físicas				Variáveis operacionais		Variável dependente pesquisada
		Tipo	e [-]/ d _o [mm]	Líquido	ρ_L [kg/m ³]	μ_L [kg/(m*s)]	Gás	P _T - P _{Atm} [kPa]	GLR [%]	
11	Jedelsky e Jicha (2006)	A	1/2,5	LHO	874	0,0185	Ar	200 – 600	2 – 50	1. Cálculo do RMS normalizado para a massa específica e o fluxo mássico
12	Otahal, Fiser e Jicha (2007)	B	1/2,5	Água	1000	0,001	Ar	200 – 600	1 – 50	1. Diâmetro médio das gotas 2. Eficiência de atomização
13	Jedelsky et al. (2008)	A	1/2,5	LHO	874	0,0185	Ar	200 – 600	2 – 10	1. Ângulo médio da concentração do líquido 2. Ângulo médio do fluxo mássico (ângulo médio do cone)

Tabela 1 - Pesquisas sobre a atomização efervescente
(continuação)

Nº	Referência	Atomizador efervescente		Variáveis físicas				Variáveis operacionais		Variável dependente pesquisada
		Tipo	e [-]/ d _o [mm]	Líquido	ρ_L [kg/m ³]	μ_L [kg/(m*s)]	Gás	P_T - P_{Atm} [kPa]	GLR [%]	
14	Jedelsky, Otahal e Jicha (2008)	A	1/3,5	LHO-poliestireno	874	0,0185	Ar	600	0 – 18	1. Diâmetro médio das gotas 2. Ângulo médio do spray
15	Xiong, Lin e Zhu (2009)	-	1/0,2	Água	1000	0,001	Ar	600	6,7	1. Diâmetro médio das gotas 2. Velocidade das gotas
16	Jedelsky et al. (2009)	A	1/2,5	LHO	874	0,0185	Ar	200 – 600	2 – 10	1. Diâmetro médio das gotas
17	Broniarz-Press, Ochowiak e Woziwodzki (2010)	-	1/3, 4, 5 e 6	Soluções aquosas de óxido de polietileno	998,2	-	Ar	-	2,8 – 92	1. Diâmetro médio das gotas
18	Ochowiak et al. (2012)	B	1/2,7	Soluções de polímero	-	0,042 – 0,064	Ar	-	1,4 – 57	1. Diâmetro médio das gotas
19	Ochowiak (2012)	B	1/2, 4, 5 e 6	Emulsões de óleo-água	959 – 998	-	Ar	-	1,4 – 57	1. Diâmetro médio das gotas

Tabela 1 - Pesquisas sobre a atomização efervescente
(continuação)

Nº	Referência	Atomizador efervescente		Variáveis físicas				Variáveis operacionais		Variável dependente pesquisada
		Tipo	e [-]/ d _o [mm]	Líquido	ρ_L [kg/m ³]	μ_L [kg/(m*s)]	Gás	P_T - P_{Atm} [kPa]	GLR [%]	
20	Ochowiak (2013)	B	1/2,7	Glicerol/Água	1000 – 1190	0,001 – 0,182	Ar	-	1,4 – 57	1. Coeficiente de descarga 2. Diâmetro médio das gotas
21	Liu e Duan (2013)	A	1/2,0	Água e Glicerol/Água	998 – 1229	0,001 – 0,434	Ar	-	-	1. Espessura do líquido no orifício de saída 2. Distribuição do diâmetro das gotas
22	Jedelsky e Jicha (2014)	A	1/2,5	LHO	874	0,0185	Ar	200 – 600	2 – 10	1. Velocidade de gota 2. Número de Stokes de gota
23	Ochowiak et al. (2015)	A	1/2,41 – 2,75	Glicerol/Água/Polímero Rokrysol WF1	998,2 – 1192	0,001 – 0,182	Ar	-	-	1. Ângulo do spray
24	Stähle, Gaukel e Schuchmann (2015)	A	1/1,5	Soluções aquosas de maltodextrina	1000 – 1241	0,001 – 0,308	Ar	400	40 – 51	1. Distribuição do gás no orifício de saída do atomizador

Tabela 1 - Pesquisas sobre a atomização efervescente
(continuação)

Nº	Referência	Atomizador efervescente		Variáveis físicas				Variáveis operacionais		Variável dependente pesquisada
		Tipo	e [-]/ d _o [mm]	Líquido	ρ_L [kg/m ³]	μ_L [kg/(m*s)]	Gás	P_T - P_{Atm} [kPa]	GLR [%]	
25	Kleinhans et al. (2016)	A	1/1,5	Emulsão de água e óleo de silicone	1025	0,0345 – 0,0370	Ar	200 – 400	2 – 70	1. Estabilidade do spray 2. Diâmetro médio das gotas
26	Zaremba et al. (2017)	A	1/0,7	LHO	874	0,0185	Ar	67 – 70	2,5 – 19,8	1. Padrão de escoamento bifásico 2. Diâmetro médio das gotas 3. Velocidade das gotas
27	Kourmatzis, Lowe e Masri (2017)	A	1/0,5	Água	1000	0,001	Ar	-	0,1 – 3,8	1. Espessura dos ligamentos 2. Espessura do escoamento bifásico 3. Diâmetro médio das gotas

Tabela 1 - Pesquisas sobre a atomização efervescente
(conclusão)

Nº	Referência	Atomizador efervescente		Variáveis físicas				Variáveis operacionais		Variável dependente pesquisada
		Tipo	e [-]/ d _o [mm]	Líquido	ρ_L [kg/m ³]	μ_L [kg/(m*s)]	Gás	P _T - P _{Atm} [kPa]	GLR [%]	
28	Sun et al. (2018)	A	1/0,8, 1,2, 2,0, 3,2	Água	1000	0,001	Ar	100 – 600	0 – 0,7	1. Padrão de escoamento bifásico 2. Diâmetro médio das gotas
29	Sun et al. (2019)	A	1/1,2	Água	1000	0,001	Ar	100 – 500	0,07 – 0,42	2. Morfologia do spray

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 2 - Conclusões importantes em pesquisas sobre a atomização efervescente
(continua)

Nº	Referência	Conclusões
1	Lefebvre, Wang e Martin (1988)	1. Obtenção de um novo projeto de atomizador de duplo-fluido. 2. Pequenos diâmetros médios das gotas utilizando pequenos valores para as variáveis operacionais. 3. O diâmetro médio das gotas é quase independente do diâmetro do orifício de saída.
2	Wang, Chin e Lefebvre (1989)	1. O diâmetro médio das gotas é quase independente do diâmetro do orifício de saída. 2. O diâmetro médio das gotas é quase independente da geometria do injetor de gás mantendo a mesma a área de aeração.
3	Buckner e Sojka (1991)	1. O SMD é muito dependente do GLR, sendo quase independente da viscosidade, pressão de atomização e vazão mássica da mistura bifásica. 2. Ótima atomização de fluidos newtonianos de alta viscosidade.
4	Lefebvre (1992)	1. A atomização foi dividida em dois modos, lenta (clássica) e rápida. 2. Atomização lenta: uma velocidade baixa do ar permite um maior tempo disponível para acontecerem instabilidades regulares, produzindo o desenvolvimento de ondas que causam sua desintegração. 3. Atomização rápida: uma alta velocidade do ar, fazendo que o tempo disponível não seja o suficiente para acontecerem instabilidades regulares na superfície do líquido, resultando que o SMD seja insensível às características tais como a massa específica do ar e a viscosidade do líquido.
5	Lund et al. (1993)	1. O desempenho da atomização foi observado ser quase independente da viscosidade. 2. O aumento da tensão superficial do líquido produz uma redução do SMD. 3. Validação de um modelo para o SMD. No modelo foi assumido que a atomização secundária é desprezível.
6	Buckner e Sojka (1993)	1. Atomização efervescente de fluidos não-newtonianos. 2. As propriedades reológicas dos fluidos (índices do comportamento de escoamento e de consistência) não têm um efeito significativo no SMD. 3. A atomização secundária é mais influente que a atomização primária para a determinação do SMD.
7	Sutherland, Sojka e Plesniak (1997)	1. Um disco poroso foi colocado à frente do orifício do atomizador para ter controle do diâmetro do ligamento. 2. Validação de um modelo para o SMD. No modelo foi assumido que a atomização secundária é desprezível. 3. O SMD tem um pequeno aumento (aproximadamente menor de 10%) em relação ao aumento da viscosidade ou da tensão superficial.

Tabela 2 - Conclusões importantes em pesquisas sobre a atomização efervescente

(continuação)

Nº	Referência	Conclusões
8	Lund et al. (1998)	1. Para o GLR menor ou igual a 15%, o aumento da massa molecular do gás origina o aumento do SMD e a ligeira diminuição da velocidade das gotas. Para o GLR maior a 15%, o aumento da massa molecular do gás origina um menor aumento de SMD e faz quase constante a velocidade das gotas.
9	Panchagnula e Sojka (1999)	1. Estudo axial e radial do perfil de velocidade e do SMD obtidas da atomização de um fluido de alta viscosidade utilizando grandes vazões mássicas. 2. As velocidades das gotas aumentam com o aumento da vazão mássica do líquido ou pelo aumento do GLR, e diminuem com o aumento da distância axial. Adicionalmente, os perfis de velocidade têm a forma de um sino para qualquer seção transversal ao <i>spray</i> , valor do GLR e vazão mássica do líquido. 3. O SMD foi observado ser quase constante em torno de 75 μm para qualquer seção transversal ao <i>spray</i> das três seções estudadas.
10	Jicha et al. (2002)	1. Influência da geometria do injetor de gás na estabilidade do spray, distribuição da vazão mássica líquida do spray e no diâmetro médio das gotas.
11	Jedelsky e Jicha (2006)	1. Estudo da estabilidade do spray mediante a avaliação das flutuações da massa específica e o fluxo mássico. 2. Relativa instabilidade do spray para baixos valores de GLR e relativa estabilidade para altos valores de GLR. 3. A influência da pressão de atomização não é tão significativa.
12	Otahal, Fiser e Jicha (2007)	1. Estabelecimento de um parâmetro para a avaliação da performance dos atomizadores de fluido-duplo.
13	Jedelsky et al. (2008)	1. Os perfis de velocidade, concentração líquida e fluxo mássico no spray tem forma de campainha, sendo o maior valor no eixo do atomizador. 2. Pouca influência da geometria interna do atomizador no perfil de velocidade, concentração líquida e fluxo mássico no spray.
14	Jedelsky, Otahal e Jicha (2008)	1. Efeito desprezível das partículas solidas esféricas (diâmetro desde 1 até 1,5 mm) no líquido em relação ao diâmetro médio das gotas do spray. 2. Não existe problema de tamponamento no orifício de saída ou de instabilidade do spray.

Tabela 2 - Conclusões importantes em pesquisas sobre a atomização efervescente

(continuação)

Nº	Referência	Conclusões
15	Xiong, Lin e Zhu (2009)	1. O modelo tridimensional estima muito bem o diâmetro médio das gotas nas regiões da atomização primaria e secundaria. 2. A redução do diâmetro de saída do atomizador efervescente favorece a atomização primaria, e o aumento da pressão de injeção favorece a atomização secundaria. 3. A redução da viscosidade e tensão superficial favorece a atomização.
16	Jedelsky et al. (2009)	1. Desenvolvimento de dois modelos (modelo homogêneo e modelo de fases separadas) para o escoamento bifásico. 2. Sugestões de fabricação para as dimensões geométricas do atomizador efervescente.
17	Broniarz-Press, Ochowiak e Woziwodzki (2010)	1. Os aumentos do diâmetro do orifício de saída do atomizador e a viscosidade da solução aquosa produzem o aumento do SMD. O efeito do diâmetro do orifício de saída não é tão considerável quando $GLR > 40\%$. 2. Das observações foi sugerido que a razão entre as áreas do orifício de saída e de aeração deve ser a menor possível para se ter uma melhor qualidade de atomização. 3. Desenvolvimento de um modelo adimensional do SMD.
18	Ochowiak et al. (2012)	1. O SMD é muito dependente do GLR, sendo que o aumento de GLR produz a diminuição de SMD. 2. A viscosidade do líquido depende da concentração do polímero, sendo o aumento da viscosidade devido ao aumento da concentração do líquido. 3. A maior viscosidade do líquido produz o aumento do SMD.
19	Ochowiak (2012)	1. O SMD é independente do tipo de emulsão. 2. O SMD aumenta em relação ao aumento do diâmetro de saída do atomizador e diminui em relação do GLR. 3. Desenvolvimento de um modelo adimensional do SMD.
20	Ochowiak (2013)	1. O coeficiente de descarga não é uma função linear do GLR. O coeficiente de descarga diminui com o aumento do GLR, com ênfases na faixa de 0 até 7%. 2. O coeficiente de descarga diminui com o aumento da viscosidade. O SMD aumenta com o aumento da viscosidade. Os resultados do coeficiente de descarga e o SMD são relacionados ao padrão de escoamento bifásico no interior do atomizador efervescente. 3. Desenvolvimento de um modelo adimensional do coeficiente de descarga.

Tabela 2 - Conclusões importantes em pesquisas sobre a atomização efervescente

(continuação)

Nº	Referência	Conclusões
21	Liu e Duan (2013)	1. A espessura do líquido no orifício de saída do atomizador efervescente aumenta e se aproxima ao diâmetro médio das gotas na atomização primária, quando o GLR aumenta. 2. O modelo desenvolvido pode prever com precisão o SMD na atomização primária quando o padrão bifásico no orifício de saída do atomizador é um escoamento anular. 3. A viscosidade do líquido teve pouca influência na espessura do filme líquido na atomização de líquidos, cuja viscosidade é significativamente maior do que da água.
22	Jedelsky e Jicha (2014)	1. Medição das velocidades das gotas em função de seu diâmetro médio. 2. Estudo do movimento das gotas em função do número de Stokes.
23	Ochowiak et al. (2015)	1. O ângulo do spray aumenta em relação ao aumento do GLR para líquidos com diferentes viscosidades. 2. A câmara de mistura gás-líquido no atomizador produz um importante aumento no ângulo do spray. 3. Desenvolvimento de um modelo do ângulo do spray.
24	Stähle, Gaukel e Schuchmann (2015)	1. Dos testes é observado que existem só dois padrões de escoamento no orifício de saída: a) Padrão anular, e b) Padrão em golfada. Quando existe um padrão anular no orifício de saída é observado um spray fino e estável, mas quando existe um padrão em golfada no orifício de saída é observado um spray não fino e instável. 2. O aumento da viscosidade do líquido produz o aumento do diâmetro médio das gotas. 3. O aumento do GLR produz a diminuição do diâmetro médio das gotas.
25	Kleinhans et al. (2016)	1. Para os atomizadores efervescentes é observado um padrão anular para todas as condições de operação, exceto para GLR = 2% para o qual é observado um padrão em golfadas. Para atomizador anel-núcleo é observado um padrão anular para todas as condições de operação. 2. O comportamento da atomização pulsante é observado unicamente nos atomizadores efervescentes produzindo uma ampla distribuição das gotas do spray. 3. Para um processo de atomização estável e adequado é recomendado determinar a distribuição média no tempo do diâmetro médio das gotas e a distribuição temporal do diâmetro médio das gotas.

Tabela 2 - Conclusões importantes em pesquisas sobre a atomização efervescente

(continuação)

Nº	Referência	Conclusões
26	Zaremba et al. (2017)	1. O atomizador efervescente de tipo A (para o líquido) e o atomizador de tipo Y têm um spray relativamente estável devido que no interior do atomizador existe um padrão de escoamento anular. O atomizador efervescente de tipo A (para o gás) e o atomizador CFT têm um spray não muito estável para as faixas de 2,5 até 5%, e de 2,5 até 10%, respectivamente. 2. O projeto interno dos atomizadores influencia a dinâmica de gotas principalmente para valores baixos de GLR. 3. O atomizador de tipo Y produziu o maior diâmetro médio das gotas, e os atomizadores efervescentes de tipo A (para o líquido e para o gás) e o atomizador CFT produziram distribuições de gotas similares.
27	Kourmatzis, Lowe e Masri (2017)	1. Primeiros resultados experimentais na região próxima ao orifício de saída do atomizador efervescente sobre a espessura média do escoamento bifásico e ligamentos. 2. Para a posição axial desde o orifício de saída do atomizador de 2,5 mm e para qualquer faixa de número de fragmentos contados, a espessura média dos ligamentos diminui em relação ao aumento do GLR. 3. Para a posição axial desde o orifício de saída do atomizador de 2,5 mm, a espessura média escoamento bifásico aumenta em relação ao aumento do GLR na faixa desde 0,9 até 2,7%. A espessura média do escoamento bifásico permanece quase constante nas faixas desde 0,1 até 0,9 e desde 2,7 até 3,8%.
28	Sun et al. (2018)	1. Dos testes de atomização foi observado que o regime borbulhante é vantajoso para uma atomização estável. O padrão borbulhante foi produzido com uma alta velocidade do líquido, um menor diâmetro do orifício de saída do atomizador, e uma grande distância entre a última fileira de orifícios aeradores e o orifício de saída. 2. Diminui o diâmetro das bolhas ao interior do atomizador com o aumento vazão mássica do líquido e o aumento de GLR. 3. Foi demonstrado que o diâmetro das bolhas é fundamental na estabilidade do spray e no SMD, por isso foi desenvolvido um modelo adimensional do diâmetro das bolhas do interior do atomizador.

Tabela 2 - Conclusões importantes em pesquisas sobre a atomização efervescente

(conclusão)

Nº	Referência	Conclusões
29	Sun et al. (2019)	1. O padrão no atomizador tem pouca influência nas médias das características no tempo da morfologia do spray, mas tem muita influência nas flutuações das características no tempo da morfologia do spray. 2. O padrão no interior do atomizador influencia nas flutuações da morfologia do spray. Por exemplo, a) No caso de ter um padrão agitado produz poucas mudanças na morfologia do spray e produz que o ângulo do spray esteja em uma pequena faixa, b) No caso de ter um padrão borbulhante produz muitas mudanças na morfologia do spray e produz que o ângulo do spray esteja em uma grande faixa, c) No caso de ter um padrão em golfadas produz um comportamento intermitente na morfologia do spray e produz que o ângulo do spray esteja em duas faixas, uma de baixos valores e a outra de altos valores. 3. A distribuição instantânea do escoamento bifásico e a fração volumétrica do gás no orifício de saída do atomizador influenciam na morfologia do spray.

Fonte: Produção do próprio autor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo é dividido em dois tópicos:

- 1) Modelo de escoamento núcleo-anular frio: Neste tópico é desenvolvido um modelo de escoamento bifásico para estimar um conjunto de variáveis físicas dos fluidos no orifício de saída do atomizador efervescente. Este modelo ajudará a entender melhor o início da atomização. Para o desenvolvimento do modelo é estudado por separado cada fase do escoamento bifásico, assumindo o escoamento núcleo-anular como o padrão de escoamento bifásico no interior do atomizador. Este tópico está ligado com à análise fluidodinâmica integral.
- 2) Modelo adimensional: Neste tópico é apresentado um método para o desenvolvimento de um modelo adimensional para estimar as variáveis dependentes da atomização efervescente, por exemplo, o diâmetro médio das gotas, ângulo de cone ou a penetração. Este tópico está ligado com à análise fluidodinâmica dimensional.

3.1 MODELO DE ESCOAMENTO NÚCLEO-ANULAR FRIO

3.1.1 Concepção do modelo de escoamento núcleo-anular

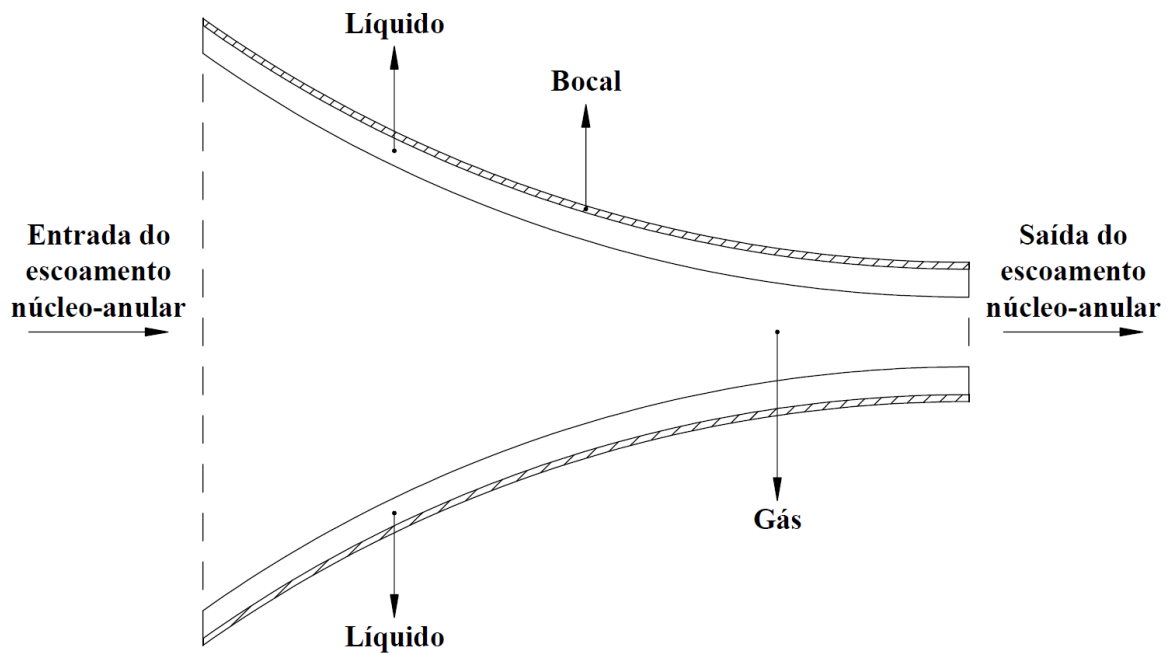
O modelo de escoamento núcleo-anular é proposto a partir de algumas observações sobre a atomização efervescente, que são as seguintes:

- 1) As pressões de injeção do líquido e gás são muito próximas, geralmente sendo a diferença entre ambas pressões não maior que 10 kPa (JEDELSKY et al., 2009; SOVANI; SOJKA; LEFEBVRE, 2001).
- 2) As velocidades dos fluidos no orifício de saída do atomizador são elevadas em relação às velocidades na câmara de mistura dos fluidos. Devido que não existe uma câmara de remoinho no atomizador efervescente é observado que o componente de velocidade axial no orifício de saída do atomizador é muito maior que qualquer outro componente de velocidade.
- 3) Existem dois tipos de padrões para o escoamento bifásico no orifício de saída do atomizador efervescente que são o padrão em golfadas e núcleo-anular (STÄHLE; GAUKEL; SCHUCHMANN, 2015), mas, a atomização é relativamente estável quando há um padrão núcleo-anular (KOURMATZIS; LOWE; MASRI, 2017).

Devido às observações anteriores, é induzido que, desde a câmara de mistura interna até o orifício de saída do atomizador, os escoamentos podem ser modelados conjuntamente

por um escoamento núcleo-anular. Para a aplicação do modelo de escoamento núcleo-anular em um atomizador com mais de um orifício de saída, é necessário fazer algumas hipóteses: (1) Todos os diâmetros dos orifícios de saída do atomizador são iguais, (2) Todas as vazões mássicas do líquido e gás nos orifícios de saída do atomizador são iguais em cada caso, e (3) Todos os diâmetros de interface nos orifícios de saída do atomizador são iguais. As hipóteses acima são feitas para definir em todos os orifícios de saída do atomizador, áreas de seção transversal de saída iguais do líquido e gás em cada caso. Consequentemente, em todos os orifícios de saída do atomizador, as velocidades do líquido e gás são iguais em cada caso. Assim, os muitos escoamentos bifásicos de saída podem ser integrados em um único escoamento bifásico de saída, por exemplo, um escoamento núcleo-anular. Mais detalhes sobre o supracitado serão estabelecidos nas próximas subseções. O escoamento núcleo-anular é apresentado na Figura 7.

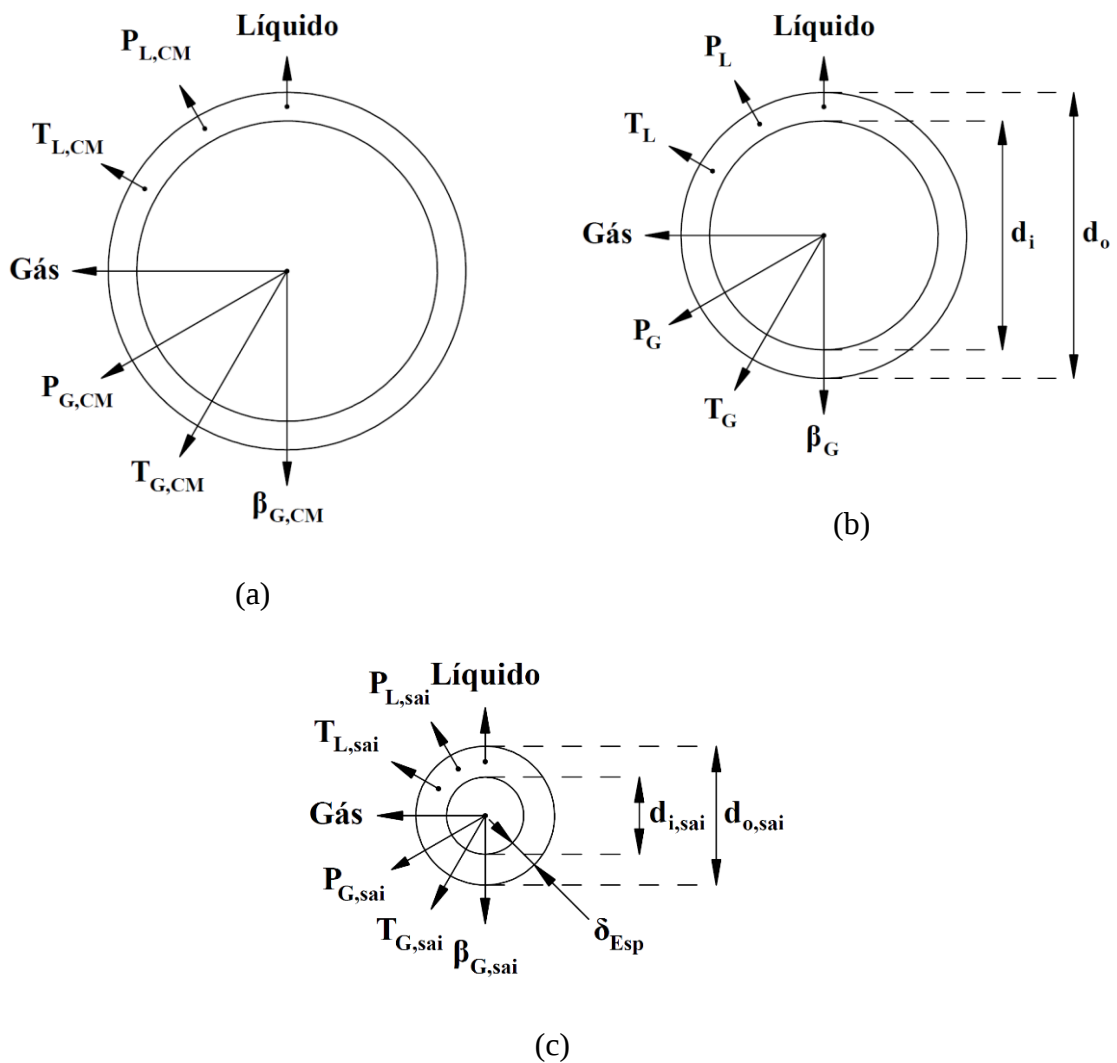
Figura 7 - Escoamento núcleo-anular



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da Figura 7, três seções transversais do escoamento núcleo-anular são apresentadas na Figura 8, que são: (a) seção transversal de entrada, (b) seção transversal intermediária, e (c) seção transversal de saída. Na Figura 8, a seção transversal de entrada é caracterizada pelas variáveis operacionais na câmara de mistura dos fluidos, e a seção transversal de saída é caracterizada pelas variáveis que serão pesquisadas.

Figura 8 - Seções transversais do escoamento núcleo-anular: (a) seção transversal de entrada; (b) seção transversal intermediária; (c) seção transversal de saída



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.2 Definições

Nesta seção são definidas algumas variáveis que são importantes no estudo de um escoamento bifásico líquido-gás. As frações superficiais do líquido (α_L) e do gás (α_G) são definidas na equação (3).

$$\alpha_L = \frac{A_L}{A} \quad , \quad \alpha_G = \frac{A_G}{A} \quad , \quad A = A_L + A_G \quad (3)$$

$$\forall A_L \in [A_{L,sai}, A_{L,CM}] \quad \wedge \quad \forall A_G \in [A_{G,sai}, A_{G,CM}]$$

As velocidades superficiais do líquido (J_L) e do gás (J_G) são definidas na equação (4).

$$J_L = \frac{\dot{Q}_L}{A} \wedge J_G = \frac{\dot{Q}_G}{A} \quad (4)$$

Por simplificação, as velocidades médias do líquido ($\bar{V}_L$) e do gás ($\bar{V}_G$) são mencionadas obviando a palavra “média”. Utilizando as equações (3) e (4) é deduzida uma importante relação entre as velocidades superficiais e as velocidades dos fluidos que é apresentada na equação (5).

$$J_L = \alpha_L \bar{V}_L \wedge J_G = \alpha_G \bar{V}_G \quad (5)$$

As frações volumétricas do líquido (β_L) e do gás (β_G) são definidas na equação (6) (BRENNEN, 2005; JEDELSKY et al., 2009).

$$\beta_L = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}} \quad , \quad \beta_G = \frac{\dot{Q}_G}{\dot{Q}} \quad , \quad \dot{Q} = \dot{Q}_L + \dot{Q}_G \quad (6)$$

$$\forall \dot{Q}_L \in \mathbb{R}^+ \wedge \forall \dot{Q}_G \in \mathbb{R}^+$$

Na atomização bifásica é utilizada uma variável adimensional representada por GLR que estima a quantidade de gás em relação ao líquido. A variável GLR é definida na equação (7).

$$GLR = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_L} \quad (7)$$

3.1.3 Hipóteses

Para o desenvolvimento do modelo de escoamento núcleo-anular frio é estabelecido um conjunto de suposições relacionadas às variáveis físicas dos fluidos. O escoamento núcleo-anular está em regime permanente. No escoamento núcleo-anular assume-se que não ocorra reação química ou mudança de fase (SOVANI; SOJKA; LEFEBVRE, 2001). A pressão de injeção é expressa como a pressão absoluta. Adicionalmente, para simplificar a denominação da pressão absoluta de injeção, ela é simplesmente mencionada como pressão.

Na equação (8) é assumido que todos os diâmetros dos orifícios de saída ($d_{o,k}$) e todos os diâmetros de interface ($d_{i,k}$) nos orifícios de saída do atomizador são iguais em cada caso. Nesta equação também é assumido que todas as velocidades de saída do líquido ($\bar{V}_{L,k}$) e do

gás ($\bar{V}_{G,k}$) são iguais em cada caso. Adicionalmente, o diâmetro do orifício de saída do escoamento núcleo-anular ($d_{o,sai}$) apresentado na Figura 7 é definido em função do diâmetro do orifício de saída do atomizador ($d_{o,ato}$) e o número total de orifícios de saída do atomizador (e).

$$\begin{aligned} d_{o,k} &= d_{o,ato} \quad , \quad d_{i,k} = d_{i,ato} \quad , \quad \bar{V}_{L,k} = \bar{V}_{L,sai} \quad , \\ \bar{V}_{G,k} &= \bar{V}_{G,sai} \quad \wedge \quad d_{o,sai} = d_{o,ato} \sqrt{e} \quad \forall k \in S / S = [1, e] \cap \mathbb{Z}^+ \end{aligned} \quad (8)$$

A pressão ($P_{L,k}$) e a temperatura ($T_{L,k}$) do líquido em qualquer orifício de saída do atomizador são assumidas iguais em cada caso na equação (9). Portanto, a entalpia ($h_{L,k}$) do líquido em qualquer orifício de saída do atomizador é a mesma.

$$P_{L,k} = P_{L,sai} \quad , \quad T_{L,k} = T_{L,sai} \quad \wedge \quad h_{L,k} = h_{L,sai} \quad \forall k \in S \quad (9)$$

A massa específica do líquido (ρ_L) é definida como constante na equação (10) para qualquer pressão (P_L) e temperatura (T_L) do líquido desde a câmara de mistura até o orifício de saída do atomizador. Na equação (10), a pressão e a temperatura do líquido na câmara de mistura são representadas por $P_{L,CM}$ e $T_{L,CM}$, respectivamente.

$$\begin{aligned} \rho_L(P_L, T_L) &= \rho_L / \rho_L \quad \text{é uma constante} \\ \forall P_L \in [P_{L,sai}, P_{L,CM}] &= D_{P,L} \quad \wedge \quad \forall T_L \in [T_{L,sai}, T_{L,CM}] = D_{T,L} \end{aligned} \quad (10)$$

A pressão ($P_{G,k}$) e a temperatura ($T_{G,k}$) do gás em qualquer orifício de saída do atomizador são assumidas iguais em cada caso na equação (11). Portanto, a entalpia ($h_{G,k}$) do gás em qualquer orifício de saída do atomizador é a mesma.

$$P_{G,k} = P_{G,sai} \quad , \quad T_{G,k} = T_{G,sai} \quad \wedge \quad h_{G,k} = h_{G,sai} \quad \forall k \in S \quad (11)$$

A atomização efervescente é realizada a baixas pressões, por esta razão, o gás de atomização é definido como um gás ideal na equação (12). Nesta equação, a pressão e a temperatura do gás na câmara de mistura são representadas por $P_{G,CM}$ e $T_{G,CM}$, respectivamente.

$$P_G = R_G \rho_G T_G$$

$$\forall P_G \in [P_{G,sai}, P_{G,CM}] = D_{P,G} \quad \wedge \quad \forall T_G \in [T_{G,sai}, T_{G,CM}] = D_{T,G} \quad (12)$$

Substituindo a equação (11) na equação (12) é obtida a equação (13).

$$\rho_{G,k} = \rho_{G,sai} \quad \forall k \in S \quad (13)$$

A transformação termodinâmica do gás desde a câmara de mistura até o orifício de saída do atomizador é assumida que tem um comportamento politrópico, sendo “p” o índice politrópico. A relação entre a pressão e a massa específica do gás para o processo politrópico é estabelecida na equação (14).

$$P_G \propto \rho_G^p \quad \forall P_G \in D_{P,G} \quad \wedge \quad \forall p \in R \quad (14)$$

Quatro variáveis adimensionais relacionadas à pressão e a temperatura do líquido e do gás são definidas na equação (15).

$$\pi_{P,L} = \frac{P_L}{P_{L,CM}} \quad , \quad \pi_{T,L} = \frac{T_L}{T_{L,CM}} \quad , \quad \pi_{P,G} = \frac{P_G}{P_{G,CM}} \quad , \quad \pi_{T,G} = \frac{T_G}{T_{G,CM}} \quad (15)$$

$$\forall P_L \in D_{P,L} \quad , \quad \forall T_L \in D_{T,L} \quad , \quad \forall P_G \in D_{P,G} \quad \wedge \quad \forall T_G \in D_{T,G}$$

As vazões mássicas do líquido ($\dot{m}_L$) e do gás ($\dot{m}_G$) são definidas em função da sua massa específica e vazão volumétrica na câmara de mistura na equação (16). As vazões volumétricas do líquido e do gás na câmara de mistura são representadas por $\dot{Q}_{L,CM}$ e $\dot{Q}_{G,CM}$, respectivamente.

$$\dot{m}_L = \rho_L \dot{Q}_{L,CM} \quad , \quad \dot{Q}_{L,CM} = \iint_{S_{L,CM}} V_{L,CM} dA_L \quad ,$$

$$\dot{m}_G = \rho_{G,CM} \dot{Q}_{G,CM} \quad \wedge \quad \dot{Q}_{G,CM} = \iint_{S_{G,CM}} V_{G,CM} dA_G \quad (16)$$

Substituindo algumas variáveis físicas e operacionais na equação (6) é obtida uma nova expressão de $\beta_{G,CM}$ que é apresentada na equação (17).

$$\beta_{G,CM} = \frac{R_G T_{G,CM} \rho_L GLR}{P_{G,CM} + R_G T_{G,CM} \rho_L GLR} \quad (17)$$

As vazões volumétricas de saída do líquido ($\dot{q}_{L,k}$) e do gás ($\dot{q}_{G,k}$) no orifício de saída do atomizador número “k” são definidas na equação (18). Nesta equação também são definidas as vazões volumétricas totais de saída do líquido ($\dot{Q}_{L,sai}$) e do gás ($\dot{Q}_{G,sai}$).

$$\begin{aligned} \dot{q}_{L,k} &= \iint_{S_{L,k}} V_{L,k} dA_L \quad \wedge \quad \dot{q}_{G,k} = \iint_{S_{G,k}} V_{G,k} dA_G \quad \forall k \in S, \\ \dot{Q}_{L,sai} &= \sum_{k=1}^e \dot{q}_{L,k} \quad \wedge \quad \dot{Q}_{G,sai} = \sum_{k=1}^e \dot{q}_{G,k} \end{aligned} \quad (18)$$

Na equação (19) é assumido que as vazões volumétricas de saída do líquido e do gás em todos os orifícios de saída do atomizador são iguais em cada caso, portanto, todas as frações volumétricas do líquido e do gás são iguais em cada caso. Adicionalmente é demonstrado que a fração volumétrica do líquido e do gás em qualquer orifício de saída do atomizador é igual à fração volumétrica do líquido e do gás no orifício de saída do escoamento núcleo-anular.

$$\begin{aligned} \dot{q}_{L,k} &= \dot{q}_{L,sai} \quad , \quad \dot{q}_{G,k} = \dot{q}_{G,sai} \quad , \quad \beta_{L,k} = \frac{\dot{q}_{L,sai}}{\dot{q}_{L,sai} + \dot{q}_{G,sai}} \quad , \quad \beta_{G,k} = \frac{\dot{q}_{G,sai}}{\dot{q}_{L,sai} + \dot{q}_{G,sai}} \quad , \\ \beta_{L,sai} &= \frac{\dot{Q}_{L,sai}}{\dot{Q}_{L,sai} + \dot{Q}_{G,sai}} = \beta_{L,k} \quad \wedge \quad \beta_{G,sai} = \frac{\dot{Q}_{G,sai}}{\dot{Q}_{L,sai} + \dot{Q}_{G,sai}} = \beta_{G,k} \quad \forall k \in S \end{aligned} \quad (19)$$

3.1.4 Aplicação da lei de Young-Laplace

Para um escoamento bifásico líquido-gás no interior de uma tuberia horizontal ou vertical existem diferentes padrões, dos quais o padrão núcleo-anular considera-se um bom padrão para representar o fluir contínuo do escoamento bifásico devido que o gás e líquido escoam pela região central e anular na tuberia, respectivamente. A superfície que separa as duas fases é denominada interface. Uma importante característica do escoamento núcleo-anular é que pode ser definido um diâmetro de interface (d_i). A aplicação da lei de Young-Laplace (LANDAU; LIFSHITZ, 1987) para um escoamento núcleo-anular líquido-gás em regime permanente é apresentada na equação (20). A lei de Young-Laplace é utilizada para determinar a relação entre as pressões do líquido e do gás em um escoamento núcleo-anular.

$$P_G - P_L = \frac{\gamma}{\frac{d_i}{2}} \quad (20)$$

Na equação (21) é apresentada a equação adimensional da equação (20). Nesta equação é estabelecido que $\pi_d = d_i/d_o$ e $\pi_\gamma = 2\gamma/(P_{L,CM}d_o)$.

$$\left[\left(\frac{P_{G,CM}}{P_{L,CM}} \right) \pi_{P,G} - \pi_{P,L} \right] \pi_d - \pi_\gamma = 0 \quad (21)$$

A estimativa de π_γ para alguns líquidos são apresentados na Tabela 3. As tensões superficiais apresentadas nesta tabela são selecionadas de Lefebvre e McDonell (2017). Para maiores valores de $P_{L,CM}$ são obtidos menores valores de π_γ .

Tabela 3 - Tensões superficiais adimensionais de alguns líquidos

Líquido	Temperatura [°C]	Tensão superficial [kg/s ²]	$P_{L,CM}$ [MPa]	π_γ [-]		
				$d_o = 0,5 \text{ mm}$	$d_o = 1,0 \text{ mm}$	$d_o = 1,5 \text{ mm}$
Água	25	0,072	0,2	1,44E-03	7,20E-04	4,80E-04
Diesel	15	0,024	0,2	4,80E-04	2,40E-04	1,60E-04
Querosene	20	0,026	0,2	5,20E-04	2,60E-04	1,73E-04
Etanol	20	0,023	0,2	4,60E-04	2,30E-04	1,53E-04

Fonte: Produção do próprio autor.

Dos resultados apresentados na Tabela 3, é observado que $\pi_\gamma \approx 0$, por esta razão, é realizada a suposição apresentada na equação (22).

$$\pi_\gamma = 0 \quad (22)$$

Substituindo a equação (22) na equação (21) é obtida a equação (23).

$$\left(\frac{P_{G,CM}}{P_{L,CM}} \right) \pi_{P,G} = \pi_{P,L} \quad (23)$$

Para a atomização efervescente acontece que $P_{G,CM} \approx P_{L,CM}$ devido a que para a injeção do gás na câmara de mistura interna do atomizador é necessário que a pressão do

gás seja alguns kilopascals maior que a pressão do líquido. Por esta razão, é realizada a suposição apresentada na equação (24).

$$P_{G,CM} = P_{L,CM} = P_{CM} \quad (24)$$

Substituindo a equação (24) na equação (23) é obtida a equação (25).

$$\pi_{P,G} = \pi_{P,L} = \pi_P \quad / \quad \pi_{P,G,sai} = \pi_{P,L,sai} = \pi_{P,sai} \quad (25)$$

Substituindo a equação (24) na equação (25) é obtida a equação (26).

$$P_G = P_L = P_{Bi} \quad / \quad P_{G,sai} = P_{L,sai} = P_{Bi,sai} \quad (26)$$

Devido às anteriores suposições estabelecidas em relação à pressão bifásica (P_{Bi}) e a pressão na câmara de mistura dos fluidos (P_{CM}) é obtida a equação (27).

$$\pi_P = \frac{P_{Bi}}{P_{CM}} \quad (27)$$

3.1.5 Teorema de Transporte de Reynolds

Para o desenvolvimento do modelo núcleo-anular frio é utilizado o método de volume de controle que consiste na aplicação do Teorema de Transporte de Reynolds (ÇENGEL; CIMBALA, 2014) para um volume selecionado (sistema contínuo). O Teorema de Transporte de Reynolds é apresentado na equação (28), sendo N qualquer variável extensiva relativa a todo o sistema, e η a correspondente variável intensiva, ou seja, é N por unidade de massa.

$$\iint_{SC} \eta (\rho \vec{V} \cdot \vec{n}) dA + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC} \eta \rho dV = \frac{DN}{Dt} \quad (28)$$

Separadamente e conjuntamente no escoamento líquido e gasoso, são estabelecidos volumes de controle para suas análises. Todos os volumes de controle são estudados em relação a um sistema de referência inercial. Por outro lado, uma condição cinemática aplicada às superfícies de entrada e saída do escoamento núcleo-anular é apresentada na

equação (29), sendo $\vec{n}$ o vetor normal relativo a um determinado ponto da superfície de controle.

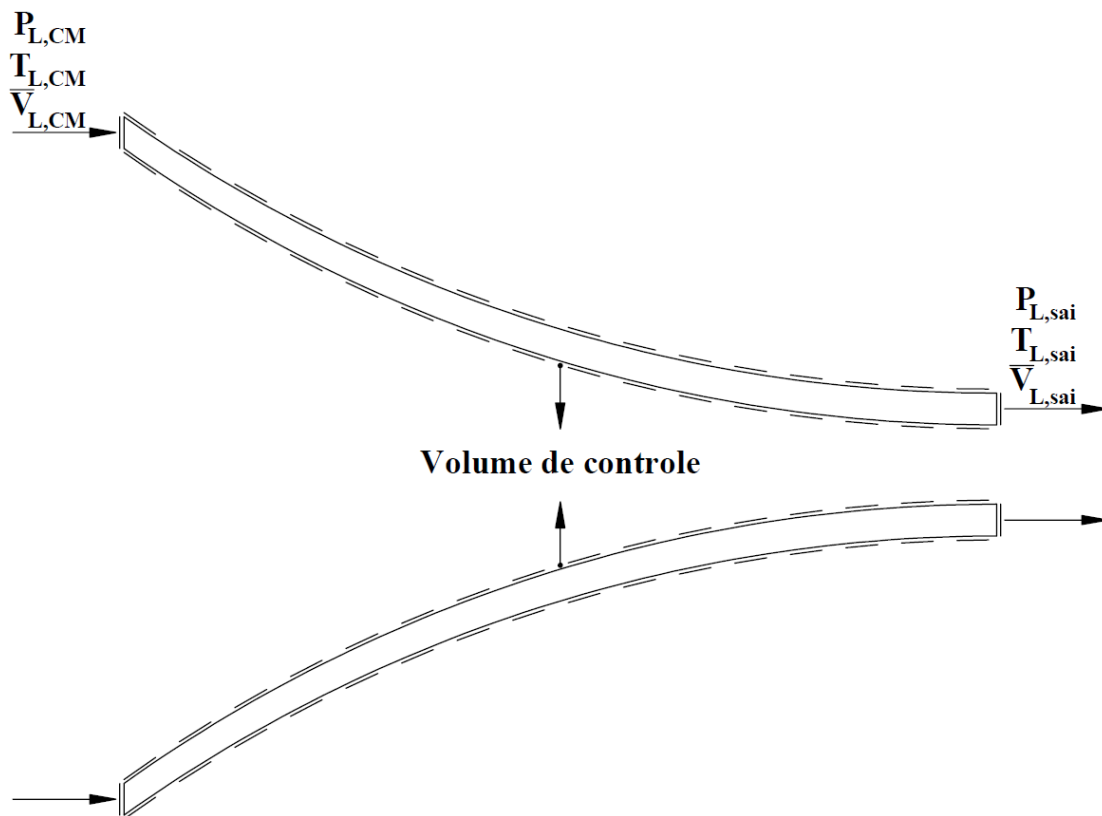
$$\vec{V} \times \vec{n} = 0 \quad (29)$$

3.1.6 Aplicação da equação de conservação da massa

3.1.6.1 Conservação da vazão volumétrica do líquido

Para a aplicação da conservação de massa do líquido, é necessário estabelecer um volume de controle do escoamento líquido. O volume de controle do escoamento líquido é um volume em forma de coroa cilíndrica com a superfície lateral externa sendo uma superfície convexa e a superfície interna sendo uma superfície côncava. O volume de controle do escoamento líquido é definido pela superfície interna do bocal, a superfície de interface e as superfícies do líquido que fazem parte das superfícies da seção transversal de entrada e saída do escoamento núcleo-anular. O volume de controle do escoamento líquido é apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Volume de controle do escoamento líquido



Fonte: Elaborado pelo autor

A aplicação da equação de conservação da massa ($\eta = 1$) do líquido mostrado na Figura 9 é apresentada na equação (30).

$$\iint_{SC_L} \rho_L \vec{V} \cdot \vec{n} dA_L + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC_L} \rho_L dV_L = 0 \quad (30)$$

As integrais de superfície que determinam as vazões volumétricas do líquido nas seções de entrada e saída são apresentadas na equação (31).

$$\rho_L \iint_{S_{L,sai}} V_{L,sai} dA_L - \rho_L \iint_{S_{L,CM}} V_{L,CM} dA_L = 0 \quad (31)$$

Depois de algumas manipulações algébricas da equação (31) é obtida a equação (32).

$$\dot{Q}_{L,CM} = \dot{Q}_{L,sai} = \dot{Q}_L \quad (32)$$

3.1.6.2 Espessura do líquido no orifício de saída

Utilizando a equação (3) é estimada a espessura do líquido (δ_{Esp}) no orifício de saída que é apresentada na equação (33).

$$\delta_{Esp} = 0,5d_{o,sai} \left(1 - \sqrt{\alpha_{G,sai}}\right) \quad (33)$$

A fração superficial do gás no orifício de saída em função da espessura do líquido é apresentada na equação (34).

$$\alpha_{G,sai} = \left(1 - \frac{2\delta_{Esp}}{d_{o,sai}}\right)^2 \quad (34)$$

3.1.6.3 Velocidades dos fluidos na câmara de mistura

As velocidades do líquido ($\bar{V}_{L,CM}$) e do gás ($\bar{V}_{G,CM}$) na câmara de mistura são apresentadas na equação (35).

$$\bar{V}_{L,CM} = \frac{\dot{Q}_L}{(1 - \alpha_{G,CM}) A_{CM}} \quad \wedge \quad \bar{V}_{G,CM} = \frac{\dot{Q}_{G,CM}}{\alpha_{G,CM} A_{CM}} \quad (35)$$

3.1.6.4 Velocidade do líquido no orifício de saída

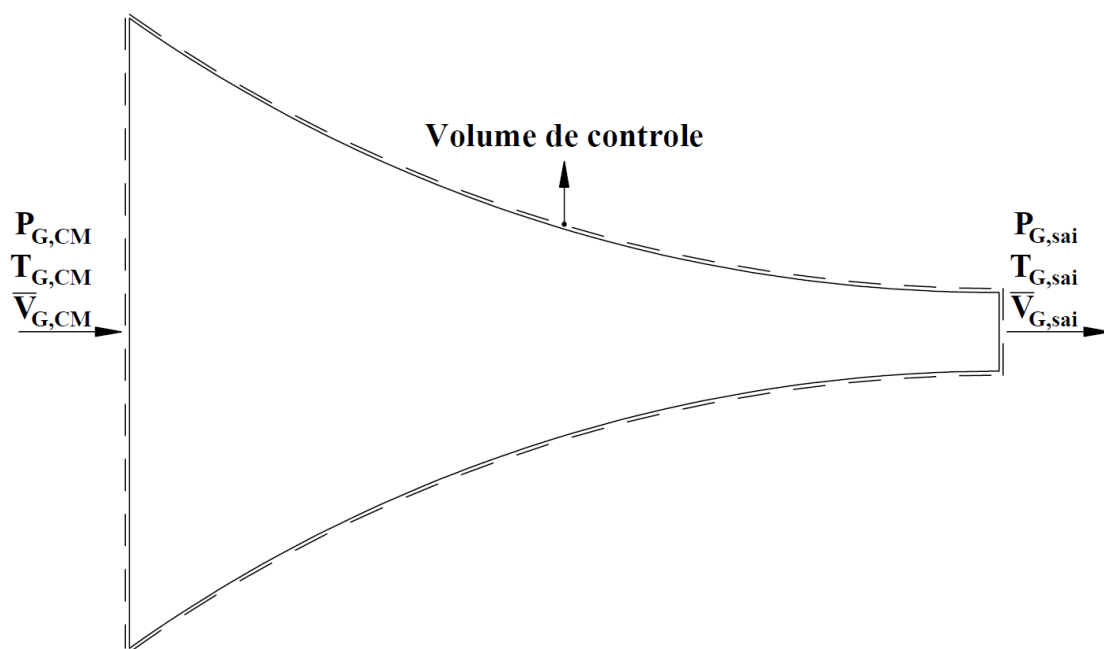
A velocidade do líquido ($\bar{V}_{L,sai}$) no orifício de saída é apresentada na equação (36).

$$\bar{V}_{L,sai} = \frac{\dot{Q}_L}{(1 - \alpha_{G,sai}) A_{Sai}} \quad (36)$$

3.1.6.5 Pressão bifásica adimensional

Para a aplicação da conservação de massa do gás, é necessário estabelecer um volume de controle do escoamento gasoso. O volume de controle do escoamento gasoso é um volume em forma de cone truncado com uma superfície lateral convexa. O volume de controle do escoamento gasoso é definido pela superfície de interface e as superfícies do gás que fazem parte das superfícies da seção transversal de entrada e saída do escoamento núcleo-anular. O volume de controle do escoamento gasoso é mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Volume de controle do escoamento gasoso



Fonte: Elaborado pelo autor

A aplicação da equação de conservação da massa ($\eta = 1$) do gás mostrado na Figura 10 é apresentada na equação (37).

$$\iint_{SC_G} \rho_G \vec{V} \cdot \vec{n} dA_G + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC_G} \rho_G dV_G = 0 \quad (37)$$

As integrais de superfície que determinam as vazões volumétricas do gás nos orifícios de entrada e saída do gás são apresentadas na equação (38).

$$\rho_{G,sai} \iint_{S_{G,sai}} V_{G,sai} dA_G - \rho_{G,CM} \iint_{S_{G,CM}} V_{G,CM} dA_G = 0 \quad (38)$$

A partir da equação (38) obtém-se a equação (39). A relação adimensional apresentada nesta equação é uma importante relação para um escoamento bifásico líquido-gás.

$$\pi_{P,sai} = \left[\left(\frac{\beta_{G,CM}}{1-\beta_{G,CM}} \right) \left(\frac{1-\beta_{G,sai}}{\beta_{G,sai}} \right) \right]^p \quad (39)$$

A partir da equação (39) é estabelecida de maneira geral a pressão bifásica adimensional na equação (40).

$$\pi_P = \left[\left(\frac{\beta_{G,CM}}{1-\beta_{G,CM}} \right) \left(\frac{1-\beta_G}{\beta_G} \right) \right]^p \quad (40)$$

3.1.6.6 Análise do índice politrópico

No interior do atomizador é produzida uma diminuição da pressão (SOVANI; SOJKA; LEFEBVRE, 2001), por esta razão, a pressão bifásica adimensional está restrita a uma faixa que é estabelecida na equação (41).

$$0 \leq \pi_P \leq 1 \quad (41)$$

Depois de algumas manipulações algébricas da equação (41) é obtida a equação (42).

$$0 \leq \left(\frac{\beta_{G,CM} - \beta_{G,CM}\beta_G}{\beta_G - \beta_{G,CM}\beta_G} \right)^p \leq 1 \quad (42)$$

Para que se cumpra a restrição apresentada na equação (42), existem duas possibilidades em relação ao índice politrópico: (1) Se $p \geq 0$, e (2) Se $p < 0$. Se $p \geq 0$, então é estabelecida a equação (43).

$$\beta_{G,CM} \leq \beta_G \quad (43)$$

Se $p < 0$, então é estabelecida a equação (44).

$$\beta_G < \beta_{G,CM} \quad (44)$$

3.1.6.7 Temperatura adimensional do gás

Na equação (27), substituindo P_{Bi} e P_{CM} em função das massas específicas $\rho_{G,CM}$ e ρ_G , as temperaturas $T_{G,CM}$ e T_G , e a constante do gás R_G , obtém-se a equação (45).

$$\frac{T_G}{T_{G,CM}} = \left(\frac{\rho_{G,CM}}{\rho_G} \right) \pi_p \quad (45)$$

Substituindo a relação politrópica do gás na equação (45) é obtida a equação (46).

$$\pi_{T,G} = \left(\sqrt[p]{\frac{P_{CM}}{P_{Bi}}} \right) \pi_p \quad (46)$$

Substituindo a equação (40) na equação (46) obtém-se a temperatura adimensional do gás ($\pi_{T,G}$) estabelecida na equação (47).

$$\pi_{T,G} = \left[\left(\frac{\beta_{G,CM}}{1 - \beta_{G,CM}} \right) \left(\frac{1 - \beta_G}{\beta_G} \right) \right]^{p-1} \quad (47)$$

Observa-se que, a relação entre a temperatura adimensional do gás e a pressão bifásica adimensional é a mesma que em um escoamento monofásico gasoso.

3.1.6.8 Velocidade do gás no orifício de saída

Para a determinação da velocidade do gás no orifício de saída é utilizada a equação (38) obtendo-se a equação (48).

$$\iint_{S_{G,sai}} V_{G,sai} dA_G = \frac{\rho_{G,CM} \dot{Q}_{G,CM}}{\rho_{G,sai}} \quad (48)$$

Depois de algumas manipulações algébricas da equação (48) é obtida a equação (49).

$$\bar{V}_{G,sai} = \frac{\dot{Q}_L}{\alpha_{G,sai} A_{Sai}} \left(\frac{\beta_{G,sai}}{1 - \beta_{G,sai}} \right) \quad (49)$$

3.1.6.9 Massa específica bifásica adimensional

A massa específica bifásica adimensional (π_p) é definida na equação (50).

$$\pi_p = \frac{\rho_{Bi}}{\rho_{CM}} \quad (50)$$

sendo:

$$\rho_{CM} = (1 - \beta_{G,CM}) \rho_L + \beta_{G,CM} \rho_{G,CM} \quad (51)$$

$$\rho_{Bi} = (1 - \beta_G) \rho_L + \beta_G \rho_G \quad (52)$$

Substituindo a relação politrópica do gás na equação (52), obtém-se a equação (53).

$$\rho_{Bi} = (1 - \beta_G) \rho_L + \beta_G \rho_{G,CM} \sqrt[p]{\pi_p} \quad (53)$$

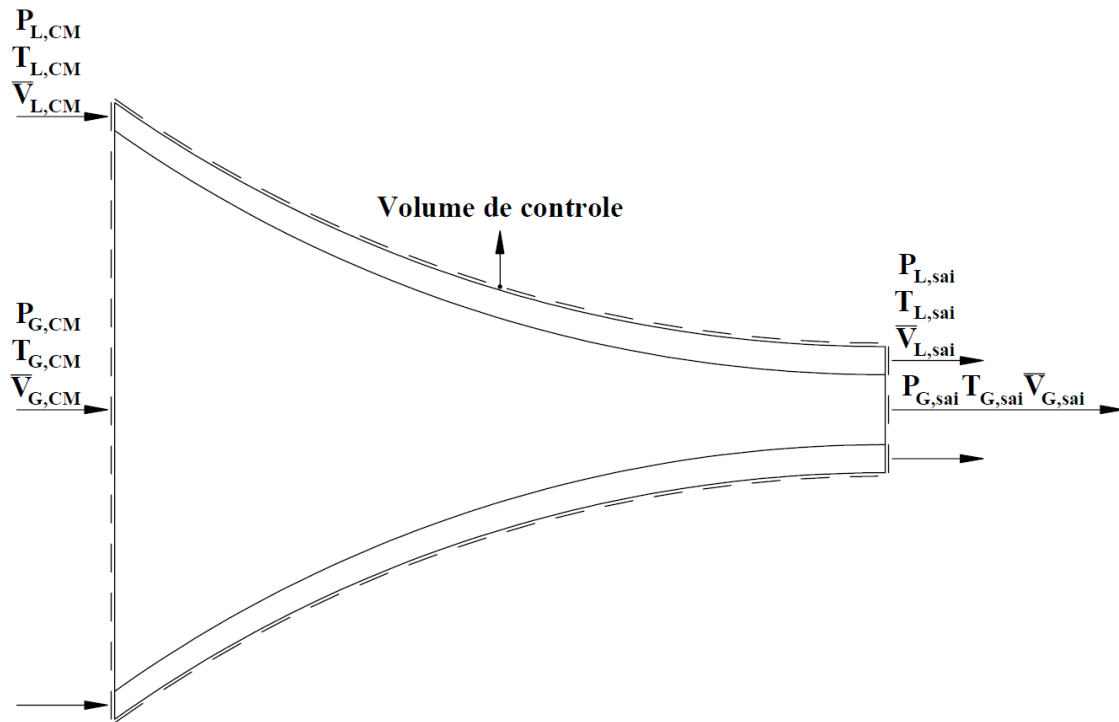
Substituindo a equação (40) na equação (53), obtém-se a massa específica bifásica adimensional, a qual é apresentada na equação (54).

$$\pi_p = \frac{1 - \beta_G}{1 - \beta_{G,CM}} \quad (54)$$

3.1.7 Aplicação da equação de conservação da energia

Para a aplicação da equação de conservação da energia, o volume de controle do escoamento núcleo-anular é apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Volume de controle do escoamento núcleo-anular



Fonte: Elaborado pelo autor

Algumas suposições são realizadas. A taxa de transferência de energia por calor que atravessa a superfície de controle (E_{Cal}) e o trabalho de eixo no volume de controle (E_{Tra}) são assumidas nulas na equação (55). É importante mencionar que através das superfícies de entrada e saída do escoamento núcleo-anular no volume de controle não existe transferência de calor.

$$E_{Cal} = 0 \quad \wedge \quad E_{Tra} = 0 \quad (55)$$

As mudanças da energia potencial do líquido (ΔEp_L) e do gás (ΔEp_G) são desprezíveis, por esta razão na equação (56) é assumido que as mudanças da energia potencial para ambos os fluidos são nulas.

$$\Delta Ep_L = 0 \quad \wedge \quad \Delta Ep_G = 0 \quad (56)$$

Devido à falta de resultados experimentais da fração superficial do gás na câmara de mistura em um atomizador efervescente, é realizada uma suposição razoável que é apresentada na equação (57).

$$\alpha_{G,CM} = 0,5 \quad (57)$$

Os coeficientes de energia cinética do líquido (λ_L) e do gás (λ_G) são definidos na equação (58).

$$\lambda_L = \frac{1}{A_L} \iint_{S_L} \left(\frac{V_L}{V_L} \right)^3 dA_L \quad \wedge \quad \lambda_G = \frac{1}{A_G} \iint_{S_G} \left(\frac{V_G}{V_G} \right)^3 dA_G \quad (58)$$

Devido a que o escoamento bifásico tanto na câmara de mistura e no orifício de saída do atomizador são turbulentos, é realizada a suposição apresentada na equação (59).

$$\lambda_{L,CM} = \lambda_{G,CM} = \lambda_{L,sai} = \lambda_{G,sai} = 1,05 \quad (59)$$

A aplicação da equação de conservação da energia ($\eta = u + P_{Bi}/\rho + V^2/2$) para o escoamento núcleo-anular mostrado na Figura 11 é apresentada na equação (60), sendo “u” a energia interna específica.

$$\iint_{SC} \left(u + \frac{P_{Bi}}{\rho} + \frac{V^2}{2} \right) \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC} \left(u + \frac{P_{Bi}}{\rho} + \frac{V^2}{2} \right) \rho dV = \frac{DE}{Dt} \quad (60)$$

Os termos E_{Cal} e E_{Tra} dos quais depende a taxa de transferência de energia no tempo do volume de controle (DE/Dt) são apresentados na equação (61).

$$\iint_{SC} \left(u + \frac{P_{Bi}}{\rho} + \frac{V^2}{2} \right) \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA = E_{Cal} - E_{Tra} \quad (61)$$

As contribuições energéticas do líquido e do gás nas superfícies de entrada e de saída do volume de controle são apresentadas na equação (62).

$$\begin{aligned}
0 = & \iint_{S_{L,CM}} \left(u_{L,CM} + \frac{P_{CM}}{\rho_L} + \frac{V_{L,CM}^2}{2} \right) \rho_L \vec{V}_{L,CM} \cdot \vec{n}_{L,CM} dA_L + \\
& \iint_{S_{G,CM}} \left(h_{G,CM} + \frac{V_{G,CM}^2}{2} \right) \rho_{G,CM} \vec{V}_{G,CM} \cdot \vec{n}_{G,CM} dA_G + \\
& \iint_{S_{L,sai}} \left(u_{L,sai} + \frac{P_{L,sai}}{\rho_L} + \frac{V_{L,sai}^2}{2} \right) \rho_L \vec{V}_{L,sai} \cdot \vec{n}_{L,sai} dA_L + \\
& \iint_{S_{G,sai}} \left(h_{G,sai} + \frac{V_{G,sai}^2}{2} \right) \rho_{G,sai} \vec{V}_{G,sai} \cdot \vec{n}_{G,sai} dA_G
\end{aligned} \tag{62}$$

As suposições anteriormente estabelecidas são utilizadas no desenvolvimento algébrico posterior à equação (62) para obter uma importante relação energética apresentada na equação (63).

$$\rho_L (1 - \beta_{G,CM}) \Delta E_L + \rho_{G,CM} \beta_{G,CM} \Delta E_G = 0 \tag{63}$$

sendo:

$$\Delta E_L = \frac{\lambda_{L,sai} \bar{V}_{L,sai}^2}{2} - \frac{\lambda_{L,CM} \bar{V}_{L,CM}^2}{2} + \frac{P_{CM}}{\rho_L} (\pi_{P,sai} - 1) + \bar{c}_{v,L} T_{L,CM} (\pi_{T,L,sai} - 1) \tag{64}$$

$$\Delta E_G = \frac{\lambda_{G,sai} \bar{V}_{G,sai}^2}{2} - \frac{\lambda_{G,CM} \bar{V}_{G,CM}^2}{2} + \bar{c}_{p,G} T_{G,CM} (\pi_{T,G,sai} - 1) \tag{65}$$

Da equação (63) pode-se obter duas interessantes conclusões apresentadas na equação (66).

$$(\beta_{G,CM} = 0 \Rightarrow \Delta E_L = 0) \wedge (\beta_{G,CM} = 1 \Rightarrow \Delta E_G = 0) \tag{66}$$

As duas conclusões são: (1) Se $\beta_{G,CM} = 0$, então no interior do bocal estaria fluindo unicamente um escoamento monofásico líquido, para o qual teria que cumprir-se $\Delta E_L = 0$; (2) Se $\beta_{G,CM} = 1$, então no interior do bocal estaria fluindo unicamente um escoamento monofásico gasoso, para o qual teria que cumprir-se $\Delta E_G = 0$.

3.1.8 Definição do modelo de escoamento núcleo-anular frio

Nesta seção é definido um modelo de escoamento núcleo-anular frio para o escoamento bifásico no interior de um atomizador efervescente. Quando no modelo de escoamento bifásico é suposto que não existe transferência de calor entre ambas as fases é denominado modelo de escoamento bifásico frio (JEDELSKY et al., 2009). Esta suposição tem uma importante consequência na aplicação da equação de conservação da energia para um escoamento bifásico, da qual originam-se que $\Delta E_L = 0$ e $\Delta E_G = 0$. Neste trabalho é proposto desenvolver um modelo de escoamento núcleo-anular frio.

A atomização efervescente é um processo caracterizado essencialmente por transformações termodinâmicas isotérmicas (JEDELSKY et al., 2009). Em um modelo de escoamento núcleo-anular frio é razoável assumir uma transformação isotérmica do líquido mediante a suposição de $\pi_{T,L,sai} = 1$, mas assumir uma transformação isotérmica do gás implica que $p = 1$ ($\pi_{T,G,sai} = 1$) o qual não é possível por produzir que a velocidade do gás no orifício de saída seja igual a zero. Das equações $\Delta E_L = 0$ e $\Delta E_G = 0$ são isoladas as velocidades do líquido e do gás no orifício de saída as quais são apresentadas nas equações (67) e (68), respectivamente.

$$\bar{V}_{L,sai} = \sqrt{\frac{2P_{CM}}{\lambda_{L,sai}\rho_L}(1-\pi_{P,sai}) + \left(\frac{\lambda_{L,CM}}{\lambda_{L,sai}}\right)\bar{V}_{L,CM}^2} \quad (67)$$

$$\bar{V}_{G,sai} = \sqrt{\frac{2\bar{c}_{p,G}T_{G,CM}}{\lambda_{G,sai}}(1-\pi_{T,G,sai}) + \left(\frac{\lambda_{G,CM}}{\lambda_{G,sai}}\right)\bar{V}_{G,CM}^2} \quad (68)$$

Igualando as equações (36) e (49) com as equações (67) e (68), respectivamente, são obtidas as equações (69) e (70).

$$\frac{\dot{Q}_L}{(1-\alpha_{G,sai})A_{Sai}} - \sqrt{\frac{2P_{CM}}{\lambda_{L,sai}\rho_L}(1-\pi_{P,sai}) + \left(\frac{\lambda_{L,CM}}{\lambda_{L,sai}}\right)\bar{V}_{L,CM}^2} = 0 \quad (69)$$

$$\frac{\dot{Q}_L}{\alpha_{G,sai}A_{Sai}} \left(\frac{\beta_{G,sai}}{1-\beta_{G,sai}}\right) - \sqrt{\frac{2\bar{c}_{p,G}T_{G,CM}}{\lambda_{G,sai}}(1-\pi_{T,G,sai}) + \left(\frac{\lambda_{G,CM}}{\lambda_{G,sai}}\right)\bar{V}_{G,CM}^2} = 0 \quad (70)$$

O sistema de equações definido pelas equações (69) e (70) contém três variáveis estimadas no orifício de saída que são: (1) Fração superficial do gás, (2) Fração volumétrica do gás, e (3) Índice politrópico.

3.2 MODELO ADIMENSIONAL

O atual t3pico tem por objetivo propor um m3todo para o desenvolvimento de um modelo adimensional que permita obter estimativas dos resultados experimentais de alguma vari3vel. Os resultados experimentais servem para o estabelecimento das vari3veis (grupos) adimensionais definidas pela an3lise dimensional.

3.2.1 Modelo adimensional mon3mico

3.2.1.1 Modelo adimensional geral

O modelo adimensional geral 3 apresentado pela fun33o ${}_M\pi_1$ na equa33o (71). Nessa equa33o, o s3mbolo π_i denota as vari3veis adimensionais independentes. Pode-se observar tamb3m na equa33o (71) que o modelo adimensional geral inclui de maneira compacta 3s vari3veis adimensionais independentes. O n3mero “n” indica o n3mero de termos que possui o modelo adimensional geral e o n3mero “m - 1” indica o n3mero de vari3veis adimensionais independentes.

$${}_M\pi_1 : \xi \in \mathbb{R}^{mn} \rightarrow {}_M\pi_1(\xi) = {}_M\pi_1 = \sum_{j=1}^n a_j \left[\prod_{i=2}^m (\pi_i^{e_{j,i}}) \right] \in \mathbb{R} \quad (71)$$

sendo:

$$\xi = (a_1, \dots, a_j, \dots, a_n, e_{1,2}, \dots, e_{j,i}, \dots, e_{n,m}) \quad \begin{aligned} &a_j \neq 0, \forall i \in S_i / S_i = [1, m] \cap \mathbb{Z} \\ &\wedge \forall j \in S_j / S_j = [1, n] \cap \mathbb{Z} \end{aligned} \quad (72)$$

Estabelece-se que $\pi_i > 0$ e ${}_M\pi_1 > 0$. O estabelecimento de um modelo adimensional 3 particularizado pelos experimentos realizados, portanto, tamb3m pelo n3mero de resultados experimentais. O conjunto de valores de π_i 3 definido como estado experimental. Adicionalmente, para qualquer estado experimental n3mero “k” ($\forall k \in S_k / S_k = [1, p] \cap \mathbb{Z}$) individualizado pelos valores de π_i representados neste caso por ${}_k\pi_i$, 3 associado um resultado experimental representado por ${}_E,k\pi_1$ e um resultado te3rico (obtido do modelo adimensional) representado por ${}_M,k\pi_1$. As aplica33es de ${}_M\pi_1$ para um n3mero de “p” estados experimentais s3o apresentadas nas equa33es (73) – (75).

$${}_M,1\pi_1 = a_1 \prod_{i=2}^m ({}_1\pi_i^{e_{1,i}}) + \dots + a_j \prod_{i=2}^m ({}_1\pi_i^{e_{j,i}}) + \dots + a_n \prod_{i=2}^m ({}_1\pi_i^{e_{n,i}}) \quad (73)$$

O símbolo ψ representa uma função bijectiva. Geralmente, a função identidade é utilizada, mas, no presente estudo, optou-se por utilizar a função $\psi = \ln$ por ser considerada mais conveniente. Por outro lado, como não existe alguma restrição de igualdade (para utilizar os multiplicadores de Lagrange) ou de desigualdade (para utilizar os multiplicadores de Kuhn-Tucker) para os expoentes $e_{j,i}$, um possível valor mínimo da função objetivo $F_{\text{Obj},1}$ é caracterizado por $\nabla F_{\text{Obj},1} = 0$. O gradiente da função objetivo $F_{\text{Obj},1}$ é apresentado na equação (78), representando a variável “x” qualquer variável contida em ξ .

$$\sum_{k=1}^p \left\{ \frac{\left[\ln({}_{E,k}\pi_1) - \ln({}_{M,k}\pi_1) \right]}{{}_{M,k}\pi_1} \left(\frac{\partial {}_{M,k}\pi_1}{\partial x} \right) \right\} = 0 \quad (78)$$

Devido à necessidade de determinar $\ln({}_{M,k}\pi_1)$, a maneira mais simples para isso é assumir que $n = 1$ porque assumir outro valor produz complicações no cálculo de $\ln({}_{M,k}\pi_1)$. Nas equações (79) e (80) são calculados $\ln({}_{M,k}\pi_1)$ e ${}_{M,k}\pi_1$, respectivamente. As equações (79) e (80) são obtidas da equação (71) depois de assumir que $n = 1$.

$$\ln({}_{M,k}\pi_1) = \ln(a_1) + \sum_{i=2}^m e_{1,i} \ln({}_k\pi_i) \quad (79)$$

$${}_{M,k}\pi_1 = e^{\ln(a_1) + \sum_{i=2}^m e_{1,i} \ln({}_k\pi_i)} \quad (80)$$

Substituindo a equação (79) na equação (77), é obtida a equação (81).

$$F_{\text{Obj},1} : \xi \in R^m \rightarrow F_{\text{Obj},1}(\xi) = F_{\text{Obj},1} = \sum_{k=1}^p \left[\ln({}_{E,k}\pi_1) - \ln(a_1) - \sum_{i=2}^m e_{1,i} \ln({}_k\pi_i) \right]^2 \quad (81)$$

Nas equações (82) e (83) são determinados $\partial F_{\text{Obj},1} / \partial a_1$ e $\partial F_{\text{Obj},1} / \partial e_{1,i}$, respectivamente.

$$\sum_{k=1}^p \left[\ln({}_{E,k}\pi_1) - \ln(a_1) - \sum_{i=2}^m e_{1,i} \ln({}_k\pi_i) \right] = 0 \quad (82)$$

$$\sum_{k=1}^p \left\{ \left[\ln({}_{E,k}\pi_1) - \ln(a_1) - \sum_{i=2}^m e_{1,i} \ln({}_k\pi_i) \right] \ln({}_k\pi_i) \right\} = 0 \quad (83)$$

O sistema de equações definido pelas equações (82) e (83) estabelece a condição necessária de otimização para um modelo adimensional. Esse sistema de equações é resolvido utilizando a ferramenta solver do programa Microsoft Excel.

3.2.1.3 Análise do modelo adimensional monômico para diferentes valores de “p” e “m”

Só existem três possibilidades relativas à relação de “p” e “m”:

1) Primeira possibilidade: $p < m$

Para $p < m$, o sistema de equações mostrado nas equações (82) e (83) poderia ser um sistema de equações compatível indeterminado (por exemplo $p = 1$ e $1 < m$) para o qual existem infinitas soluções. Assim, não é apropriado usar a condição de otimização para obter um modelo adimensional ótimo. Nesta possibilidade, recomenda-se não considerar algumas variáveis adimensionais independentes até que pelo menos o número das variáveis adimensionais seja igual ao número de estados experimentais, ou seja, $p = m$.

2) Segunda possibilidade: $p = m$

Quando $p = m$, o sistema de equações apresentado nas equações (82) e (83) é um sistema compatível determinado. Neste caso, o modelo adimensional pode calcular exatamente os resultados experimentais. Esta possibilidade é o caso mais simples entre as possibilidades apresentadas.

3) Terceira possibilidade: $p > m$

Para $p > m$, é o caso mais interessante e que estimulou o desenvolvimento deste método. Nesta possibilidade, o sistema de equações compatível determinado apresentado nas equações (82) e (83) pode ser resolvido produzindo um modelo adimensional que estime os resultados experimentais.

3.2.2 Modelo adimensional polinomial

O modelo adimensional polinomial tem por objetivo obter uma melhor estimativa dos resultados calculados pelo modelo adimensional monômico. Para estabelecer um modelo adimensional composto por dois ou mais monômios, é necessário definir um novo modelo adimensional ${}_M\pi_{n,1}$ o qual é apresentado na equação (84).

$${}_M\pi_{n,1} : \xi_n \in \mathbb{R}^m \rightarrow {}_M\pi_{n,1}(\xi_n) = {}_M\pi_{n,1} = a_n \left[\prod_{i=2}^m \left(\pi_i^{e_{n,i}} \right) \right] \in \mathbb{R} \quad (84)$$

sendo:

$$\xi_n = (a_n, e_{n,2}, \dots, e_{n,i}, \dots, e_{n,m}) \quad \forall i \in S_i \quad (85)$$

Uma segunda função objetivo, $F_{Obj,2}$, é definida na equação (86). Essa função também será minimizada. Os cálculos do coeficiente a_n e dos expoentes $e_{n,i}$ serão determinados progressivamente dependendo do número de monômios, ou seja, para o cálculo de a_n e $e_{n,i}$ correspondentes ao número de monômio “n” é necessário determinar os valores de a_{n-1} e $e_{n-1,i}$ correspondentes ao número de monômio “n - 1”. A aplicação do modelo adimensional $M\pi_{n,1}$ ao estado experimental genérico “k” é representada por $M_{k,1}\pi_{n,1}$.

$$F_{Obj,2} : \xi_n \in R^m \rightarrow F_{Obj,2}(\xi_n) = F_{Obj,2} = \sum_{k=1}^p \left[\ln \left(E_{k,1} \pi_1 - \sum_{j=1}^{n-1} M_{k,j} \pi_{j,1} \right) - \ln(a_n) - \sum_{i=2}^m e_{n,i} \ln(\pi_i) \right]^2 \in R \quad (86)$$

sendo:

$$M_{k,1} \pi_{1,1} = M_{k,1} \pi_1 \quad (87)$$

Seguindo um raciocínio semelhante ao desenvolvido na seção anterior, nas equações (88) e (89) são determinadas $\partial F_{Obj,2} / \partial a_j$ e $\partial F_{Obj,2} / \partial e_{j,i}$, respectivamente.

$$\sum_{k=1}^p \left[\ln \left(E_{k,1} \pi_1 - \sum_{j=1}^{n-1} M_{k,j} \pi_{j,1} \right) - \ln(a_n) - \sum_{i=2}^m e_{n,i} \ln(\pi_i) \right] = 0 \quad (88)$$

$$\sum_{k=1}^p \left\{ \left[\ln \left(E_{k,1} \pi_1 - \sum_{j=1}^{n-1} M_{k,j} \pi_{j,1} \right) - \ln(a_n) - \sum_{i=2}^m e_{n,i} \ln(\pi_i) \right] \ln(\pi_i) \right\} = 0 \quad (89)$$

Assim, estabeleceu-se a maneira de calcular os coeficientes $e_{n,i}$ correspondentes ao número de monômio “n”. Finalmente, é avaliado se esse modelo adimensional composto por “n” monômios tem um RMSE admissível para previsões futuras. A definição do parâmetro RMSE (indicado neste caso por $RMSE_n$) para o novo modelo adimensional $M\pi_{n,1}$ é apresentada na equação (90).

$$\text{RMSE}_n = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^p \left(E_{k,1} \pi_1 - \sum_{j=1}^n M_{k,j} \pi_{j,1} \right)^2}{p}} \quad (90)$$

3.2.3 Condição suficiente de otimização para funções convexas

Para garantir que as soluções obtidas do sistema de equações (82) e (83) e do sistema de equações (88) e (89) correspondam a um valor mínimo da função objetivo $F_{\text{Obj},1}$ e $F_{\text{Obj},2}$, respectivamente; a condição suficiente de otimização para funções convexas deve ser satisfeita. Deve-se notar que as funções $F_{\text{Obj},1}$ e $F_{\text{Obj},2}$ têm a mesma natureza, por esta razão, a função F_{Obj} é definida para representar ambas as funções. A função F_{Obj} é definida na equação (91).

$$F_{\text{Obj}} : (z_1, z_2, \dots, z_m) = \bar{z} \in \mathbb{R}^m \rightarrow F_{\text{Obj}}(\bar{z}) = F_{\text{Obj}} = \sum_{k=1}^p f_k^2(\bar{z}) \in \mathbb{R} \quad (91)$$

$$f_k : \bar{z} \in \mathbb{R}^m \rightarrow f_k(\bar{z}) = f_k = \alpha_k(\bar{z}) + \beta_k(\bar{z}) + \theta_k(\bar{z}) \in \mathbb{R} \quad (92)$$

$$\alpha_k : \bar{z} \in \mathbb{R}^m \rightarrow \alpha_k(\bar{z}) = \alpha_k = W_k \in \mathbb{R} / W_k \text{ é uma constante} \quad (93)$$

$$\beta_k : \bar{z} \in \mathbb{R}^m \rightarrow \beta_k(\bar{z}) = \beta_k = -\ln(z_1) \in \mathbb{R} \quad (94)$$

$$\theta_k : \bar{z} \in \mathbb{R}^m \rightarrow \theta_k(\bar{z}) = \theta_k = -\sum_{i=2}^m z_i \ln(\pi_i) \in \mathbb{R} \quad (95)$$

Segundo a teoria das funções contínuas convexas diferenciáveis, sabe-se que as funções constante e linear são funções convexas, razão pela qual as funções α_k e θ_k são funções convexas. A função β_k é uma função estritamente convexa devido a função $\ln(z_1)$ ser uma função estritamente côncava. Assim, a função f_k é uma soma de funções convexas com coeficientes não negativos o que resulta que a função f_k também é uma função convexa. Do teorema da composição de funções convexas, verifica-se que a função $(f_k)^2$ também é uma função convexa porque a função quadrática é uma função convexa e crescente. Portanto, F_{Obj} é uma função convexa porque essa função seria uma soma de funções convexas com coeficientes não negativos (FORST; HOFFMANN, 2010; RAO, 2009; SUN; YUAN, 2006). Desta maneira, verifica-se rigorosamente que as funções inicialmente estabelecidas são válidas para realizar as otimizações propostas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente seção é dividida em três tópicos:

- 1) Validação do modelo de escoamento núcleo-anular frio: Neste tópico são apresentados os resultados experimentais da espessura média dos ligamentos e o SMD das gotas do spray obtido da atomização efervescente realizada na pesquisa de Kourmatzis, Lowe e Masri (2017). A validação do modelo de escoamento núcleo-anular frio é realizada utilizando os resultados experimentais da espessura média dos ligamentos medidos na região próxima ao orifício de saída do atomizador efervescente.
- 2) Simulação de condições operacionais: Neste tópico é utilizado o modelo de escoamento núcleo-anular frio em diferentes condições operacionais para estimar um conjunto de variáveis físicas dos fluidos no orifício de saída do atomizador efervescente.
- 3) Modelo adimensional do diâmetro médio das gotas do spray: Neste tópico é utilizado o método desenvolvido para o estabelecimento de um modelo adimensional para estimar o diâmetro médio Integral de Sauter (ID_{32}) das gotas do spray obtido da atomização efervescente.

4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO DE ESCOAMENTO NÚCLEO-ANULAR FRIO

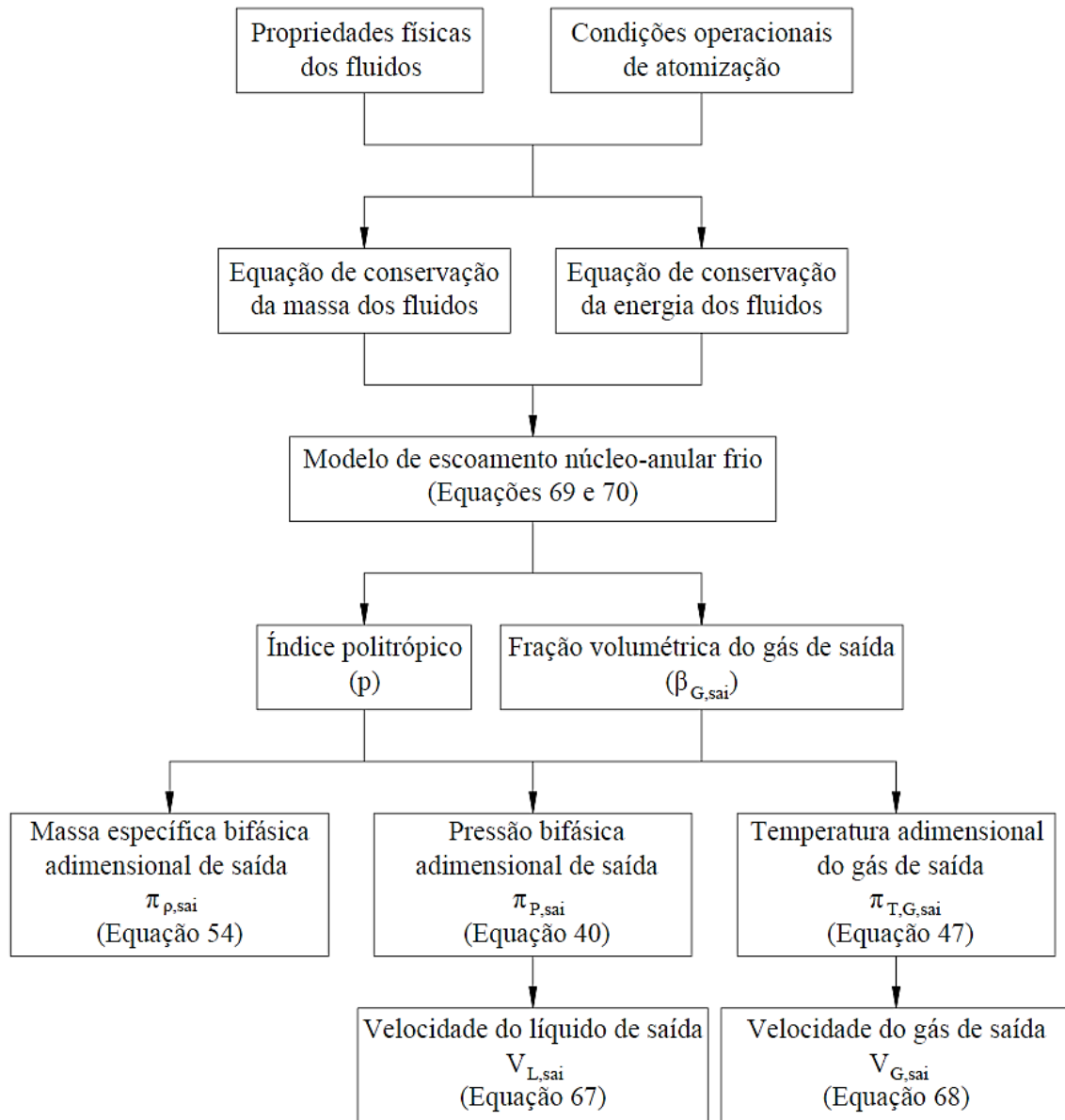
4.1.1 Procedimento de validação do modelo de escoamento núcleo-anular frio

O procedimento de validação do modelo de escoamento núcleo-anular frio é apresentado na Figura 12 e é explicado mais em detalhe a seguir:

- 1) As propriedades físicas dos fluidos e as condições operacionais de atomização são substituídas em todas as equações.
- 2) O resultado experimental da espessura média dos ligamentos medidos na região próxima ao orifício de saída é substituído na equação (34) para a estimação da fração superficial do gás no orifício de saída.
- 3) A fração superficial do gás é substituída na equação (36) para a determinação da velocidade do líquido no orifício de saída.
- 4) O sistema de equações (69) e (70) é resolvido. A solução deste sistema de equações calcula o índice politrópico e a fração volumétrica do gás no orifício de saída.
- 5) O índice politrópico e a fração volumétrica do gás no orifício de saída são substituídos nas equações (40), (47), (49) e (54) para a estimação da pressão bifásica

adimensional, temperatura adimensional do gás, velocidade do gás e massa específica bifásica adimensional, respectivamente.

Figura 12 - Esquema da validação do modelo de escoamento núcleo-anular frio



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.2 Resultados experimentais da espessura média dos ligamentos

Neste tópico são apresentados os resultados experimentais do trabalho de Kourmatzis, Lowe e Masri (2017) sobre a espessura média dos ligamentos e o SMD das gotas obtidos para cinco condições operacionais utilizando um atomizador efervescente de tipo A. Os fluidos de atomização são a água e o ar, sendo apresentadas as propriedades físicas dos fluidos na Tabela 4. O atomizador efervescente tem um diâmetro de câmara de mistura

igual a 2,0 mm, só um orifício de saída ($e = 1$) e o diâmetro do orifício de saída é igual a 0,5 mm. As medições da espessura média dos ligamentos para cada condição operacional são realizadas a uma distância axial igual a 2,5 mm desde o centro do orifício de saída do atomizador efervescente.

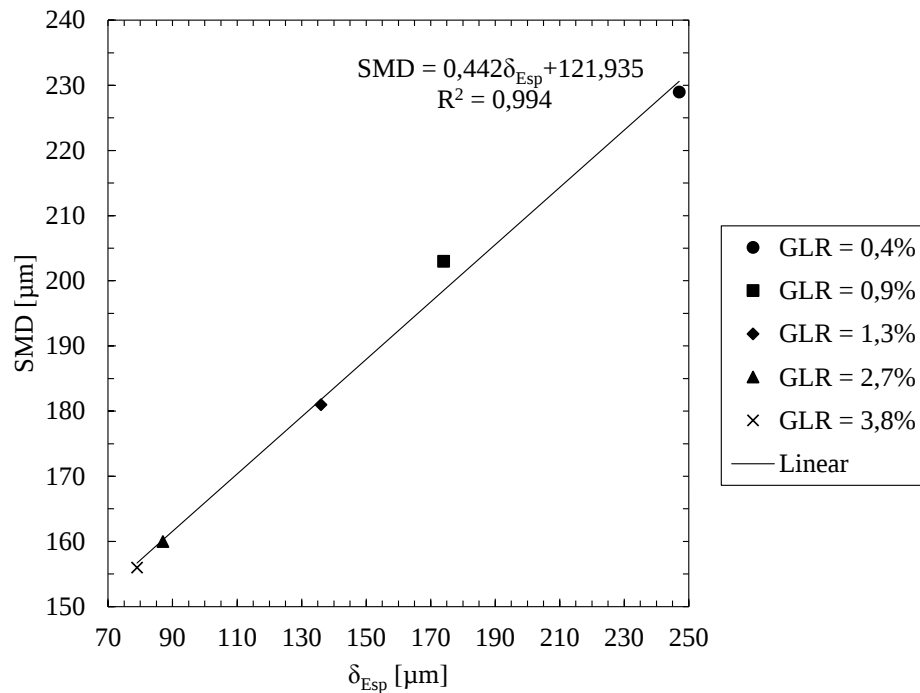
Tabela 4 - Propriedades físicas dos fluidos para a validação do modelo de escoamento núcleo-anular frio

Espécie química	Propriedade física	Valor
Água	$T_{L,CM}$ [K]	298,15
	ρ_L [kg/m ³]	997
	$c_{v,L} = c_{p,L}$ [kJ/(kg*K)]	4,183
	γ [kg/s ²]	0,072
	μ_L [kg/(m*s)]	0,00089
	$T_{G,CM}$ [K]	298,15
Ar	R [kPa*m ³ /(kmol*K)]	8,31451
	PM_G [kg/kmol]	28,96512
	R_G [kPa*m ³ /(kg*K)]	0,287
	$c_{p,G}$ [kJ/(kmol*K)]	29,102
	$c_{p,G}$ [kJ/(kg*K)]	1,005
	μ_G [kg/(m*s)]	1,82E-05

Fonte: Produção do próprio autor.

No trabalho de Kourmatzis, Lowe e Masri (2017) é observado uma notável relação linear entre o SMD das gotas do spray e a espessura média dos ligamentos, portanto, existe uma relação linear entre o SMD das gotas do spray e a espessura do líquido anular no orifício de saída do atomizador efervescente. Na Figura 13 é apresentado o SMD das gotas (obtidas a uma distância axial igual a 5,3 mm desde o centro do orifício de saída do atomizador efervescente) em função da espessura média dos ligamentos.

Figura 13 - SMD das gotas em função da espessura média dos ligamentos



Fonte: Kourmatzis, Lowe e Masri (2017)

Na pesquisa de Kourmatzis, Lowe e Masri (2017) são utilizados os valores de 0,1, 0,4, 0,9, 1,3, 2,7 e 3,8% para o parâmetro GLR, mas não é mencionada a pressão manométrica do gás para cada valor de GLR. No entanto, no trabalho de Kourmatzis, Lowe e Masri (2016) é mencionada a faixa da pressão manométrica do gás que é [15, 180 kPa]. Para a estimativa da pressão manométrica do gás para cada valor de GLR é assumido que a pressão manométrica do gás é uma função linear de GLR. Esta suposição é considerada razoável devido à faixa estreita de GLR. Para a condição operacional de GLR = 0,1% e pressão manométrica do gás igual a 15 kPa não foi possível medir a espessura média dos ligamentos e o SMD das gotas, por esta razão esta condição operacional não é utilizada no presente trabalho. Na Tabela 5 são apresentadas as condições operacionais selecionadas da pesquisa de Kourmatzis, Lowe e Masri (2017) que são utilizadas para a validação do modelo de escoamento núcleo-anular frio.

Tabela 5 - Condições operacionais para a validação do modelo de escoamento núcleo-anular frio

Caso	$\dot{m}_L$ [g/min]	$\dot{m}_G$ [g/min]	GLR [%]	$P_{CM} - P_{Atm}$ [kPa]
1	52,3	0,23	0,4	28
2	52,3	0,46	0,9	50
3	52,3	0,70	1,3	68
4	52,3	1,39	2,7	130
5	52,3	1,97	3,8	180

Fonte: Kourmatzis, Lowe e Masri (2016) e Kourmatzis, Lowe e Masri (2017).

4.1.3 Análise dos resultados da validação do modelo de escoamento núcleo-anular frio

O modelo de escoamento núcleo-anular frio é implementado no programa Excel para calcular os resultados de $\beta_{G,sai}$ e “p” utilizando o método de solução GRG Nonlinear. Os resultados da validação do modelo de escoamento núcleo-anular frio são apresentados na Tabela 6. Os resultados experimentais da espessura apresentados na última coluna da Tabela 6 são selecionados da pesquisa de Kourmatzis, Lowe e Masri (2017).

Tabela 6 - Resultados da validação do modelo de escoamento núcleo-anular frio

Caso	GLR [%]	$\beta_{G,CM}$ [-]	$\beta_{G,sai}$ [-]	p [-]	$\pi_{P,sai}$ [-]	$\pi_{T,G,sai}$ [-]	$\bar{V}_{L,sai}$ [m/s]	$\bar{V}_{G,sai}$ [m/s]	δ_{Esp} (Mod.) [μm]	δ_{Esp} (Exp.) [μm]
1	0,4	0,744	-	-	-	-	-	-	-	247
2*	0,93	0,8240	0,8243	33,36	0,925	0,927	4,961	204,059	170	174
3	1,3	0,871	0,878	1,71	0,903	0,959	5,622	153,468	136	136
4	2,7	0,907	0,917	1,19	0,865	0,977	7,745	115,355	87	87
5	3,8	0,920	0,928	1,24	0,870	0,974	8,368	122,463	79	79

*No caso 2 foi utilizado GLR = 0,93% devido a que não foi obtida uma solução para o caso de GLR = 0,9%

Fonte: Produção do próprio autor.

Os resultados apresentados na Tabela 6 são discutidos a seguir:

- Análise de $\beta_{G,sai}$: A faixa dos resultados de $\beta_{G,sai}$ é [0,8243, 0,928]. Para os casos 1 e 2 não foi possível calcular os resultados de $\beta_{G,sai}$ e “p” que determinem as espessuras de 247 e 174 μm , respectivamente. Talvez isto aconteceu porque a diferença entre $\beta_{G,sai}$ e $\beta_{G,CM}$ é menor a 0,001 produzindo algum problema de precisão na solução. Mas assumindo o valor de GLR = 0,93% (o qual é um valor próximo ao valor experimental de GLR = 0,9%) para o caso 2 foi possível calcular os resultados de $\beta_{G,sai}$ e “p”. Realizando esta suposição foi calculada a espessura de 170 μm a qual é próxima à espessura de 174 μm . A falta de precisão na estimativa da espessura do

líquido a baixos GLR talvez acontece devido ao padrão intermitente no orifício de saída do atomizador efervescente, como por exemplo, o padrão em golfadas (LIU; DUAN, 2013; ZAREMBA et al., 2017), pelo qual não produz uma espessura dos ligamentos estável no tempo. Para os casos 3, 4 e 5 foram calculados os resultados de $\beta_{G,sai}$ e “p” que determinam exatamente as espessuras de 136, 87 e 79 μm , respectivamente. O escoamento bifásico e a fração volumétrica do gás no orifício de saída do atomizador influenciam na morfologia do spray (SUN et al., 2019).

- b) Análise de “p”: A faixa dos resultados de “p” é [1,19, 33,36]. A teoria de transformações politrópicas de um gás estabelece que para a transformação isocórica, o índice politrópico tende ao infinito. Assim, para a transformação termodinâmica que se aproxime ser uma transformação isocórica, o índice politrópico tende aumentar significativamente. Isto explica a tendência do índice politrópico para os casos 2 – 4, quando menor é a diferença entre os valores de $\beta_{G,sai}$ e $\beta_{G,CM}$, a transformação termodinâmica do gás se aproxima a uma transformação isocórica, conseqüentemente, o índice politrópico aumenta. Quando aumenta GLR, o índice politrópico se aproxima a 1, produzindo que a transformação termodinâmica do gás, tende a ser uma transformação isotérmica como transformação termodinâmica limite. Isto talvez aconteça devido ao aumento de GLR, as velocidades dos fluidos aumentam e o tempo de contacto entre ambos os fluidos reduz, portanto, o tempo de troca de calor entre ambas as fases é reduzido. Evidentemente, nunca será $p = 1$ porque nesse caso, a transformação termodinâmica do gás será uma transformação isotérmica ($\pi_{T,G,sai} = 1$) produzindo que $\bar{V}_{G,sai} = \bar{V}_{G,CM}$, o qual não é admissível.
- c) Análise de $\pi_{P,sai}$: A faixa dos resultados de $\pi_{P,sai}$ é [0,865, 0,925]. Os resultados de $\pi_{P,sai}$ concordam com o mencionado por Sovani, Sojka e Lefebvre (2001) em relação à pressão bifásica no orifício de saída do atomizador efervescente. Sovani, Sojka e Lefebvre (2001) argumentam que em um escoamento bifásico ocorre uma queda de pressão no orifício de saída do atomizador efervescente mesmo em velocidades de escoamento e pressões de atomização relativamente baixas. De acordo com a equação (67), a diminuição de $\pi_{P,sai}$ implica o aumento de $\bar{V}_{L,sai}$.
- d) Análise de $\pi_{T,G,sai}$: A faixa dos resultados de $\pi_{T,G,sai}$ é [0,927, 0,977]. De acordo com a equação (68), a diminuição de $\pi_{T,G,sai}$ sugere um aumento de $\bar{V}_{G,sai}$, o qual concorda com o que acontece em um bocal de escoamento monofásico gasoso (ÇENGEL; BOLES; KANOĞLU, 2019). Em relação à temperatura de saída do gás não foram

encontrados resultados experimentais, portanto, os resultados apresentados neste trabalho são as primeiras estimativas.

- e) Análise de $\bar{V}_{L,sai}$: A faixa dos resultados de $\bar{V}_{L,sai}$ é [4,961, 8,368 m/s]. Notar que quando aumenta GLR, aumenta $\bar{V}_{L,sai}$, consequentemente, aumentam as forças inerciais sobre as forças viscosas do líquido produzindo maior número de fragmentações dos ligamentos, e portanto, menor diâmetro médio das gotas do spray como é observado na Figura 13. A relação mencionada entre GLR e o diâmetro médio das gotas do spray é encontrada em muitos trabalhos experimentais (BRONIARZ-PRESS; OCHOWIAK; WOZIWODZKI, 2010; BUCKNER; SOJKA, 1991, 1993; LEFEBVRE, 1992; LEFEBVRE; WANG; MARTIN, 1988; LUND et al., 1993, 1998; SUTHERLAND; SOJKA; PLESNIAK, 1997; WANG; CHIN; LEFEBVRE, 1989).
- f) Análise de $\bar{V}_{G,sai}$: A faixa dos resultados de $\bar{V}_{G,sai}$ é [115,355, 204,059 m/s]. Aparentemente os resultados de $\bar{V}_{G,sai}$ são maiores, mas são aceitáveis devido à pequena área da superfície transversal que ocupa o escoamento gasoso no orifício de saída do atomizador efervescente. A área da superfície de expansão do escoamento gasoso que está apenas alguns poucos milímetros afastados do orifício de saída do atomizador, é maior, produzindo uma diminuição significativa da velocidade do gás.

4.2 SIMULAÇÃO DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS

O procedimento de simulação de condições operacionais é semelhante ao procedimento de validação, exceto que, para resolver o sistema de equações (69) e (70), é assumido um valor do índice politrópico para determinar a fração superficial e volumétrica do gás de saída. Inicialmente, a faixa assumida para o índice politrópico é desde 1,10 até 1,40. Para a maioria dos casos onde foi utilizado o índice politrópico igual a 1,10, não foi determinada uma solução. Para a maioria dos casos onde foi utilizado o índice politrópico igual a 1,15, foi determinada uma solução, sendo só para os atomizadores E28, E29, E35, E36, E37 e E38 para os quais não foi determinada uma solução quando foi utilizada a pressão de 0,4 MPa e GLR = 10%. Para os casos onde foi utilizado o índice politrópico de 1,20 até 1,40, foi determinada uma solução. Os valores da fração superficial do gás na câmara de mistura e os coeficientes de energia cinética dos fluidos apresentados nas equações (57) e (59), respectivamente, são mantidos para a simulação de condições operacionais.

Neste tópico são apresentados os resultados do modelo de escoamento núcleo-anular frio obtidos das simulações para cinco condições operacionais selecionadas dos trabalhos de Jedelsky, Otahal e Jicha (2007) e Jedelsky et al. (2009). Esses trabalhos são complementares entre si, em que alguns dados que não são fornecidos em um, são fornecidos no outro, como por exemplo, dados da influência das variáveis geométricas do atomizador efervescente no diâmetro médio integral de Sauter (ID_{32}) das gotas do spray. Os autores utilizaram 17 atomizadores efervescentes do tipo A com só um orifício de saída sendo seu diâmetro igual a 2,5 mm. Os fluidos de atomização são óleo leve de aquecimento e ar, sendo apresentadas as propriedades físicas dos fluidos na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades físicas dos fluidos para a simulação de condições operacionais

Espécie química	Propriedade física	Valor
Óleo leve de aquecimento	$T_{L,CM}$ [K]*	293,15
	ρ_L [kg/m ³]*	874
	$c_{v,L} = c_{p,L}$ [kJ/(kg*K)]	1,82
	γ [kg/s ²]*	0,0297
	μ_L [kg/(m*s)]*	0,0185
	$T_{G,CM}$ [K]*	293,15
Ar	R [kPa*m ³ /(kmol*K)]	8,31451
	PM_{Gas} [kg/kmol]	28,96512
	R_G [kPa*m ³ /(kg*K)]	0,287
	$c_{p,G}$ [kJ/(kmol*K)]	29,102
	$c_{p,G}$ [kJ/(kg*K)]	1,005
	μ_G [kg/(m*s)]*	1,82E-05

Fonte: *Jedelsky et al. (2009) e produção do próprio autor.

O conjunto de variáveis físicas estimadas no orifício de saída do atomizador efervescente são: (a) fração volumétrica do gás ($\beta_{G,sai}$), (b) pressão bifásica adimensional ($\pi_{P,sai}$), (c) temperatura adimensional do gás ($\pi_{T,G,sai}$), (d) massa específica bifásica adimensional ($\pi_{\rho,sai}$), (e) velocidade do líquido ($\bar{V}_{L,sai}$), (f) velocidade do gás ($\bar{V}_{G,sai}$), e (g) espessura do líquido (δ_{Esp}).

As condições operacionais utilizadas para a simulação são apresentadas na Tabela 8. Dos resultados obtidos das simulações das cinco condições operacionais em dezessete atomizadores efervescentes, o desvio padrão para cada condição operacional é pequeno, o

mesmo acontece para ID₃₂. Por esta razão, são discutidos os resultados das variáveis físicas dos fluidos em relação às condições operacionais, desconsiderando a análise para cada um dos dezessete atomizadores efervescentes.

Tabela 8 - Condições operacionais para a simulação do modelo de escoamento núcleo-anular frio

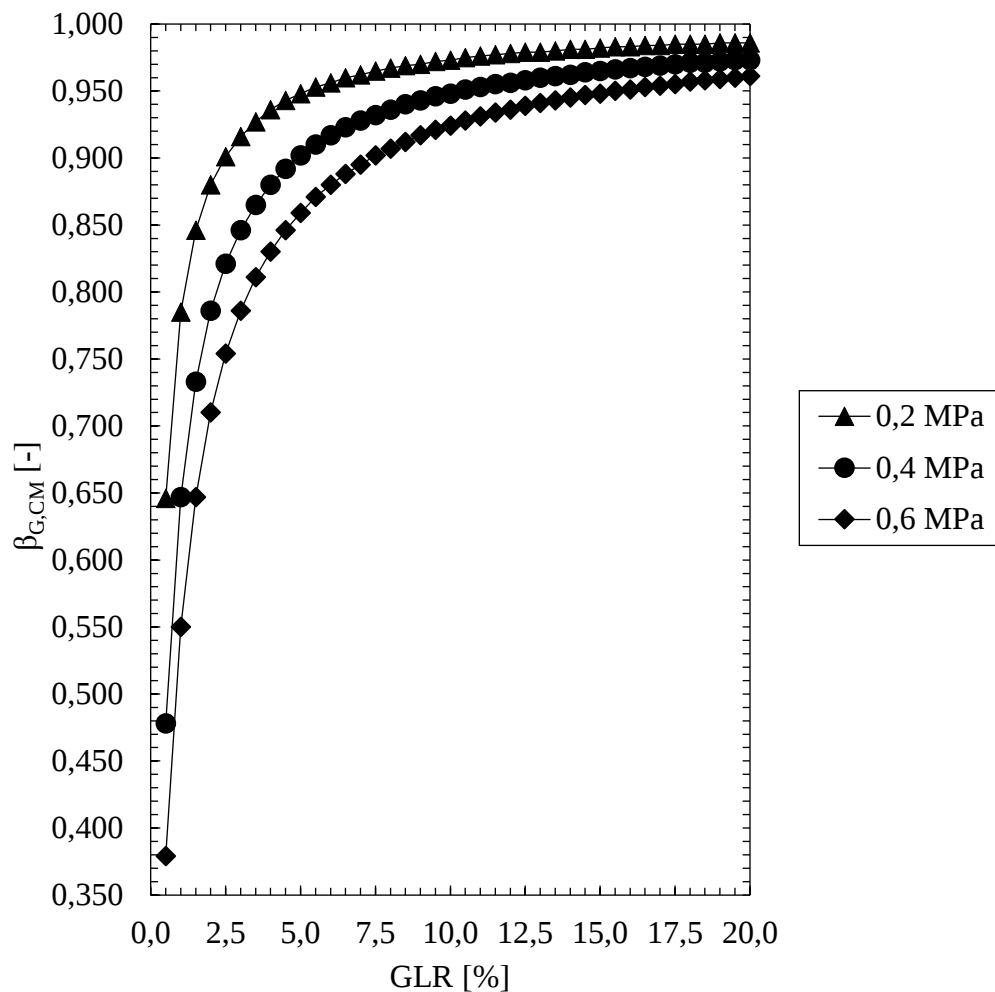
Atomizador	P _{CM} = 201,325 kPa		P _{CM} = 401,325 kPa						P _{CM} = 601,325 kPa	
	GLR = 5%		GLR = 2%		GLR = 5%		GLR = 10%		GLR = 5%	
	$\dot{m}_G$ [g/s]	$\dot{m}_L$ [g/s]	$\dot{m}_G$ [g/s]	$\dot{m}_L$ [g/s]	$\dot{m}_G$ [g/s]	$\dot{m}_L$ [g/s]	$\dot{m}_G$ [g/s]	$\dot{m}_L$ [g/s]	$\dot{m}_G$ [g/s]	$\dot{m}_L$ [g/s]
E21	0,82	16,0	0,93	45,5	1,57	31,4	2,09	21,1	2,27	45,1
E23	0,82	16,7	0,93	46,3	1,57	31,4	2,10	21,2	2,24	45,6
E24	0,84	16,7	0,89	46,0	1,57	31,7	2,12	21,2	2,26	45,6
E25	0,83	16,5	0,92	46,0	1,57	31,5	2,11	21,2	2,26	45,4
E26	0,79	15,7	0,95	47,1	1,58	31,8	2,14	21,6	2,30	46,2
E27	0,85	16,7	0,94	46,4	1,58	31,7	2,13	21,4	2,25	45,3
E28	0,88	17,3	0,96	47,9	1,61	32,4	2,18	21,9	2,20	44,3
E29	0,84	16,5	0,94	47,4	1,60	31,7	2,18	21,7	2,27	45,7
E30	0,86	16,8	0,95	46,4	1,55	31,6	2,11	21,3	2,22	45,1
E31	0,83	16,1	0,93	46,4	1,55	31,6	2,12	21,3	2,20	44,4
E32	0,85	16,8	0,93	47,4	1,58	32,3	2,14	21,2	2,28	46,2
E33	0,84	16,7	0,93	47,5	1,59	32,0	2,13	21,3	2,28	45,8
E34	0,85	16,6	0,93	47,2	1,59	32,0	2,14	21,4	2,28	45,6
E35	0,87	17,5	0,94	46,4	1,60	32,0	2,17	21,6	2,23	45,7
E36	0,88	17,4	0,95	46,7	1,60	31,9	2,15	21,6	2,24	45,4
E37	0,88	17,6	0,95	47,0	1,60	32,0	2,15	21,8	2,25	45,8
E38	0,84	16,6	0,95	46,8	1,59	31,8	2,16	21,8	2,27	44,9

Fonte: Jedelsky et al. (2009).

4.2.1 Análise da fração volumétrica do gás na câmara de mistura

A fração volumétrica do gás na câmara de mistura em função de GLR está apresentada na Figura 14. Nesta figura é observado que o comportamento da variável $\beta_{G,CM}$ é crescente em relação ao aumento de GLR para todas as pressões. Para as pressões de 0,2, 0,4, e 0,6 MPa, as faixas da variável $\beta_{G,CM}$ são de [0,646, 0,986], [0,478, 0,973], e [0,379, 0,961], respectivamente.

Figura 14 - Fração volumétrica do gás na câmara de mistura em função de GLR

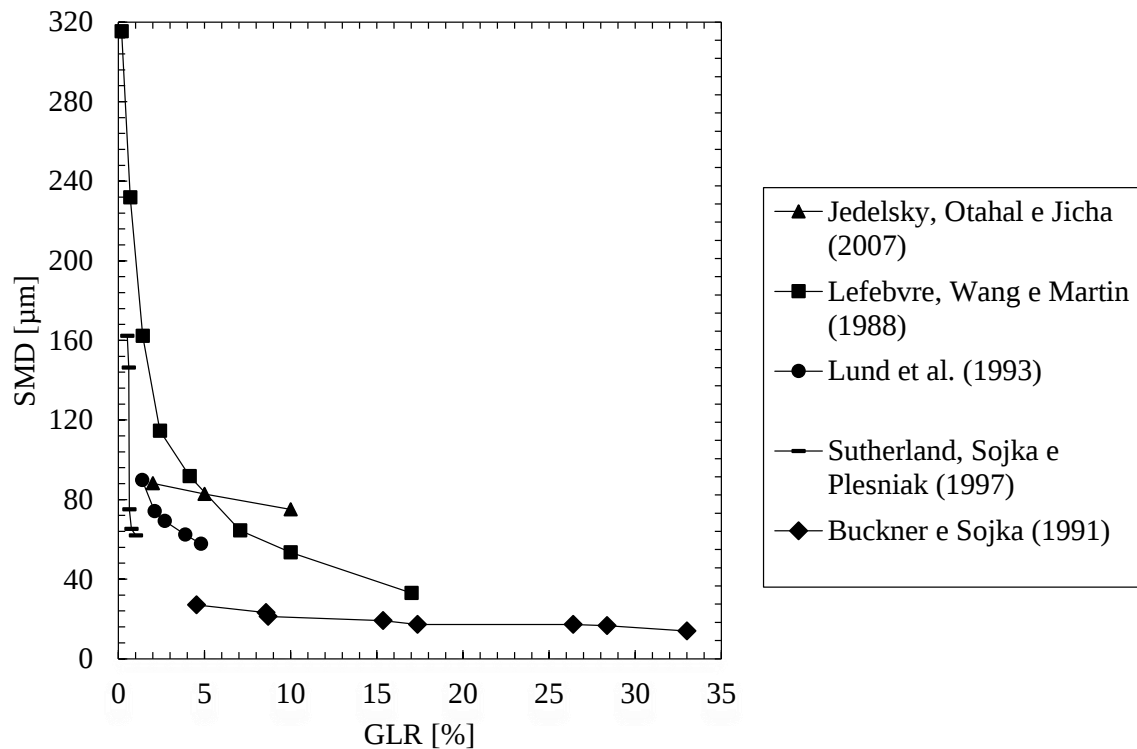


Fonte: Elaborado pelo autor

Para as três pressões utilizadas são observados três comportamentos em função da faixa de GLR. Para o GLR na faixa de [0,5, 5,0%] é observado que o aumento de $\beta_{G,CM}$ muito significativo. Para o GLR na faixa de [5,0, 10,0%] é observado que o aumento de $\beta_{G,CM}$ também significativo, mas com uma menor taxa de crescimento em comparação ao crescimento na faixa de [0,5, 5,0%]. Para o GLR na faixa de [10,0, 20,0%] é observado que o aumento de $\beta_{G,CM}$ quase insignificante sobretudo para as pressões de 0,2 e 0,4 MPa. Destas observações, conclui-se que se utilizar um GLR maior de 10,0% não influencia em $\beta_{G,CM}$. Portanto, não serão observadas mudanças significativas nas variáveis físicas calculadas no orifício de saída do atomizador, estas variáveis estão fortemente influenciadas por $\beta_{G,CM}$. Este comportamento é observado em muitas pesquisas experimentais sobre o SMD em função de GLR (BRONIARZ-PRESS; OCHOWIAK; WOZIWODZKI, 2010; BUCKNER; SOJKA, 1991, 1993; LEFEBVRE, 1992; LEFEBVRE;

WANG; MARTIN, 1988; LUND et al., 1993, 1998; SUTHERLAND; SOJKA; PLESNIAK, 1997; WANG; CHIN; LEFEBVRE, 1989). Estes estudos mostram que não é muito significativo o uso de GLR maior de 10,0 ou 15,0% para produzir menores SMD. Na Figura 15 é apresentado o SMD em função do GLR de algumas pesquisas experimentais.

Figura 15 - SMD em função do GLR

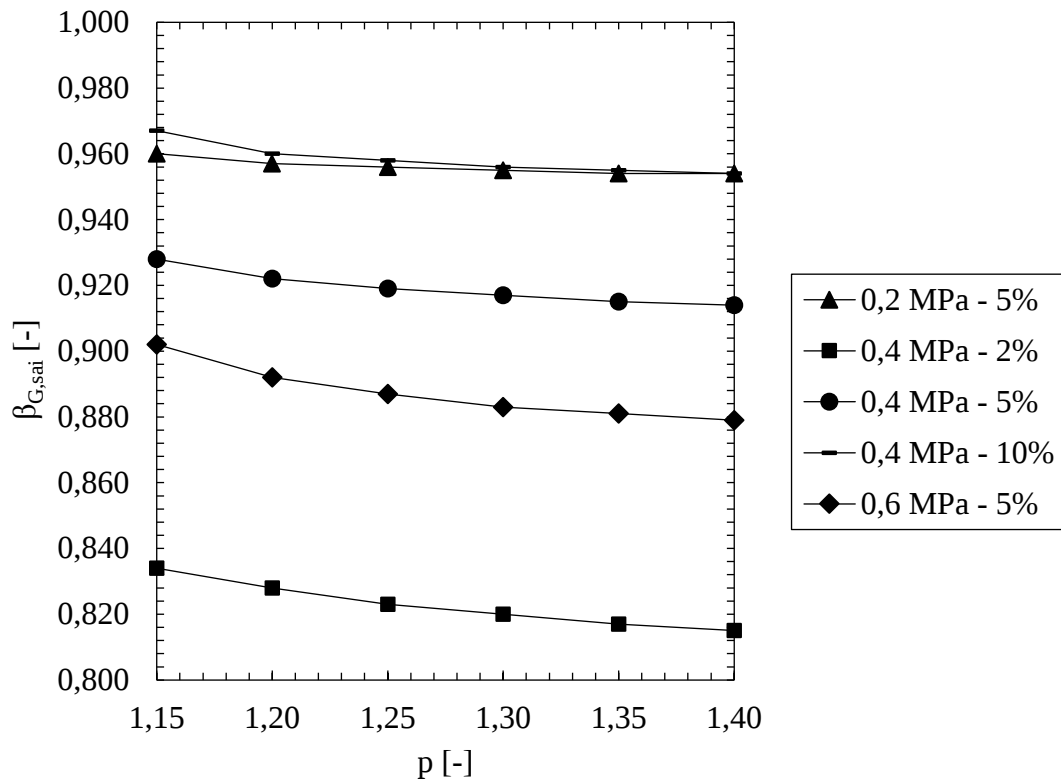


Fonte: Adaptado de Jedelsky, Otahal e Jicha (2007), Lefebvre, Wang e Martin (1988), Lund et al. (1993), Sutherland, Sojka e Plesniak (1997) e Buckner e Sojka (1991)

4.2.2 Análise da fração volumétrica do gás de saída

Para entender as mudanças das variáveis físicas dos fluidos no orifício de saída do atomizador é fundamental primeiro entender a mudança da fração volumétrica do gás de saída. A fração volumétrica do gás de saída em função do índice politrópico é apresentada na Figura 16.

Figura 16 - Fração volumétrica do gás de saída em função do índice politrópico



Fonte: Elaborado pelo autor

É observado na Figura 16, que o comportamento da variável $\beta_{G,sai}$ é decrescente em relação ao aumento do índice politrópico para todas as condições operacionais. A faixa da variável $\beta_{G,sai}$ é de [0,815, 0,967]. Para a pressão de 0,2 MPa e GLR = 5%, é observada relativa constância de $\beta_{G,sai}$, sendo seu valor médio igual a 0,956. Para a pressão de 0,4 MPa, o aumento de GLR origina o aumento de $\beta_{G,sai}$, sendo seu valor médio igual a 0,823, 0,919 e 0,958 para GLR igual a 2, 5 e 10%, respectivamente. Para a pressão de 0,6 MPa e GLR = 5%, é observado que $\beta_{G,sai}$ é menor em comparação das pressões de 0,2 e 0,4 MPa conservando o valor de GLR. Para esta condição operacional o valor médio de $\beta_{G,sai}$ é igual a 0,887.

Para a análise da variável $\beta_{G,sai}$ em função da pressão, são selecionadas as condições operacionais de 0,2, 0,4 e 0,6 MPa considerando constante o GLR igual a 5%. Para esta análise é fundamental lembrar a relação politrópica do gás. Assim, para um valor constante do índice politrópico, o aumento ou diminuição da pressão é correspondente ao aumento ou diminuição da massa específica do gás, respectivamente. Para as condições operacionais mencionadas, é observado que o aumento da pressão origina um pequeno aumento na vazão mássica do gás e um grande aumento na vazão mássica do líquido devido a que é assumido

o líquido como um fluido incompressível, deste modo, a vazão volumétrica do líquido é muito maior que a vazão volumétrica do gás. O denominador da fração volumétrica do gás na câmara de mistura é definido pela soma das vazões volumétricas do líquido e do gás, pode-se concluir que o valor de $\beta_{G,CM}$ está fortemente influenciado pela vazão volumétrica do líquido, de tal maneira que, a maior pressão, maior vazão volumétrica do líquido, e consequentemente, menor valor de $\beta_{G,CM}$. Para a variável $\beta_{G,CM}$, no caso das pressões de 0,2, 0,4 e 0,6 MPa considerando constante o GLR igual a 5%, são determinados os valores de 0,948, 0,902 e 0,859, respectivamente.

Para a análise da variável $\beta_{G,sai}$ em função de GLR, são selecionadas as condições operacionais de 2, 5 e 10% considerando constante a pressão igual a 0,4 MPa. Para esta análise é fundamental considerar que a pressão e temperatura na câmara de mistura são iguais, portanto, a massa específica será igual para as três condições, diferenciando apenas da vazão mássica do gás. À medida que aumenta o parâmetro GLR origina o aumento da vazão mássica do gás, e por consequência, aumenta a vazão volumétrica do gás. Por outro lado, diminui a vazão volumétrica do líquido em relação ao aumento do parâmetro GLR. As tendências das vazões volumétricas do líquido e do gás, origina o aumento de $\beta_{G,CM}$. Para a variável $\beta_{G,CM}$, no caso de GLR igual a 2, 5 e 10% considerando constante a pressão igual a 0,4 MPa, são obtidos os valores de 0,786, 0,902 e 0,948, respectivamente.

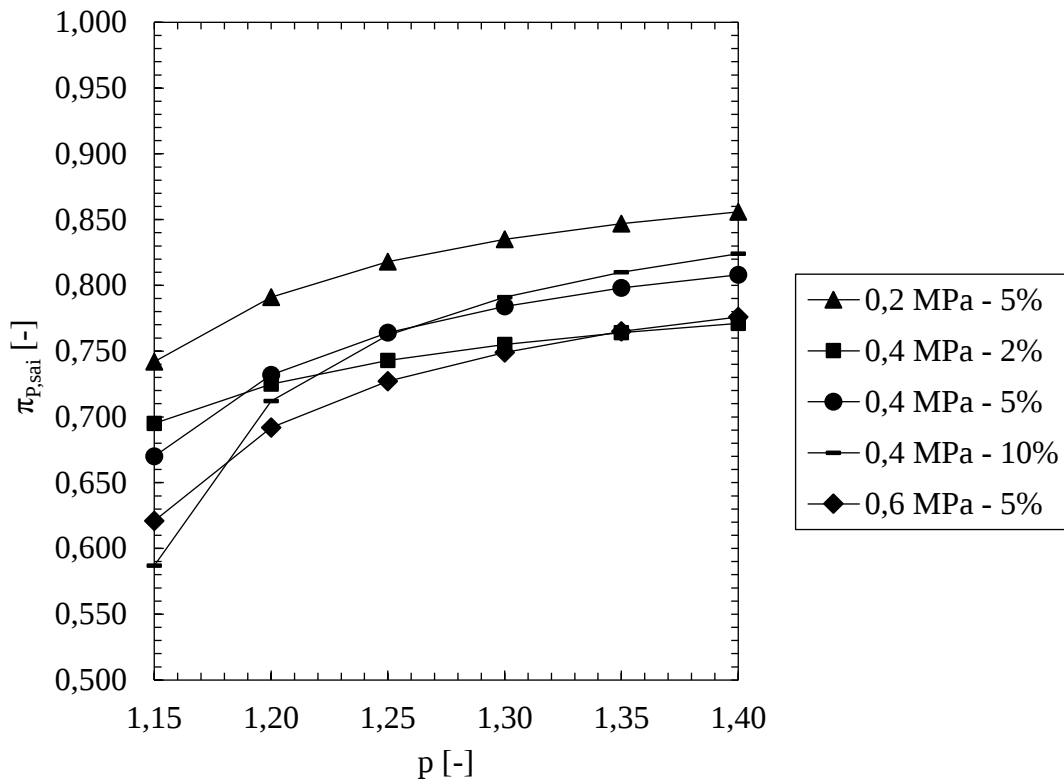
Para explicar o resultado de $\beta_{G,sai}$ é necessário analisar sua relação com $\beta_{G,CM}$ e $\pi_{P,sai}$. A pressão bifásica adimensional, diminui à medida que o escoamento bifásico se aproxima ao orifício de saída do atomizador, o denominador da fração que se forma na parte da expressão da pressão bifásica, tende aumentar devido ao expoente (índice politrópico) ser maior que 1.

Para a variável $\beta_{G,sai}$, nos casos das pressões iguais a 0,2, 0,4 e 0,6 MPa (mantendo o valor de GLR = 5%) são determinados os valores médios de 0,956, 0,919 e 0,887, respectivamente, e para os casos de GLR iguais a 2, 5 e 10% (mantendo o valor de 0,4 MPa) são determinados os valores médios de 0,823, 0,919 e 0,958, respectivamente. Portanto, os resultados de $\beta_{G,sai}$ são maiores que $\beta_{G,CM}$, o qual concorda com a relação entre ambas variáveis. Observa-se que aumenta $\beta_{G,sai}$ à medida que diminui o índice politrópico para ocorrer a mudança necessária de $\pi_{P,sai}$ em cada condição operacional.

4.2.3 Análise da pressão bifásica adimensional de saída

A pressão bifásica adimensional de saída em função do índice politrópico é apresentada na Figura 17.

Figura 17 - Pressão bifásica adimensional de saída em função do índice politrópico



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 17 é observado que o comportamento da variável $\pi_{p,sai}$ é crescente em relação ao aumento do índice politrópico para todas as condições operacionais. A faixa da variável $\pi_{p,sai}$ é de [0,587, 0,856], concorda com o mencionado por Sovani, Sojka e Lefebvre (2001) sobre a pressão no orifício de saída do atomizador efervescente. Para a pressão de 0,2 MPa e GLR = 5%, é observado que o valor médio de $\pi_{p,sai}$ é igual a 0,815. Para a pressão de 0,4 MPa, o aumento de GLR origina o aumento (em relação a 2 e 5%) do valor médio de $\pi_{p,sai}$, sendo este igual a 0,742, 0,759 e 0,748 para GLR igual a 2, 5 e 10%, respectivamente. Para a pressão de 0,6 MPa e GLR = 5%, é observado que $\pi_{p,sai}$ é menor em comparação das pressões de 0,2 e 0,4 MPa conservando o valor de GLR. Para esta condição operacional o valor médio de $\pi_{p,sai}$ é igual a 0,722.

Para a análise da variável $\pi_{p,sai}$ em função da pressão, são selecionadas as condições operacionais de 0,2, 0,4 e 0,6 MPa considerando constante o GLR igual a 5%. Para esta análise é fundamental notar que para uma maior pressão, terá uma maior vazão mássica e consequentemente maior velocidade do líquido de saída. Da equação (67) pode-se observar uma relação inversa entre a velocidade do líquido de saída e a pressão bifásica adimensional, produzindo que a maior velocidade do líquido de saída, menor pressão

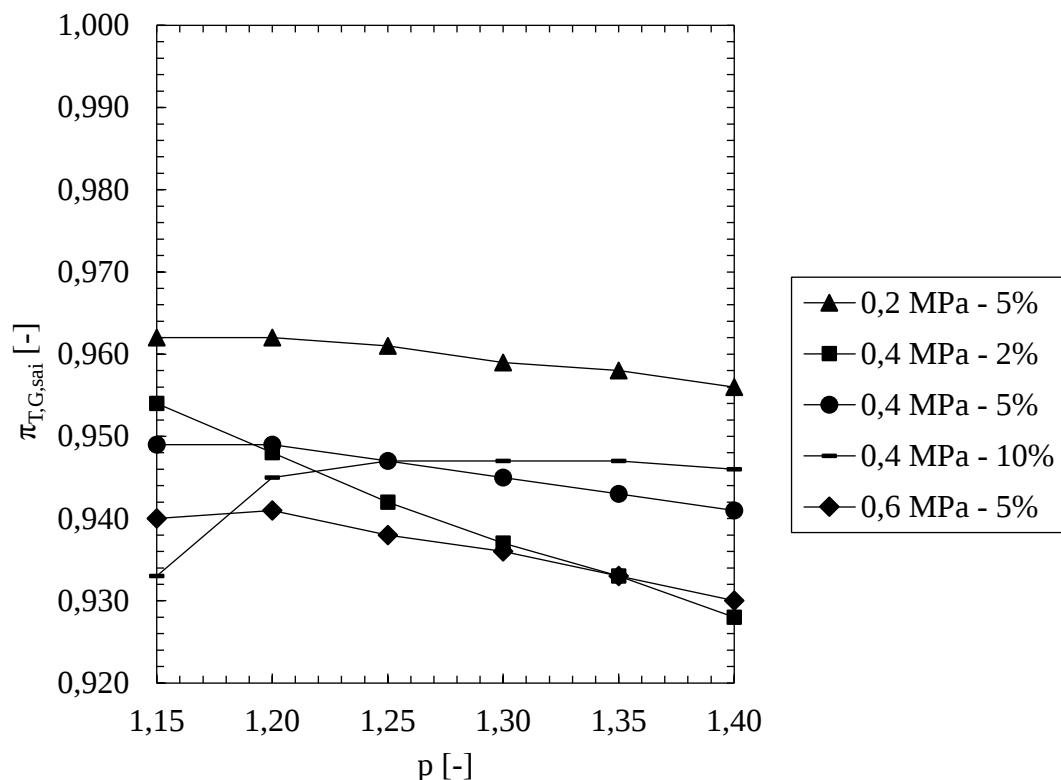
bifásica adimensional, por este motivo, terá uma maior pressão e uma menor pressão bifásica adimensional como é observado na Figura 17.

Para a análise da variável $\pi_{p,sai}$ em função de GLR, são selecionadas as condições operacionais de 2, 5 e 10% considerando constante a pressão igual a 0,4 MPa. A tendência de $\pi_{p,sai}$ em função do índice politrópico (mantendo constante o valor de GLR) é um constante aumento. Mas a tendência de $\pi_{p,sai}$ em função de GLR (mantendo constante o valor do índice politrópico) não é bem definida por ocorrer variações de aumento e diminuição em alguns casos. Isto possivelmente acontece devido à importante influência do índice politrópico na determinação de $\pi_{p,sai}$.

4.2.4 Análise da temperatura adimensional do gás de saída

A temperatura adimensional do gás de saída em função do índice politrópico é apresentada na Figura 18.

Figura 18 - Temperatura adimensional do gás de saída em função do índice politrópico



Fonte: Elaborado pelo autor

É observado na Figura 18, que o comportamento da variável $\pi_{T,G,sai}$ é relativamente constante em relação ao aumento do índice politrópico para todas as condições operacionais.

A faixa da variável $\pi_{T,G,sai}$ é de [0,928, 0,962]. Para a pressão de 0,2 MPa e GLR = 5%, é observado que o valor médio de $\pi_{T,G,sai}$ é igual a 0,960. Para a pressão de 0,4 MPa, o aumento de GLR origina o aumento (em relação a 2 e 5%) do valor médio de $\pi_{T,G,sai}$, sendo este igual a 0,940, 0,946 e 0,944 para GLR igual a 2, 5 e 10%, respectivamente. Para a pressão de 0,6 MPa e GLR = 5%, é observado que o valor de $\pi_{T,G,sai}$ é menor em comparação das pressões de 0,2 e 0,4 MPa conservando o valor de GLR. Para esta condição operacional o valor médio de $\pi_{T,G,sai}$ é igual a 0,936. Devido à relativa constância de $\pi_{T,G,sai}$ pode-se considerar para todas as condições operacionais o valor médio igual a 0,945.

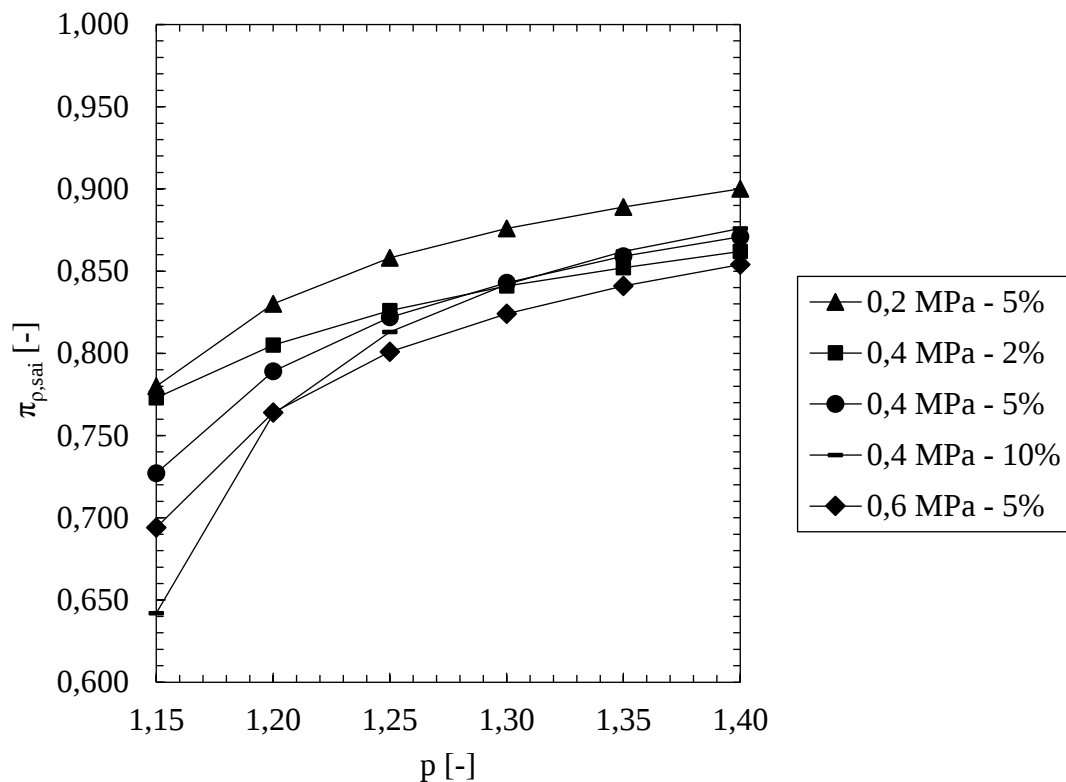
Para a análise da variável $\pi_{T,G,sai}$ em função da pressão e de GLR nota-se que sua expressão depende de uma base e um expoente. A base é definida por uma fração formada por $\beta_{G,CM}$ e $\beta_{G,sai}$, e o expoente é definido por $p-1$. Para os resultados de $\beta_{G,CM}$ e $\beta_{G,sai}$ é observado que quando aumenta p , diminui $\beta_{G,sai}$, produzindo que aumente a base. Mas ainda assim é observado que não aumenta significativamente, de fato tem casos nos quais diminui o valor de $\pi_{T,G,sai}$. Esta variação ocorre devido ao expoente ser menor que 1 (faixa entre 0,1 e 0,4).

Assim, o índice politrópico é mais influente na pressão bifásica adimensional do que na temperatura do gás adimensional, devido ao expoente das potências que os definem. Por exemplo, para a pressão de 0,4 MPa, de acordo com os resultados obtidos de $\pi_{T,G,sai}$, observa-se o seguinte: (a) Para $p \in [1,20, 1,40]$, o expoente, que é uma quantidade ligeiramente maior que 0, é mais influente em relação à base, ou seja, que a variável $\beta_{G,sai}$, (b) Para $p = 1,15$, o expoente torna-se uma quantidade muito próxima de 0, reduzindo sua influência sobre $\pi_{T,G,sai}$, conseqüentemente, a base, portanto, a variável $\beta_{G,sai}$ é mais influente em relação à variável p . Por essas razões, para a pressão de 0,4 MPa e $p = 1,15$, a influência de $\beta_{G,sai}$ é mais significativa que a variável p .

4.2.5 Análise da massa específica bifásica adimensional de saída

A massa específica bifásica adimensional de saída em função do índice politrópico é apresentada na Figura 19.

Figura 19 - Massa específica bifásica adimensional de saída em função do índice politrópico



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 19 é observado que o comportamento da variável $\pi_{p,sai}$ é crescente em relação ao aumento do índice politrópico para todas as condições operacionais. A faixa da variável $\pi_{p,sai}$ é de [0,642, 0,900]. Para a pressão de 0,2 MPa e GLR = 5%, é observado que o valor médio de $\pi_{p,sai}$ é igual a 0,856. Para a pressão de 0,4 MPa, o aumento de GLR origina a diminuição do valor médio de $\pi_{p,sai}$, sendo este igual a 0,827, 0,819 e 0,800 para GLR igual a 2, 5 e 10%, respectivamente. Para a pressão de 0,6 MPa e GLR = 5%, é observado que $\pi_{p,sai}$ é menor em comparação com as pressões de 0,2 e 0,4 MPa conservando o valor de GLR. Para esta condição operacional o valor médio de $\pi_{p,sai}$ é igual a 0,796.

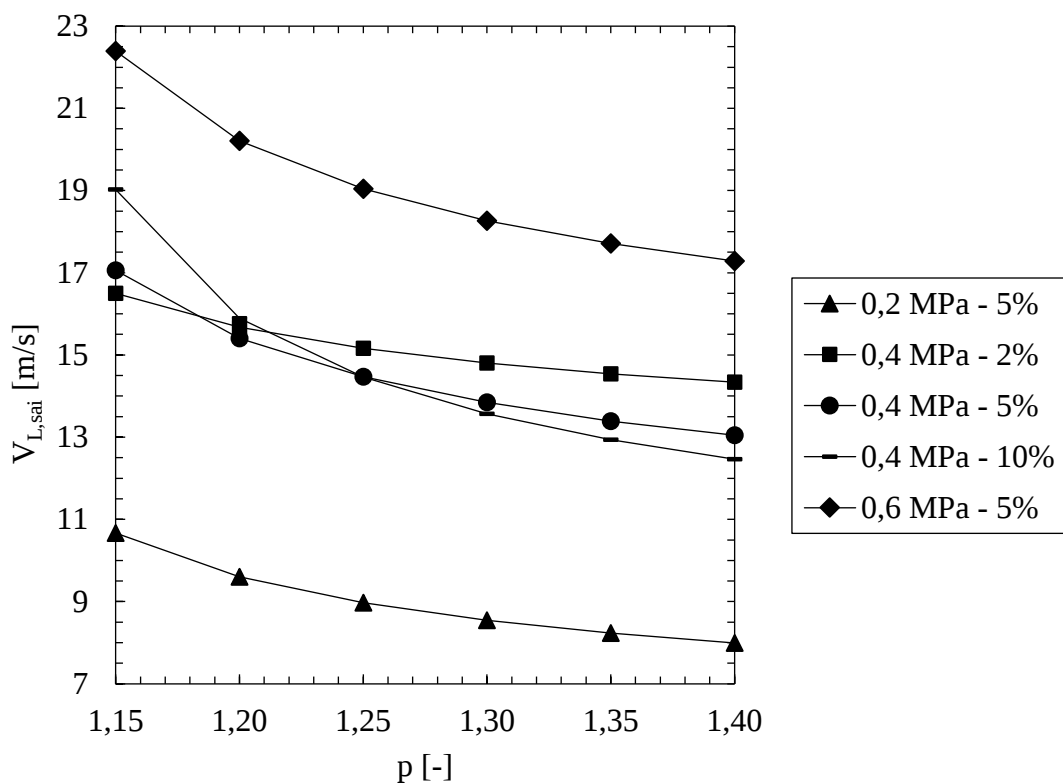
Para a análise da variável $\pi_{p,sai}$ em função da pressão, são selecionadas as condições operacionais de 0,2, 0,4 e 0,6 MPa considerando constante o GLR igual a 5%. Para esta análise é fundamental notar que sua definição é uma fração formada por $\beta_{G,CM}$ e $\beta_{G,sai}$, sendo $\pi_{p,sai}$ uma função linear de $\beta_{G,sai}$. Dos resultados obtidos é observado que a mudança de $\beta_{G,CM}$ é mais significativa que a mudança de $\beta_{G,sai}$, pelo qual a maior pressão, menor $\beta_{G,CM}$, e conseqüentemente, menor $\pi_{p,sai}$.

Para a análise da variável $\pi_{p,sai}$ em função de GLR, são selecionadas as condições operacionais de 2, 5 e 10% considerando constante a pressão igual a 0,4 MPa. A tendência de $\pi_{p,sai}$ em função do índice politrópico (mantendo constante o valor de GLR) é um constante aumento. Mas a tendência de $\pi_{p,sai}$ em função de GLR (mantendo constante o valor do índice politrópico) não é bem definida por ocorrer variações de aumento e diminuição em alguns casos. Como no caso da análise da pressão bifásica adimensional, isto possivelmente acontece devido à importante influência do índice politrópico na determinação de $\beta_{G,sai}$.

4.2.6 Análise da velocidade do líquido de saída

A velocidade do líquido de saída em função do índice politrópico é apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Velocidade do líquido de saída em função do índice politrópico



Fonte: Elaborado pelo autor

É observado na Figura 20, que o comportamento da variável $\bar{V}_{L,sai}$ é decrescente em relação ao aumento do índice politrópico para todas as condições operacionais. A faixa da

variável $\bar{V}_{L,sai}$ é de [7,991, 22,391 m/s]. Para a pressão de 0,2 MPa e GLR = 5%, é observado que o valor médio de $\bar{V}_{L,sai}$ é igual a 9,001 m/s. Para a pressão de 0,4 MPa, o aumento de GLR origina a diminuição (em relação a 2 e 5%) do valor médio de $\bar{V}_{L,sai}$, sendo este igual a 15,171, 14,535 e 14,726 m/s para GLR igual a 2, 5 e 10%, respectivamente. Para a pressão de 0,6 MPa e GLR = 5%, é observado que $\bar{V}_{L,sai}$ é maior em comparação das pressões de 0,2 e 0,4 MPa conservando o valor de GLR. Para esta condição operacional o valor médio de $\bar{V}_{L,sai}$ é igual a 19,150 m/s.

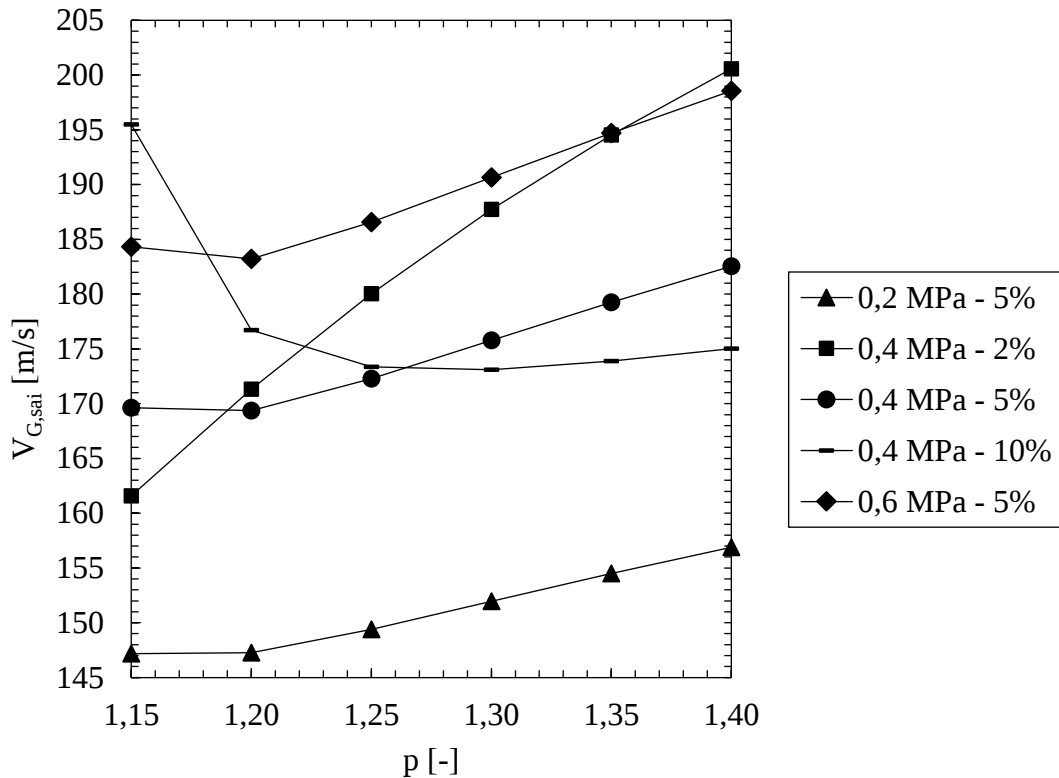
Para a análise da variável $\bar{V}_{L,sai}$ em função da pressão, são selecionadas as condições de operação de 0,2, 0,4 e 0,6 MPa considerando constante o GLR igual a 5%. Para esta análise é fundamental observar a equação (67). Desta equação pode-se notar a relação inversa entre $\bar{V}_{L,sai}$ e $\pi_{p,sai}$, no sentido que se uma destas variáveis aumenta, a outra diminui. Desta equação também pode-se observar que a maior pressão, maior velocidade do líquido de saída, e consequentemente, maior vazão mássica do líquido, o qual acontece segundo os resultados experimentais utilizados.

Para a análise da variável $\bar{V}_{L,sai}$ em função de GLR, são selecionadas as condições de operação de 2, 5 e 10% considerando constante a pressão igual a 0,4 MPa. A tendência de $\bar{V}_{L,sai}$ em função do índice politrópico (mantendo constante o valor de GLR) ocorre uma diminuição. A tendência de $\bar{V}_{L,sai}$ em função de GLR (mantendo constante o valor do índice politrópico) não é bem definida por ocorrer variações de aumento e diminuição em alguns casos. É observado na Figura 20 que para alcançar maior valor de $\bar{V}_{L,sai}$, a pressão é mais influente que GLR.

4.2.7 Análise da velocidade do gás de saída

A velocidade do gás de saída em função do índice politrópico é apresentada na Figura 21.

Figura 21 - Velocidade do gás de saída em função do índice politrópico



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 21 é observado que o comportamento da variável $\bar{V}_{G,sai}$ não é estável em relação ao aumento do índice politrópico, não há uma tendência clara para todas as condições operacionais. A faixa da variável $\bar{V}_{G,sai}$ é de [147,166, 200,555 m/s]. Para a pressão de 0,2 MPa e GLR = 5%, é observado que o valor médio de $\bar{V}_{G,sai}$ é igual a 151,194 m/s. Para a pressão de 0,4 MPa, o aumento de GLR origina a diminuição (em relação a 2 e 5%) do valor médio de $\bar{V}_{G,sai}$, sendo este igual a 182,629, 174,809 e 177,927 m/s para GLR igual a 2, 5 e 10%, respectivamente. Para a pressão de 0,6 MPa e GLR = 5%, é observado que $\bar{V}_{G,sai}$ é maior em comparação com as pressões de 0,2 e 0,4 MPa conservando o valor de GLR. Para esta condição operacional o valor médio de $\bar{V}_{G,sai}$ é igual a 189,673 m/s.

Para a análise da variável $\bar{V}_{G,sai}$ em função da pressão e de GLR deve-se observar a equação (68), a partir desta equação pode-se notar a relação inversa entre $\bar{V}_{G,sai}$ e $\pi_{T,G,sai}$, no sentido que se uma destas variáveis aumenta, a outra diminui. Na Figura 21 é observado que não existe uma tendência definida de $\bar{V}_{G,sai}$ para todas as condições operacionais excetuando a condição operacional de pressão igual a 0,4 MPa e GLR = 2%. Para entender porque não existe uma tendência definida de $\bar{V}_{G,sai}$ é necessário observar o comportamento

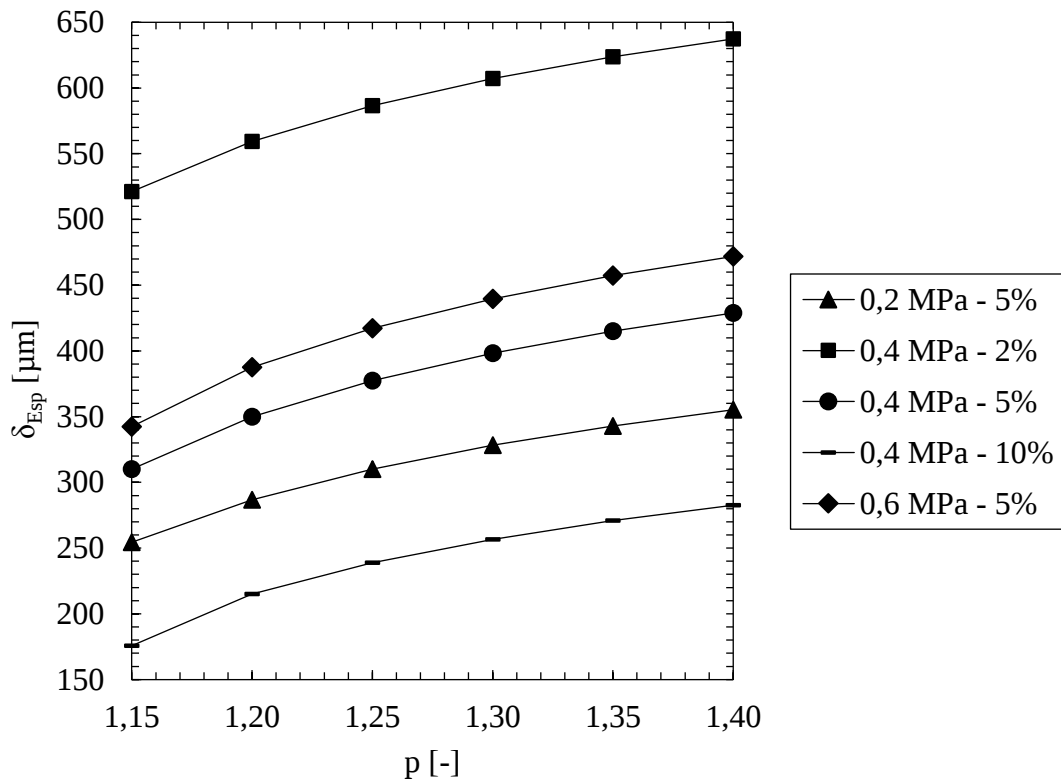
de $\pi_{T,G,sai}$. Na Figura 18, para as condições operacionais de 0,2, 0,4 e 0,6 MPa mantendo constante o GLR igual a 5% é observado que para os valores do índice politrópico desde 1,15 até 1,20, o comportamento de $\pi_{T,G,sai}$ é quase constante, e para os valores do índice politrópico desde 1,20 até 1,40, o comportamento de $\pi_{T,G,sai}$ é decrescente. Por esta razão, é observado na Figura 21, que $\bar{V}_{G,sai}$ inicialmente é quase constante e depois aumenta para aquelas condições operacionais. Para a condição operacional de 0,4 MPa e GLR igual a 2% existe uma tendência definida, sendo crescente o comportamento de $\bar{V}_{G,sai}$ devido ao comportamento decrescente de $\pi_{T,G,sai}$ para toda a faixa do índice politrópico observado na Figura 18.

Índices politrópicos relativamente próximos de 1 são provavelmente experimentados no orifício de saída do atomizador efervescente. Por exemplo, para a pressão de 0,4 MPa e $p = 1,15$, observa-se que quando GLR aumenta, $\bar{V}_{G,sai}$ aumenta. Em muitas pesquisas experimentais (BRONIARZ-PRESS; OCHOWIAK; WOZIWODZKI, 2010; BUCKNER; SOJKA, 1991, 1993; LEFEBVRE, 1992; LEFEBVRE; WANG; MARTIN, 1988; LUND et al., 1993, 1998; SUTHERLAND; SOJKA; PLESNIAK, 1997; WANG; CHIN; LEFEBVRE, 1989), o diâmetro médio das gotas do spray diminui quando o GLR aumenta, portanto, a força inercial do gás pode influenciar na fragmentação dos ligamentos formados no orifício de saída do atomizador efervescente. Se essa relação se mantiver, isso implica que a força inercial do gás sobre os ligamentos aumenta quando GLR aumenta, produzindo assim um diâmetro médio menor de gotas do spray.

4.2.8 Análise da espessura do líquido de saída

A espessura do líquido de saída em função do índice politrópico é apresentada na Figura 22.

Figura 22 - Espessura do líquido de saída em função do índice politrópico



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 22 é observado que o comportamento da variável δ_{Esp} é crescente em relação ao aumento do índice politrópico para todas as condições operacionais. A faixa da variável δ_{Esp} é de [176, 637 μm]. Para a pressão de 0,2 MPa e GLR = 5%, é observado que o valor médio de δ_{Esp} é igual a 313 μm . Para a pressão de 0,4 MPa, o aumento de GLR origina a diminuição do valor médio de δ_{Esp} , sendo este valor igual a 589, 380 e 240 μm para GLR igual a 2, 5 e 10%, respectivamente. Para a pressão de 0,6 MPa e GLR = 5%, é observado que δ_{Esp} é maior em comparação das pressões de 0,2 e 0,4 MPa conservando o valor de GLR. Para esta condição operacional o valor médio de δ_{Esp} é igual a 419 μm .

Para a análise da variável δ_{Esp} em função da pressão, são selecionadas as condições operacionais de 0,2, 0,4 e 0,6 MPa considerando constante o GLR igual a 5%. À medida que aumenta a pressão, aumenta a vazão mássica do líquido originando o aumento de $\bar{V}_{L,sai}$ e o aumento da área da superfície transversal do líquido, consequentemente, aumenta a espessura do líquido de saída.

Para a análise da variável δ_{Esp} em função de GLR, são selecionadas as condições operacionais de 2, 5 e 10% considerando constante a pressão igual a 0,4 MPa. À medida

que aumenta GLR, aumenta a vazão mássica do gás pelo que origina o aumento de $\bar{V}_{G,sai}$ e o aumento da área da superfície transversal do gás, consequentemente, diminui a espessura do líquido de saída.

4.3 MODELO ADIMENSIONAL DO DIÂMETRO MÉDIO DAS GOTAS DO SPRAY

Neste tópico é apresentado um modelo adimensional do diâmetro médio das gotas do spray utilizando os resultados experimentais do diâmetro médio integral de Sauter (ID_{32}) apresentados em um dos trabalhos utilizados para a simulação do modelo de escoamento núcleo-anular frio. Os resultados experimentais utilizados do ID_{32} são apresentados na Tabela 9 (JEDELSKY; OTAHAL; JICHA, 2007).

Tabela 9 - Diâmetro médio integral de Sauter (ID_{32}) para dezessete atomizadores efervescentes de tipo A

Atomizador	ID_{32} [μm]				
	$P_{CM} = 0,2 \text{ MPa}$	$P_{CM} = 0,4 \text{ MPa}$			$P_{CM} = 0,6 \text{ MPa}$
	GLR = 5%	GLR = 2%	GLR = 5%	GLR = 10%	GLR = 5%
E21	96,9	88,2	82,8	75,0	76,8
E23	94,6	87,4	83,8	77,4	79,2
E24	94,2	91,2	86,8	77,0	78,7
E25	95,4	87,9	83,5	75,6	78,3
E26	87,8	85,8	81,5	76,6	78,2
E27	88,9	84,6	80,6	75,2	77,6
E28	92,6	88,2	83,2	77,0	78,2
E29	91,5	88,5	86,0	79,9	81,9
E30	96,0	93,7	87,3	80,9	82,6
E31	100,1	92,0	89,3	84,9	88,9
E32	91,7	90,1	85,6	80,6	76,6
E33	94,6	91,4	85,9	81,5	83,6
E34	96,8	90,7	87,9	81,9	83,0
E35	93,3	85,6	83,5	77,7	79,4
E36	89,1	86,0	84,5	76,5	80,0
E37	89,8	91,6	84,6	79,8	77,9
E38	90,5	85,0	83,8	77,0	77,6
Média	93,2	88,7	84,7	78,5	79,9
Des. Padrão	3,360	2,767	2,290	2,774	3,174

Fonte: Jedelsky, Otahal e Jicha (2007).

Para o desenvolvimento do modelo adimensional é estabelecido como variável dependente o ID_{32} e como variáveis independentes o $d_{o,ato}$, ρ_L , μ_L , γ , $\bar{V}_{L,sai}$ e $\bar{V}_{G,sai}$. Como foi mencionado anteriormente, quando aumenta GLR, o índice politrópico se aproxima a 1, por esta razão foi selecionado o valor de $p = 1,15$ para a seleção das velocidades $\bar{V}_{L,sai}$ e $\bar{V}_{G,sai}$. O valor de $p = 1,15$ foi escolhido porque para este valor existe uma relação entre GLR e $\bar{V}_{G,sai}$, acontecendo que se aumenta GLR, aumenta $\bar{V}_{G,sai}$, o que é considerado razoável de acontecer. Devido ao valor selecionado para o índice politrópico, foi desconsiderado os seis diâmetros médios integrais de Sauter para os quais não foi obtida uma solução na simulação do modelo de escoamento núcleo-anular frio. O modelo adimensional de ID_{32} é apresentado na equação (96).

$$\frac{ID_{32}}{d_{o,ato}} = 0,458 Re^{0,212} We^{-0,337} rv^{-0,372} \quad (96)$$

sendo:

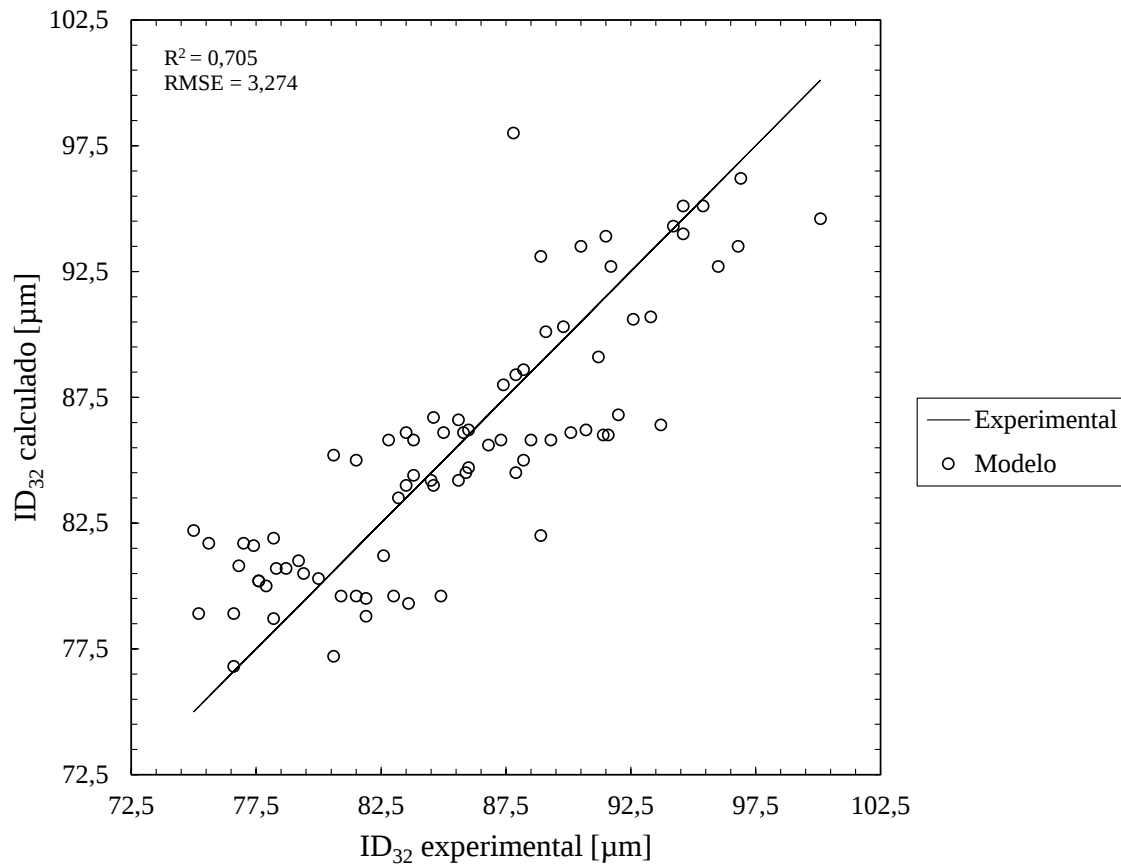
$$Re = \frac{\rho_L \bar{V}_{L,sai} d_{o,ato}}{\mu_L} \quad (97)$$

$$We = \frac{\rho_L \bar{V}_{L,sai}^2 d_{o,ato}}{\gamma} \quad (98)$$

$$rv = \frac{\bar{V}_{G,sai}}{\bar{V}_{L,sai}} \quad (99)$$

Os resultados do modelo adimensional são comparados com os resultados experimentais (JEDELSKY; OTHAL; JICHA, 2007) apresentados na Figura 23.

Figura 23 - Comparação dos resultados experimentais e estimados de ID_{32}



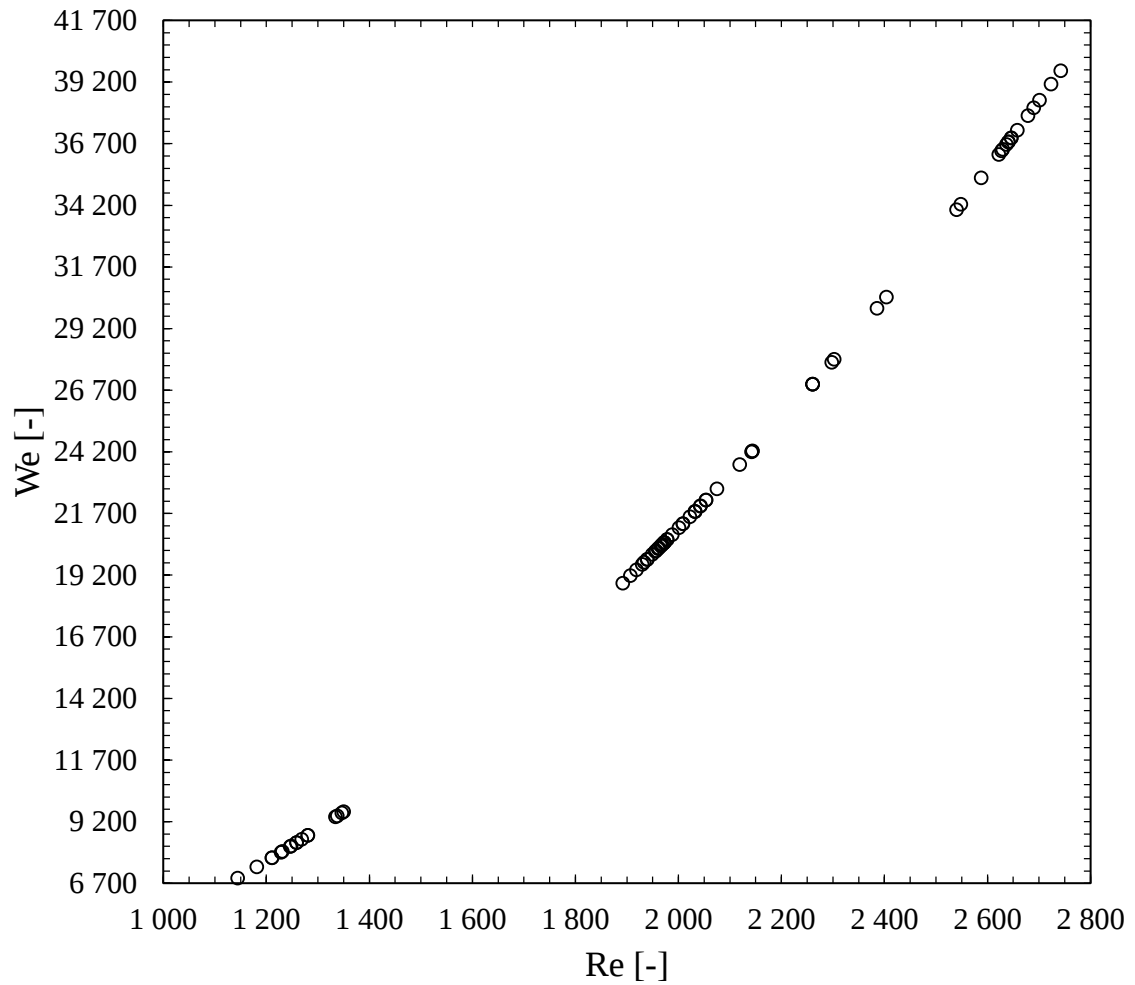
Fonte: Elaborado pelo autor

O modelo adimensional de ID_{32} está caracterizado por ter $R^2 = 0,705$ e $RMSE = 3,274$. Das estimativas do modelo adimensional são calculados que o erro relativo mínimo, médio e máximo é igual a 0,11, 3,04, e 11,62%, respectivamente. Adicionalmente, das estimativas do modelo adimensional é observado que para sessenta e quatro estimativas o erro relativo é menor ou igual a 5%, e para quinze estimativas o erro relativo é maior a 5%. A partir dos resultados apresentados anteriormente, podemos considerar que o modelo adimensional proposto é aplicável para as estimativas de ID_{32} .

A comparação do número de Weber em função do número de Reynolds é apresentada na Figura 24. Desta figura pode se estabelecer três faixas do número de Reynolds em função da pressão de atomização: (a) Para a pressão de 0,2 MPa, a faixa do número de Reynolds é [1145, 1350], (b) Para a pressão de 0,4 MPa, a faixa do número de Reynolds é [1892, 2404], e (c) Para a pressão de 0,6 MPa, a faixa do número de Reynolds é [2540, 2742], respectivamente. É observado da Figura 24, a relação que a maior número de Reynolds, maior número de Weber, isto acontece devido à velocidade do líquido no orifício

de saída, porque a maior pressão de atomização, maior vazão mássica do líquido, portanto, maior velocidade do líquido no orifício de saída.

Figura 24 - Comparação do número de Weber em função do número de Reynolds



Fonte: Elaborado pelo autor

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo de escoamento núcleo-anular frio para as estimativas de um conjunto variáveis físicas dos fluidos no orifício de saída do atomizador efervescente. O conjunto de variáveis físicas estimadas foram: (a) fração volumétrica do gás, (b) pressão bifásica adimensional, (c) temperatura adimensional do gás, (d) massa específica bifásica adimensional, (e) velocidade do líquido, (f) velocidade do gás, e (g) espessura do líquido. O modelo de escoamento núcleo-anular frio foi validado mediante a estimação da espessura do líquido obtendo-se excelentes estimativas para $GLR \geq 1,0\%$. As estimativas das outras variáveis físicas dos fluidos são consistentes com a teoria e os resultados experimentais. A validação do modelo ajuda a concluir que se aumenta GLR, o índice politrópico se aproxima a 1. As estimativas das variáveis físicas dos fluidos no orifício de saída do atomizador efervescente podem ajudar a desenvolver futuros modelos da atomização primária (divisão de ligamentos) e atomização secundária (divisão de gotas e coalescência). Adicionalmente, o modelo de escoamento núcleo-anular é versátil para considerar outra suposição sobre a transferência de calor entre as fases, ou seja, pode-se considerar alguma quantidade de calor transferida entre as fases.

O modelo de escoamento núcleo-anular frio foi utilizado para simular cinco condições operacionais em dezessete atomizadores efervescentes. De todas as simulações realizadas foi determinado que para cada condição operacional é desprezível o desvio padrão dos resultados nos dezessete atomizadores efervescentes. Consequentemente, o projeto do atomizador efervescente tem pouca influência nas variáveis físicas dos fluidos no orifício de saída do atomizador. Por esta razão, a influência do projeto do atomizador efervescente no diâmetro médio das gotas do spray é pequena. Adicionalmente, os resultados de todas as variáveis físicas dos fluidos são considerados admissíveis para a faixa assumida do índice politrópico. Devido à pequena influência do projeto do atomizador sobre as variáveis físicas dos fluidos no orifício de saída do atomizador, o modelo de escoamento núcleo-anular frio pode ser utilizado em outros atomizadores bifásicos com câmara de mistura interna, por exemplo, o atomizador tipo Y.

Finalmente, o método desenvolvido para estabelecer um modelo adimensional é utilizado para obter um modelo adimensional do diâmetro médio integral de Sauter (ID_{32}) das gotas do spray. O modelo utiliza importantes números adimensionais no escoamento bifásico tais como o Número de Reynolds (Re), Número de Weber (We) e a razão de velocidades (rv). O modelo adimensional é caracterizado por ter $R^2 = 0,705$ e $RMSE = 3,274$, razão pela qual o modelo proposto é aplicável para realizar futuras previsões.

TRABALHOS FUTUROS

A partir da presente pesquisa é sugerido realizar os seguintes trabalhos:

- 1) Validar o modelo de escoamento núcleo-anular com maior quantidade de resultados experimentais da espessura dos ligamentos obtidos da atomização de outros líquidos, por exemplo, gasolina, diesel, etanol.
- 2) Avaliar a espessura dos ligamentos para diferentes tipos de atomizadores bifásicos com câmara de mistura interna e com diferentes diâmetros do orifício de saída do atomizador, por exemplo, com diâmetros de 1,0, 1,5 e 2,0 mm.
- 3) Estudar a influência da transferência de calor entre ambas fases na velocidade do gás no orifício de saída do atomizador.
- 4) Validar o modelo de escoamento núcleo-anular para atomizadores bifásicos com câmara de mistura interna com mais de um orifício de saída.
- 5) Realizar um modelo que estime os padrões de golfadas e núcleo-anular no orifício de saída do atomizador bifásico com câmara de mistura interna.
- 6) Realizar um modelo núcleo-anular que considere a variável tempo na estimação da espessura do líquido no orifício de saída do atomizador bifásico com câmara de mistura interna.
- 7) Realizar um modelo de estimação do diâmetro médio das gotas no spray baseado na conservação da quantidade de movimento do líquido no orifício de saída do atomizador.

REFERÊNCIAS

ADEFONABI ADEFUYE, O.; IFENNA OKOLI, B. Design and performance evaluation of an air-blast atomizer. **International Journal of Science and Engineering Applications**, [s.l.], v. 6, n. 12, p. 364–371, 2017. Disponível em:

<https://ijsea.com/archive/volume6/issue12/IJSEA06121003.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2019.

AHMED, M.; YOUSSEF, M. S. Characteristics of mean droplet size produced by spinning disk atomizers. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, New York, v. 134, n. 7, p. 1–9, 2012. Disponível em:

<https://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering/article-abstract/134/7/071103/456375/Characteristics-of-Mean-Droplet-Size-Produced-by?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 19 fev. 2021.

AHMED, M.; YOUSSEF, M. S. Influence of spinning cup and disk atomizer configurations on droplet size and velocity characteristics. **Chemical Engineering Science**, Oxford, v. 107, p. 149–157, 2014. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009250913007987>. Acesso em: 19 fev. 2021.

ASHGRIZ, N. (ED.). **Handbook of Atomization and Sprays**. 1. ed. New York: Springer, 2011.

BASU, S. *et al.* (EDS.). **Droplets and Sprays**. 1. ed. Singapore: Springer, 2018.

BIROUK, M.; LEKIC, N. Liquid jet breakup in quiescent atmosphere: A review.

Atomization and Sprays, [s.l.], v. 19, n. 6, p. 501–528, 2009. Disponível em:

<https://www.dl.begellhouse.com/journals/6a7c7e10642258cc,5193c11a6e3c4643,69a4d92e1930c216.html>. Acesso em: 19 nov. 2021.

BRENNEN, C. E. **Fundamentals of Multiphase Flows**. 1. ed. [s.l.]: Cambridge University Press, 2005.

BRONIARZ-PRESS, L.; OCHOWIAK, M.; WOZIWODZKI, S. Atomization of PEO

aqueous solutions in effervescent atomizers. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, Guildford, v. 31, n. 4, p. 651–658, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142727X10000275>. Acesso em: 23 fev. 2019.

BUCKNER, H. N.; SOJKA, P. E. Effervescent atomization of high-viscosity fluids: Part I. Newtonian liquids. **Atomization and Sprays**, [s.l.], v. 1, n. 3, p. 239–252, 1991. Disponível em: <https://www.dl.begellhouse.com/journals/6a7c7e10642258cc,090b4ed560d7603f,5260170b39d93c84.html>. Acesso em: 26 fev. 2019.

BUCKNER, H. N.; SOJKA, P. E. Effervescent atomization of high-viscosity fluids: Part II. Non-newtonian liquids. **Atomization and Sprays**, [s.l.], v. 3, n. 2, p. 157–170, 1993. Disponível em: <https://www.dl.begellhouse.com/journals/6a7c7e10642258cc,4be396ea2e6d5add,46f05cd0329c53bc.html>. Acesso em: 26 fev. 2019.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A.; KANOĞLU, M. **Thermodynamics: An Engineering Approach**. 9. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Fluid Mechanics**. 3. ed. New York: McGraw Hill, 2014.

CHIN, J. S.; LEFEBVRE, A. H. A Design Procedure for Effervescent Atomizers. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, New York, v. 117, n. 2, p. 266–271, 1995. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/gasturbinespower/article-abstract/117/2/266/408473/A-Design-Procedure-for-Effervescent-Atomizers?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 23 fev. 2019.

DAFSARI, R. A. *et al.* Effect of Low ALR on the Spray Characteristics of a Pressure-swirl Duplex Nozzle. **Journal of Applied Fluid Mechanics**, [s.l.], v. 14, n. 3, p. 877–886, 2021. Disponível em: https://www.jafmonline.net/article_1129.html#:~:text=The%20spray%20angle%20tends%20to,increase%20in%20the%20axial%20distance.. Acesso em: 19 fev. 2021.

FORST, W.; HOFFMANN, D. **Optimization—Theory and Practice**. 1. ed. New York: Springer, 2010.

FROST, A. R. Rotary atomization in the ligament formation mode. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 26, n. 1, p. 63–78, 1981. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/002186348190127X#:~:text=A%20rotary%20atomizer%20can%20produce,ligaments%20formed%20from%20the%20edge..> Acesso em: 19 fev. 2021.

HANNA, R.; ZOUGHAIB, A. Atomization of high viscosity liquids through hydraulic atomizers designed for water atomization. **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v. 85, p. 140–153, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0894177717300705>. Acesso em: 23 fev. 2019.

JASUJA, A. K. Airblast atomization of alternative liquid petroleum fuels under high pressure conditions. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, New York, v. 103, n. 3, p. 514–518, 1981. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/gasturbinespower/article-abstract/103/3/514/405159/Airblast-Atomization-of-Alternative-Liquid?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 26 jan. 2020.

JEDELSKY, J. *et al.* Effervescent atomizer: influence of the operation conditions and internal geometry on spray structure; study using PIV-PLIF. In: INSTITUTE FOR LIQUID ATOMIZATION AND SPRAY SYSTEMS, 22., 2008, Como Lake. **Proceedings** [...]. Como Lake: 2008. p. 1-8.

JEDELSKY, J. *et al.* Development of an Effervescent Atomizer for Industrial Burners. **Energy and Fuels**, Washington, v. 23, n. 12, p. 6121–6130, 2009. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ef900670g>. Acesso em: 23 fev. 2019.

JEDELSKÝ, J. *et al.* Characteristics of droplet motion in effervescent sprays. **EPJ Web of Conferences**, v. 67, p. 02050, 2014. Disponível em: <https://www.epj->

conferences.org/articles/epjconf/abs/2014/04/epjconf_efm-13_02050/epjconf_efm-13_02050.html. Acesso em: 23 fev. 2019.

JEDELSKY, J.; JICHA, M. Unsteadiness in Effervescent Sprays – Measurement and Evaluation Using Combined PIV – PLIF Technique. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLICATIONS OF LASER TECHNIQUES TO FLUID MECHANICS*, 13., 2006, Lisbon. **Proceedings** [...]. Lisbon: 2006. p. 1-10.

JEDELSKY, J.; JICHA, M. Unsteadiness in effervescent sprays: A new evaluation method and the influence of operational conditions. **Atomization and Sprays**, [s.l.], v. 18, p. 49–83, 2008. Disponível em:
<https://www.dl.begellhouse.com/journals/6a7c7e10642258cc,7da5e43f06d335eb,4319cefd3bbc5dc2.html>. Acesso em: 23 fev. 2019.

JEDELSKY, J.; JICHA, M. Spatially and temporally resolved distributions of liquid in an effervescent spray. **Atomization and Sprays**, [s.l.], v. 22, n. 7, p. 603–626, 2012. Disponível em:
<https://www.dl.begellhouse.com/journals/6a7c7e10642258cc,490db98a5b65019a,33fb9e540089eabf.html>. Acesso em: 23 fev. 2019.

JEDELSKY, J.; JICHA, M. Energy conversion during effervescent atomization. **Fuel**, Guildford, v. 111, p. 836–844, 2013. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001623611300241X>. Acesso em: 23 fev. 2019.

JEDELSKY, J.; JICHA, M. Droplet dynamics in internally mixed twin-fluid spray. **WIT Transactions on Engineering Sciences**, [s.l.], v. 82, p. 227–238, 2014. Disponível em:
<https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-engineering-sciences/82/27290>. Acesso em: 23 fev. 2019.

JEDELSKÝ, J.; JÍCHA, M. Spray characteristics and liquid distribution of multi-hole effervescent atomisers for industrial burners. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 96, p. 286–296, 2016. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431115013253>. Acesso em: 23

fev. 2019.

JEDELSKY, J.; OTAHAL, J.; JICHA, M. Effervescent atomizer: influence of the internal geometry on atomization performance. *In: INSTITUTE FOR LIQUID ATOMIZATION AND SPRAY SYSTEMS*, 21., 2007, Mugla. **Proceedings** [...]. Mugla: 2007. p. 1-6.

JEDELSKY, J.; OTAHAL, J.; JICHA, M. Effervescent atomizer for atomization of suspensions containing large particles. *In: INSTITUTE FOR LIQUID ATOMIZATION AND SPRAY SYSTEMS*, 22., 2008, Como Lake. **Proceedings** [...]. Como Lake: 2008. p. 1-4.

JICHA, M. *et al.* Influence of some geometrical parameters on the characteristics of effervescent atomization. *In: INSTITUTE FOR LIQUID ATOMIZATION AND SPRAY SYSTEMS*, 18., 2002, Zaragoza. **Proceedings** [...]. Zaragoza: 2002. p. 1-6.

KLEINHANS, A. *et al.* On the characterization of spray unsteadiness and its influence on oil drop breakup during effervescent atomization. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, Lausanne, v. 104, p. 212–218, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S025527011630068X>. Acesso em: 06 out. 2021.

KOKATE, R.; SAVALIA, D.; MAHANT, J. Effect of internal geometry on performance of effervescent atomizer-A review. **International Journal of Advance Engineering and Research Development**, [s.l.], v. 5, n. 6, p. 366–371, 2018. Disponível em: <https://www.ijaerd.com/index.php/IJAERD/article/view/3684/3498>. Acesso em: 23 fev. 2019.

KONSTANTINOV, D. *et al.* Effervescent atomization for industrial energy-technology review. **Atomization and Sprays**, [s.l.], v. 20, n. 6, p. 525–552, 2010. Disponível em: <https://www.dl.begellhouse.com/en/journals/6a7c7e10642258cc,356d0f1001164cd1,5bc3e03a2e53b1ec.html>. Acesso em: 26 fev. 2019.

KOURMATZIS, A.; LOWE, A.; MASRI, A. R. Combined effervescent and airblast atomization of a liquid jet. **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v. 75, p.

66–76, 2016. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0894177716300139>. Acesso em: 19 jun. 2021.

KOURMATZIS, A.; LOWE, A.; MASRI, A. R. Conditioned Analysis of Effervescent Atomization. **Journal of Energy Engineering**, New York, v. 143, n. 5, p. 1–8, 2017. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29EY.1943-7897.0000447>. Acesso em: 18 fev. 2021.

LAN, Z. *et al.* Experimental study on spray characteristics of pressure-swirl nozzles in pressurizer. **Annals of Nuclear Energy**, Oxford, v. 63, p. 215–227, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306454913004039>. Acesso em: 15 out. 2020.

LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M. **Fluid mechanics**. 2. ed. Great Britain: Pergamon Press, 1987.

LEFEBVRE, A. H. Twin-fluid atomization: Factors influencing mean drop size. **Atomization and Sprays**, [s.l.], v. 2, p. 101–119, 1992. Disponível em: <https://www.dl.begellhouse.com/journals/6a7c7e10642258cc,3af122016104d704,2d572d4a2dcb05e0.html>. Acesso em: 18 out. 2020.

LEFEBVRE, A. H.; MCDONELL, V. G. **Atomization and Sprays**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.

LEFEBVRE, A. H.; MILLER, D. **The development of an air blast atomizer for gas turbine application**. Cranfield: The College of Aeronautics, 1966. 22 p. (Relatório, n. 193).

LEFEBVRE, A. H.; WANG, X. F.; MARTIN, C. A. Spray Characteristics of Aerated-Liquid Pressure Atomizers. **Journal of Propulsion and Power**, New York, v. 4, n. 4, p. 293–298, 1988. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/epdf/10.2514/3.23066>. Acesso em: 18 mar. 2021.

LIU, M.; DUAN, Y. Predicting the Liquid Film Thickness and Droplet–Gas Flow in

Effervescent Atomization: Influence of Operating Conditions and Fluid Viscosity.

International Journal of Chemical Reactor Engineering, [s.l.], v. 11, n. 1, p. 1–13, 2013.

Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/ijcre-2013-0073/html>.

Acesso em: 11 dez. 2020.

LORENZETTO, G. E.; LEFEBVRE, A. H. Measurements of Drop Size on a Plain-Jet

Airblast Atomizer. **AIAA Journal**, New York, v. 15, n. 7, p. 1006–1010, 1977. Disponível

em: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/3.60742?journalCode=aiaaj>. Acesso em: 12 out.

2020.

LUND, M. T. *et al.* Effervescent atomization at low mass flow rates. Part I: the influence of surface tension. **Atomization and Sprays**, [s.l.], v. 3, p. 77–89, 1993. Disponível em:

<https://www.dl.begellhouse.com/journals/6a7c7e10642258cc,1736d77548a6d0c2,48ef64c5382cb8ad.html>. Acesso em: 22 out. 2021.

LUND, M. T. *et al.* The influence of atomizing gas molecular weight on low mass flowrate effervescent atomizer performance. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, New York, v. 120, p. 750–754, 1998. Disponível em:

<https://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering/article-abstract/120/4/750/439667/The-Influence-of-Atomizing-Gas-Molecular-Weight-on?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 29 out. 2020.

MLKVIK, M. *et al.* Comparison of Y-jet and OIL effervescent atomizers based on internal and external two-phase flow characteristics. **EPJ Web of Conferences**, [s.l.], v. 114, p.

02078, 2016. Disponível em: [https://www.epj-](https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2016/09/epjconf_efm2016_02078.pdf)

[conferences.org/articles/epjconf/pdf/2016/09/epjconf_efm2016_02078.pdf](https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2016/09/epjconf_efm2016_02078.pdf). Acesso em: 18 out. 2020.

MUGELE, R. A.; EVANS, H. D. Droplet Size Distribution in Sprays. **Industrial and Engineering Chemistry**, Washington, n. June, p. 8, 1951. Disponível em:

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie50498a023>. Acesso em: 14 dez. 2019.

NASR, G. G.; YULE, A. J.; BENDIG, L. **Industrial Sprays and Atomization**. 1. ed.

London: Springer, 2002.

OCHOWIAK, M. *et al.* The effect of extensional viscosity on the effervescent atomization of polyacrylamide solutions. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, Washington, v. 18, n. 6, p. 2028–2035, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1226086X12001815>. Acesso em: 15 jan. 2021

OCHOWIAK, M. The effervescent atomization of oil-in-water emulsions. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, Lausanne, v. 52, p. 92–101, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0255270111002510>. Acesso em: 25 out. 2020.

OCHOWIAK, M. The experimental study on the viscosity effect on the discharge coefficient for effervescent atomizers. **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v. 50, p. 187–192, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S089417771300143X>. Acesso em: 13 out. 2020.

OCHOWIAK, M. *et al.* Characteristics of spray angle for effervescent-swirl atomizers. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, Lausanne, v. 98, p. 52–59, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0255270115301185>. Acesso em: 13 jan. 2020.

OCHOWIAK, M. Discharge coefficient of effervescent atomizers with the swirl motion phenomenon. **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v. 79, p. 44–51, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0894177716301698>. Acesso em: 23 jan. 2020.

OTAHAL, J.; FISER, J.; JICHA, M. Performance of pressure and effervescent atomizers. *In: COLLOQUIUM FLUID DYNAMICS*, 2007, Prague. **Proceedings [...]**. Prague: Institute of Thermomechanics AS CR: 2007. p. 1-7.

PANCHAGNULA, M. V.; SOJKA, P. E. Spatial droplet velocity and size profiles in effervescent atomizer-produced sprays. **Fuel**, Guildford, v. 78, n. 6, p. 729–741, 1999. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236198001926>. Acesso em: 16 out. 2020.

PANCHAGNULA, M. V.; SOJKA, P. E.; SANTANGELO, P. J. On the three-dimensional instability of a swirling, annular, inviscid liquid sheet subject to unequal gas velocities. **Physics of Fluids**, New York, v. 8, n. 12, p. 3300–3312, 1996. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/pof/article-abstract/8/12/3300/259243/On-the-three-dimensional-instability-of-a-swirling?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 14 out. 2020.

RAO, S. S. **Engineering Optimization**. 4. ed. [s.l.]: John Wiley & Sons, 2009.

RIZK, N. K.; MONGIA, H. C. Model for airblast atomization. **Journal of Propulsion and Power**, New York, v. 7, n. 3, p. 305–311, 1991. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/3.23328?journalCode=jpp>. Acesso em: 12 out. 2021.

ROESLER, T. C.; LEFEBVRE, A. H. Studies on Aerated-Liquid Atomization. **International Journal of Turbo and Jet Engines**, London, v. 6, n. 3–4, p. 221–230, 1989. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/TJJ.1989.6.3-4.221/pdf>. Acesso em: 18 out. 2020.

RONCEROS, J. R. *et al.* An improved theoretical formulation for Sauter mean diameter of pressure-swirl atomizers using geometrical parameters of atomization. **Propulsion and Power Research**, [s.l.], v. 11, n. 2, p. 240–252, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212540X22000360>. Acesso em: 05 jul. 2022.

ROUDINI, M.; WOZNIAK, G. Investigation of the secondary atomization in prefilming air-blast atomizers. **International Journal of Chemical Engineering and Applications**, [s.l.], v. 10, n. 5, p. 138–143, 2019. Disponível em: <http://www.ijcea.org/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=105&id=1160>. Acesso em: 02 jan. 2020.

SAZHIN, S. **Droplets and Sprays**. 1. ed. London: Springer, 2014.

SIRIGNANO, W. A. **Fluid dynamics and transport of droplets and sprays**. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2010.

SOVANI, S. D.; SOJKA, P. E.; LEFEBVRE, A. H. Effervescent atomization. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 27, n. 4, p. 483–521, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128500000290>. Acesso em: 13 out. 2018.

STÄHLE, P.; GAUKEL, V.; SCHUCHMANN, H. P. Influence of feed viscosity on the two-phase flow inside the exit orifice of an effervescent atomizer and on resulting spray characteristics. **Food Research International**, Barking, v. 77, p. 55–62, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996915002100>. Acesso em: 28 jan. 2018.

SUN, C. *et al.* Measurements of internal flow regime and bubble size in effervescent atomizer. **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v. 98, n. January, p. 604–620, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0894177718307271>. Acesso em: 21 out. 2020.

SUN, C. *et al.* Study on effervescent spray morphology based on internal gas-liquid two-phase flow patterns. **European Journal of Mechanics, B/Fluids**, Paris, v. 74, p. 123–138, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0997754617305113>. Acesso em: 27 fev. 2020.

SUN, W.; YUAN, Y.-X. **Optimization Theory and Methods**. 1. ed. New York: Springer US, 2006.

SUTHERLAND, J. J.; SOJKA, P. E.; PLESNIAK, M. W. Ligament-controlled effervescent atomization. **Atomization and Sprays**, [s.l.], v. 7, p. 383–406, 1997. Disponível em: <https://www.dl.begellhouse.com/journals/6a7c7e10642258cc,297c90b656bb2c5a,6893f30d>

24f47bcd.html. Acesso em: 29 out. 2018.

TAN, X. *et al.* On flow regime inside plain-orifice nozzle. **Chemical Engineering Transactions**, [s.l.], v. 61, p. 1939–1944, 2017. Disponível em: <https://www.cetjournal.it/index.php/cet/article/view/CET1761321>. Acesso em: 25 out. 2018.

WANG, X. F.; CHIN, J. S.; LEFEBVRE, A. H. Influence of Gas-Injector Geometry on Atomization Performance of Aerated-Liquid Nozzles. **International Journal of Turbo and Jet Engines**, London, v. 6, p. 271–279, 1989. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/TJJ.1989.6.3-4.271/pdf>. Acesso em: 13 out. 2018.

WIGG, L. D. Drop-size Prediction for Twin-fluid Atomizers. **Journal of the Institute of Fuel**, London, v. 27, p. 500–505, 1964.

WILLIAMS, A. **Combustion of liquid fuel sprays**. 1. ed. London: Butterworth & Co, 1990.

XIONG, H.-B.; LIN, J.-Z.; ZHU, Z.-F. Three-dimensional simulation of effervescent atomization spray. **Atomization and Sprays**, [s.l.], v. 19, n. 1, p. 75–90, 2009. Disponível em: <https://www.dl.begellhouse.com/journals/6a7c7e10642258cc,2f2d6c0205a2559a,3d0c359b5596b225.html>. Acesso em: 12 fev. 2020.

ZAREMBA, M. *et al.* Low-pressure twin-fluid atomization: Effect of mixing process on spray formation. **International Journal of Multiphase Flow**, Elmsford, v. 89, p. 277–289, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301932216300271>. Acesso em: 26 out. 2018.

ZHOU, Y. *et al.* Experimental investigation and model improvement on the atomization performance of single-hole Y-jet nozzle with high liquid flow rate. **Powder Technology**, Lausanne, v. 199, n. 3, p. 248–255, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591010000434>. Acesso em: 29

out. 2018.