

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS — UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
NÍVEL MESTRADO

ISADORA CARDOZO DIAS

**CARACTERIZAÇÃO DOS PADRÕES DE ESCOAMENTO NA EBULIÇÃO DO
ISOBUTANO EM UM MICRO CANAL**

Isadora Cardozo Dias

**CARACTERIZAÇÃO DOS PADRÕES DE ESCOAMENTO NA EBULIÇÃO DO
ISOBUTANO EM UM MICRO CANAL**

Dissertação apresentada como requisito para a
obtenção do título de Mestre pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos —
UNISINOS

Orientador:
Profa. Dra. Jacqueline Biancon Copetti

Coorientador:
Prof. Dr. Jéferson Diehl De Oliveira

D541c Dias, Isadora Cardozo

Caracterização dos padrões de escoamento na ebulição do isobutano em um micro canal / Isadora Cardozo Dias — 2020.

87 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, São Leopoldo, 2020.

“Orientador: Profa. Dra. Jacqueline Biancon Copetti, Unidade Acadêmica de Pesquisa e Pós-Graduação”.

1. Micro Canal Horizontal. 2. Ebulição Convectiva. 3. Escoamento Multifásico. 4. Análise de Frequências. 5. Isobutano.
I. Título.

CDU 621

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecária responsável: Amanda Schuster — CRB 10/2517

ISADORA CARDOZO DIAS

**CARACTERIZAÇÃO DOS PADRÕES DE ESCOAMENTO NA EBULIÇÃO DO
ISOBUTANO EM UM MICRO CANAL**

Dissertação apresentada como requisito para a
obtenção do título de Mestre pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos —
UNISINOS

Aprovado em 03 de julho de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cleiton Elsner da Fonseca - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das
Missões

Profa. Dra. Flávia Schwarz Franceschini Zinani - Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan - Universidade do Vale do Rio dos Sinos

AGRADECIMENTOS À CAPES

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

aos que buscam, que se dedicam, que nunca desistem, que lutam e que sempre querem mais
aos que perseguem os sonhos, que são resistência e que sempre serão

*Às vezes é bom ter medo.
Significa que você ainda tem algo a perder.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha orientadora, Profa. Dra. Jacqueline, por toda a paciência, dedicação, orientação, carinho e conversas (sobre vários assuntos) ao longo do árduo período deste mestrado. Também agradeço ao meu coorientador, Prof. Dr. Jéferson, por toda a ajuda, conselhos e parceria incrível no ICMF 2019.

Aos meus professores dessa jornada, mas em especial à Profa. Dra. Flávia, que sempre esteve ali para me ouvir, me aconselhar e dar puxões de orelha quando necessário (mais vezes do que eu gostaria e menos vezes do que eu merecia).

Também às meninas da secretaria do PPG, que sempre me atenderam com muita eficiência, atenção e carinho, mas em especial à Alice e à Anelise, que nunca mediram esforços para resolver as demandas que surgissem.

À minha família, pelo apoio, suporte e carinho nessa trajetória, minha eterna gratidão. Mãe e Gu, obrigada por tudo, mesmo! Pai, sempre pronto pra tomar um chimas ou preparar uma janta delícia, enquanto eu escrevia, obrigada! Paulo e Cris, que se tornaram da família, obrigada pelo abrigo, conselhos, revisões, dicas e, principalmente, pela afilhada mais linda desse mundo, que iluminou minha vida, então, obrigada Aurora!

Agradeço aos meus colegas de mestrado, por todas as manhãs, tarde e noites na salinha dos bolsistas, com rodas de chimarrão, discussões técnicas, políticas e piadas. Sem vocês teria sido um caminho muito mais árduo. E claro, obrigada pelas confraternizações do PPGEM, que sempre foram incríveis! Não posso deixar de agradecer um pouco mais, ao Álisson, à Camila e ao Fernando, que acompanharam toda essa loucura que foram esses meses todos da pós-graduação.

Aos meus amigos, por me apoiarem, incentivarem e entenderem a minha ausência nesse tempo. Por me auxiliarem dos mais diversos modos, sendo com uma conversa, um carinho, umas risadas, umas cuias de mate, um churrasco ou apenas uma mensagem dizendo que tudo iria dar certo, parece que deu mesmo... Todos merecem meu carinho, mas alguns foram incrivelmente especiais, então, obrigada demais: Amanda, Anne, Babi, Balbi, Caetano, Dé, Ivi, João, Lukas, Mari, Nessa (Dora e Ucha junto), Renan e Tati.

*“I have not failed.
I’ve just found 10.000 ways that won’t work.”*
Thomas Edison (18xx)

RESUMO

Novas aplicações para sistemas de refrigeração surgem a todo momento, pois os processos de fabricação industriais, sistemas nucleares, aeroespaciais e outros que geram calor durante o seu uso estão sempre sendo desenvolvidos, devido à essa necessidade, trocadores de calor compactos precisam ser aprimorados, exigindo estudos referentes à troca térmica e às melhorias nas eficiências energéticas. Os sistemas compactos são estudados para suprir essas demandas, então aliar o processo de mudança de fase do fluido com o desenvolvimento de sistemas compactos de mini e micro canais torna-se cada vez mais necessário. O presente trabalho analisou dados da ebulição do refrigerante isobutano (R600a) em um micro canal horizontal (diâmetro interno de 1 mm), que compõe uma bancada experimental composta de três seções (pré-aquecimento, teste e visualização), assim como diversos sensores para medição de temperatura, vazão, pressão e um sensor óptico. Foram realizados testes com variações de velocidades mássicas ($520 \frac{kg}{m^2s} \sim 1220 \frac{kg}{m^2s}$) e fluxo de calor ($10 \frac{kW}{m^2} \sim 60 \frac{kW}{m^2}$) e a aquisição dos dados de temperatura, pressão e vazão para posterior tratamento. Também foram registradas imagens do escoamento nas diferentes condições e registrados os sinais de um sensor óptico associados a esses. Assim os padrões de escoamento foram avaliados através da identificação das imagens e também com o tratamento dos dados do sensor óptico com a metodologia da Transformada Rápida de Fourier (FFT) aliada à Densidade de Potência Espectral (PSD), assim como tratamento das imagens dos padrões para determinação da área longitudinal ocupada pelo vapor no tubo. Para a análise das frequências características foi utilizado o método PSD, foram calculadas a fração de vazio, o título de vapor e as velocidades das fases e as imagens foram tratadas com algoritmo em *python* desenvolvido nesse trabalho. Para os menores valores de velocidade mássica (G), foram alcançados os maiores títulos de vapor, e todos os padrões de bolhas isoladas, alongadas, *slug*, *churn* e anular foram observados. Enquanto que para os G mais elevados, mesmo quando aplicado um fluxo de calor maior na seção de testes (ST), os títulos foram reduzidos e os padrões predominantemente observados foram intermitentes (*slug* e *churn*) e anular. Na análise de frequência foram encontrados valores semelhantes de frequências (onde se concentram as maiores densidades de potência espectral) entre os mesmos padrões para diferentes testes realizados, para o padrão de bolhas isoladas o maior valor ocorre na frequência de 15 Hz e para os padrões *churn* e anular ondulado para valores menores que 5 Hz, indo até a frequência de 10 Hz. O tratamento de imagens através do algoritmo desenvolvido foi capaz de identificar a área longitudinal ocupada para os padrões de bolhas isoladas e bolhas alongadas.

Palavras-chave: Micro Canal Horizontal. Ebulição Convectiva. Escoamento Multifásico. Análise de Frequências. Isobutano.

ABSTRACT

New applications for refrigeration systems are emerging all the time, as industrial manufacturing processes, nuclear, aerospace and other systems that generate heat during their use are always being developed, due to this need, compact heat exchangers need to be improved, requiring studies related to thermal exchange and improvements in energy efficiency. Compact systems are studied to meet these demands, so combining the fluid phase change process with the development of compact mini and micro channel systems becomes increasingly necessary. The present work analyzed data on the boiling of the isobutane refrigerant (R600a) in a horizontal micro channel (internal diameter of 1 mm), which makes up an experimental bench made up of three sections (pre-heating, testing and visualization), as well as several sensors for measuring temperature, flow, pressure and an optical sensor. Tests were carried out with variations in mass velocities ($520 \frac{kg}{m^2s} \sim 1220 \frac{kg}{m^2s}$) and heat flow ($10 \frac{kW}{m^2} \sim 60 \frac{kW}{m^2}$) and the acquisition of temperature, pressure and flow data for further treatment. Flow images were also recorded under different conditions and the signals from an optical sensor associated with these were recorded. Thus, the flow patterns were assessed by identifying the images and also by treating the optical sensor data with the Fast Fourier Transform (FFT) methodology combined with Power Spectral Density (PSD), as well as treating the images of the patterns to determine the longitudinal area occupied by the steam in the tube. For the analysis of the characteristic frequencies, the PSD method was used, the void fraction, flow velocities and vapor title were calculated and the images treated with an python algorithm developed in this work. For the lowest values of mass velocity (G), the highest vapor title were achieved, and all patterns of isolated, elongated, slug, churn and annular bubbles were observed. While for the higher G, even when a greater heat flow was applied to the test section (TS), the vapor title were reduced and the predominantly observed patterns were intermittent (slug and churn) and annular. In the frequency analysis, similar values of frequencies (where the highest power spectral densities are concentrated) were found between the same patterns for different tests performed, for the pattern of isolated bubbles the highest value occurs at the frequency of 15 Hz and for the churn patterns and wavy annular for values below 5 Hz, going up to the frequency of 10 Hz. The image processing through the developed algorithm was able to identify the longitudinal area occupied for the patterns of isolated bubbles and elongated bubbles.

Keywords: Horizontal Microchannel. Convective Boiling. Multiphase Flow. Frequency Analysis. Isobutane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Padrão de Escoamento de Bolhas Dispersas	24
Figura 2	Padrão de Escoamento pistonado	24
Figura 3	Padrão de Escoamento Estratificado Liso	25
Figura 4	Padrão de Escoamento Estratificado Ondulado	25
Figura 5	Padrão de Escoamento Intermitente	25
Figura 6	Padrão de Escoamento Anular	26
Figura 7	Mapa de Padrões de Escoamento de Baker	27
Figura 8	Mapa de Padrões de Escoamento de Mandhane, Gregory e Aziz	27
Figura 9	Mapa de Padrões de Escoamento de Taitel e Dukler	28
Figura 10	Mapa de Padrões de Escoamento de Wojtan, Ursenbacher e Thome	28
Figura 11	Mapa de Padrões de Escoamento de Ong e Thome	29
Figura 12	Curva de Ebulição	44
Figura 13	Padrões de Escoamento na Ebulição	45
Figura 14	Esquema da Bancada Experimental	50
Figura 15	Esquema do Posicionamento dos Termopares na Superfície da ST	54
Figura 16	Sensor Óptico e Circuito Eletrônico	55
Figura 17	Etapas do Experimento	56
Figura 18	Processos do Tratamento de Imagem Realizados pelo Algoritmo	62
Figura 19	Padrões de Escoamento do R600a	65
Figura 20	Mapa de Velocidades de Escoamento para o R600a	67
Figura 21	Mapa de Padrões de Escoamento para R600a	68
Figura 22	Espectros de Frêquencia: R600a, $G = 520 \frac{kg}{m^2s}$ e diferentes q''	70
Figura 23	Espectros de Frêquencia: R600a, $G = 740 \frac{kg}{m^2s}$ e diferentes q''	72
Figura 24	Espectros de Frêquencia: R600a, $G = 1220 \frac{kg}{m^2s}$ e diferentes q''	73
Figura 25	Espectros de Frêquencia: R600a, $q'' = 40 \frac{kW}{m^2}$ e diferentes G	74
Figura 26	Ocupação Longitudinal do Canal	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Resumo das Classificações de Canais	23
Tabela 2	Padrões de Escoamento Observados em Micro Canais	26
Tabela 3	Classificação dos Hidrocarbonetos	47
Tabela 4	Características e Propriedades: R600a, R290, R1270	48
Tabela 5	Características e Propriedades: R600a, R134a	48
Tabela 6	Composição da Bancada Experimental	51
Tabela 7	Parâmetros Considerados nos Testes	57

LISTA DE ABREVIATURAS

2D	Duas Dimensões
A	Padrão de Escoamento Anular
Água DI	Água Deionizada
AmpOp	Amplificador Operacional
BC	Padrão de Escoamento Bolhas Coalescentes
BI	Padrão de Escoamento Bolhas Isoladas
CFC	Clorofluorcarbono
CHF	<i>Critical Heat Flux</i> , Fluxo de Calor Crítico
COP	Coefficiente de Performance
CHMM	<i>Continuos Hidden Markov Model</i> , Modelo Contínuo Oculto de Markov
D	Padrão de Escoamento Secagem
DC	<i>Direct Current</i> , Corrente Contínua
DP	<i>Diferential Pressure</i> , Pressão Diferencial
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> , Transformada Rápida de Fourier
FT	<i>Fourier Transform</i> , Transformada de Fourier
GWP	<i>Global Warming Potencial</i> , Potencial de Aquecimento Global
HC	Hidrocarbonetos
HCFC	Clorodifluorometano
HFC	Hidrofluorcarbono
I	Padrão de Escoamento Intermitente
IR	<i>Infrared</i> , Infravermelho
IVM	<i>Impedance Volt Meter</i> , Medidor de Impedância de Tensão
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i> , Resistor Dependente de Luz
LED	<i>Light Emitting Diode</i> , Diodo Emissor de Luz
M	Padrão de Escoamento Névoa
ODP	<i>Ozone Deplation Potencial</i> , Potencial de Destruição da Camada de Ozônio
ONB	<i>Onset Nucleate Boiling</i> , Início da Ebulição Nucleada
PA	Pressão Absoluta
PDF	<i>Probability Density Function</i> , Função de Densidade de Probabilidade
PH	<i>Pre Heating</i> , Pré-aquecimento
PSD	<i>Power Spectral Density</i> , Densidade de Potência Espectral
S	Padrão de Escoamento Estratificado
SO	Sensor Óptico

ST	<i>Test Section</i> , Seção de Testes
SV	Seção de Visualização
TS	<i>Test Section</i> , Seção de Testes
W	Padrão de Escoamento Estratificado Ondulado

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área Transversal Total [m ²]
A_g	Área Transversal Ocupada pelo Gás ou Vapor [m ²]
A_l	Área Transversal Ocupada pelo Líquido [m ²]
A_{st}	Área da Seção Transversal [m ²]
A_{sup}	Área de Superfície [m ²]
Bo	Número de Boiling [–]
c_p	Calor Específico [J/(kg.K)]
C_o	Número de Confinamento [–]
D	Diâmetro do Canal [mm]
D_{bolha}	Diâmetro da Bolha [mm]
d_e	Diâmetro Externo do Canal [mm]
D_h, D_{hc}	Diâmetro Hidráulico do Canal [mm]
d_i	Diâmetro Interno do Canal [mm]
ΔP	Diferença de Pressão [–]
ΔP_{ST}	Diferença de Pressão na ST [–]
$\Delta T_{superaq}$	Diferença de Temperatura de Saturação do Fluido [–]
e	Número de Euler [–]
f	Frequência [Hz]
$\mathcal{F}\{f(t)\}$	Função no Domínio das Frequências
$f(t)$	Função no Domínio do Tempo
Fr	Número de Froude [–]
g	Aceleração da Gravidade [m/s ²]
G	Velocidade Mássica [kg/(m ² s)]
G_g	Velocidade Mássica do Gás [kg/(m ² s)]
G_l	Velocidade Mássica do Líquido [kg/(m ² s)]
g_o	Campo Externo Característico [–]
h	Coefficiente Convectivo de Transferência de Calor [W/(m ² K)]
h_{lv}	Entalpia de Vaporização [kJ/kg]
i_{eST}	Entalpia de Entrada da ST [kJ/kg]
i_{sST}	Entalpia de Saída da ST [kJ/kg]
i_{lsST}	Entalpia de Saída do Líquido Saturado da ST [kJ/kg]
i_{vsST}	Entalpia de Saída do Vapor Saturado da ST [kJ/kg]

I_{ST}	Corrente da Fonte de Calor na ST [A]
Ja	Número de Jacob [—]
j_g, j_v	Velocidade Superficial do Vapor [m/s]
j_l	Velocidade Superficial do Líquido [m/s]
k	Condutividade Térmica [W/(m.K)]
L	Comprimento do Canal [m]
l_o	Comprimento Característico [—]
L_{sub}	Distância do Início da Área Aquecida [m]
\dot{m}	Vazão Mássica [kg/s]
\dot{m}_g	Vazão Mássica da Fase Gás ou Vapor [kg/s]
P_{eST}	Pressão de Entrada da ST [kPa]
P_{ePH}	Pressão de Entrada do pH [kPa]
P_{sat}	Pressão de Saturação [kPa]
P_{sST}	Pressão de Saída da ST [kPa]
P_{sPH}	Pressão de Saída do pH [kPa]
q	Taxa de Calor [W]
q_{PH}	Taxa de Calor no pH [W]
q_{ST}	Taxa de Calor na ST [W]
q''	Fluxo de Calor [kW/m ²]
q''_{ST}	Fluxo de Calor na ST [kW/m ²]
Re	Número de Reynolds [—]
r_e	Raio Externo do Canal [m]
r_i	Raio Interno do Canal [m]
S	Razão de Escorregamento [—]
t	Tempo [s]
T_b	Temperatura de Ebulição [°C]
T_{eST}	Temperatura de Entrada da ST [°C]
T_{ePH}	Temperatura de Entrada do pH [°C]
T_s	Temperatura de Superfície Sólida [°C]
T_{sat}	Temperatura de Saturação [°C]
T_{se}	Temperatura de Superfície Externa [°C]
T_{sei}	Temperatura de Superfície Externa Inferior [°C]
T_{ses}	Temperatura de Superfície Externa Superior [°C]
T_{si}	Temperatura de Superfície Interna [°C]

T_{sST}	Temperatura de Saída da ST [°C]
T_{sPH}	Temperatura de Saída do pH [°C]
T_w	Temperatura de parede [°C]
u_o	Velocidade de Fluxo [m/s]
V_{ST}	Tensão da Fonte de Calor na ST [V]
x	Título de Vapor [–]
x_{sST}	Título de Vapor na saída da ST [–]
z	Posição ao Longo do Comprimento do Tubo [m]

LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

α	Fração de Vazio [–]
α_{long}	Ocupação Longitudinal do Canal [adimensional ou %]
λ	Fator Adimensional de Baker para Propriedades do Ar [–]
λ_L	Expoente de Lyapunov [–]
μ	Viscosidade Dinâmica [(N.s)/m ²]
ρ_g, ρ_v, r_g	Massa Específica do Vapor [kg/m ³]
ρ_l, r_l	Massa Específica do Líquido [kg/m ³]
σ	Tensão Superficial [N/m]
ψ	Fator Adimensional de Baker para Propriedades da Água [–]
$\psi(t)$	Função Ondaleta-mãe
ω	Frequência Angular [rad/s]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Objetivos	20
1.1.1 Objetivo Geral	20
1.1.2 Objetivos Específicos	20
1.2 Justificativa	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 Escoamento Bifásico em Tubos Horizontais	22
2.1.1 Padrões de Escoamento em Micro Canais Horizontais	23
2.1.2 Mapas de Padrões de Escoamento	26
2.2 Caracterização do Escoamento Bifásico	29
2.2.1 Métodos Experimentais para Determinação dos Padrões e da Fração de Vazio	30
2.2.2 Métodos para Análise de Fração de Vazio	34
2.2.2.1 Análise por Imagens	34
2.2.2.2 Transformada de Fourier e de Ondas; Densidade de Potência Espectral (PSD)	36
2.2.2.3 Função de Densidade de Probabilidade (PDF)	39
2.2.2.4 Comparação com Mapas de Padrões de Escoamento	40
2.2.2.5 Modelo de Fluxo de Deriva	41
2.2.2.6 Outros Métodos de Análise de Fração de Vazio	42
2.3 Ebulição	43
2.4 Fluidos Refrigerantes	45
2.4.1 Hidrocarbonetos	46
3 MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1 Bancada Experimental	50
3.1.1 Seções de Pré-Aquecimento, Teste e Visualização	51
3.1.2 Fontes de Potência	52
3.1.3 Condensador, Sub-resfriador, Banhos Térmicos	52
3.1.4 Separador de Refrigerante, Reservatório e Filtro Secador	52
3.1.5 Bomba e Inversor de Frequência	53
3.1.6 Medidor de Vazão Mássica	53
3.1.7 Transdutor de Pressão	53
3.1.8 Sensores de Temperatura	53
3.1.9 Sensor Óptico	54
3.1.10 Câmera de Alta Velocidade	55
3.1.11 Sistema de Aquisição de Dados	55
3.2 Métodos	56
4 ANÁLISE DE RESULTADOS	65
4.1 Padrões de Escoamento	65
4.2 Frequências Características	69
4.3 Tratamento de Imagens	74
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
5.1 Sugestão de Trabalhos Futuros	77
REFERÊNCIAS	78

APÊNDICE A – CÓDIGO DE TRATAMENTO DAS IMAGENS	83
APÊNDICE B – SCRIPT MATLAB PARA CÁLCULO DA FFT E PSD	87

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da necessidade de sistemas cada vez mais compactos de dissipação de calor e com a evolução dos processos de fabricação, as aplicações industriais, nucleares, aeroespaciais e de refrigeração passaram a demandar estudos referentes à troca térmica e às melhorias nas eficiências energéticas. Os sistemas compactos que estão no foco destes estudos são, principalmente, bombas de calor compactas, ar condicionado automotivo, resfriamento de componentes eletrônicos e de lasers, elementos de veículos espaciais, controle de temperatura de satélites e de células combustíveis.

Associar o processo de mudança de fase do fluido com o desenvolvimento de sistemas compactos de mini e micro canais torna-se cada vez mais necessário, visto que isso possibilita elevar a relação entre área de troca térmica e volume do escoamento, aumentar a dissipação de calor, permitir o trabalho com pressões elevadas, minimizar o tamanho dos trocadores e da quantidade de material e utilizar menores cargas de fluidos refrigerantes, entre outros.

Além disso, outra preocupação acerca do tema, é o risco que os fluidos refrigerantes podem oferecer ao meio ambiente, como aumento do efeito estufa, aquecimento global e degradação da camada de ozônio, riscos esses que já foram reduzidos com a proibição da utilização de fluidos refrigerantes a base de cloro. Por este motivo, é necessário entender as características dos novos fluidos que vêm sendo utilizados, os hidrocarbonetos, que acabam sendo escolhas mais seguras em sistemas compactos, pois mesmo possuindo alto risco de inflamabilidade e toxicidade, como utilizam cargas menores de refrigerante, oferecem menos riscos ambientais (PEREIRA, 2010).

A transferência de calor está diretamente relacionada com os padrões de escoamento desenvolvidos pelos fluidos refrigerantes dentro de um canal, ao serem aquecidos por uma fonte externa de calor. Alguns padrões possibilitam uma troca de calor mais eficiente, ou seja, com maiores coeficientes convectivos de transferência de calor associados ao escoamento. Entender qual padrão está relacionado com cada velocidade mássica, fluxo de calor, fração de vazio e outras variantes é de suma importância, para ser possível criar trocadores de calor mais eficientes, aliando as características dos fluidos com melhores configurações de operação e *design* do trocador.

Como nem sempre é viável visualizar o padrão que está sendo desenvolvido no interior do tubo, então é necessário avaliar de outras formas, uma delas é através das frequências geradas pelos sinais de temperatura, pressão, vazão e fração de vazio registrados no escoamento de um fluido refrigerante durante a ebulição em um micro canal, o que é possível com a realização de experimentos, medições com sensores e processamento de imagens. Estas técnicas são utilizadas para identificar os padrões, lembrando que é a partir dos padrões que é possível determinar o melhor aproveitamento térmico dos trocadores de calor.

Trabalhos vêm sendo realizados para caracterizar a transferência de calor em mini e micro canais, mas com relação à identificação dos padrões de escoamento, os resultados ainda são escassos. Com base nisso, esta pesquisa apresenta uma análise de dados experimentais da

ebulição do refrigerante R600a em um micro canal, analisando padrões de escoamento através de diferentes metodologias, assim como tratamento das imagens dos padrões para determinação da área longitudinal ocupada pelo vapor no tubo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é investigar e mapear os padrões de escoamento do fluido refrigerante R600a durante a ebulição em um micro canal.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar os padrões de escoamento através da análise de sinais de um sensor óptico, comparando com a visualização dos padrões através de imagens;
- b) Verificar as frequências características associadas aos padrões de escoamento através do método matemático de densidade de potência espectral;
- c) Calcular a ocupação longitudinal do canal para diferentes padrões de escoamento através do tratamento de imagens.

1.2 Justificativa

Determinar o comportamento dos componentes de sistemas térmicos está se fazendo cada vez mais necessário, já que a modernização de dispositivos eletrônicos está ocorrendo a cada dia de maneira mais rápida, com isso, os processadores e controladores estão sempre mais eficientes e compactos, exigindo que seus sistemas de resfriamento estejam aptos a atuarem nas configurações exigidas de funcionamento, como diferentes pressões, temperaturas, diâmetros de canais e capacidades de troca térmica, o que torna ainda mais relevante o aprofundamento em estudos sobre o escoamento destes fluidos refrigerantes durante a ebulição, através da determinação de suas características de escoamento e comportamento térmico quando submetidos a diferentes fluxos de calor, diferentes pressões, variações de temperatura e variações de vazão, é importante para o desenvolvimento dos sistemas e suas aplicações.

Já que a taxa de transferência de calor está diretamente ligada aos padrões de escoamento, e nem sempre é possível utilizar canais transparentes para visualização, faz-se necessário desenvolver outras técnicas para determinar os padrões, ou seja, através de sinais de sensores, de dados de pressão, de vazão e outros. Ainda por este motivo, é importante entender a relação entre as amplitudes e frequências dos sinais lidos com os padrões que estão ocorrendo dentro do tubo, para que seja possível controlar e aprimorar a troca térmica. Outro motivo que torna esse

estudo necessário é que no momento de projetar um trocador de calor, tanto de tamanho convencional quanto compacto, é crucial saber em qual regime ocorrerá a operação, por esse motivo os dados experimentais precisam ser avaliados em um regime desenvolvidos de escoamento.

Além disso, métodos de tratamento de imagens são importantes para a determinação dos padrões de escoamento e também podem ser utilizados para a determinação da ocupação do canal pela fase de vapor, o que pode ocorrer com o auxílio de sensores ou ainda de algoritmos, assim como dados lidos de temperatura e pressão permitem calcular a fração de vazio associada aos mesmos, que são importantes parâmetros de modelagem para projetos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresenta-se uma fundamentação teórica do processo de ebulição convectiva em canais horizontais, com enfoque na mudança de fase de fluidos refrigerantes, para embasar os conceitos necessários para a elaboração deste trabalho. Ainda, uma revisão do estado da arte, acerca dos trabalhos que vêm sendo desenvolvidos sobre técnicas de medição e análise de escoamento bifásico em mini e micro canais.

2.1 Escoamento Bifásico em Tubos Horizontais

O escoamento bifásico em tubos horizontais possui características muito próprias, que diferem significativamente das desenvolvidas em canais verticais, já que existe uma influência grande da força da gravidade nesta orientação, que faz com que as forças de empuxo atuem sobre a fase de vapor do escoamento.

Além desta interferência da orientação, o diâmetro do canal ainda impacta diretamente nos padrões de escoamento a serem desenvolvidos e também na possível transferência de calor associada ao mesmo. Os padrões podem ser caracterizados baseando-se em diversos fatores, como fração de vazio, velocidade das fases e propriedades térmicas, por exemplo.

Os padrões podem variar conforme o diâmetro do canal, assim foram atribuídas as denominações macro, meso, mini, micro e nano canais, conforme a faixa de diâmetro. Existe muita divergência entre os autores para a delimitação destas escalas, para Mehendale, Jacobi e Shah (2009) macro canais são aqueles com diâmetro interno superior a 6 mm, canais compactos variam entre 1 mm e 6 mm, meso escala fica entre 0,1 mm e 1 mm e os micro canais entre 1 μm e 100 μm . Para Jacobi e Thome (2002), se o diâmetro das bolhas for similar ao diâmetro hidráulico do tubo, é mini/micro canal, já se o D_h for maior que o da bolha, é considerado macro canal. Outra classificação, proposta por Kew e Cornwell (1997), considera o confinamento das bolhas, através do número de confinamento, Co , conforme Equação 2.1:

$$Co = \frac{1}{D_{hc}} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}} \quad (2.1)$$

sendo σ é a tensão superficial, g é a aceleração da gravidade, ρ_l e ρ_g são as massas específicas do líquido e do vapor, respectivamente, e D_{hc} é o diâmetro hidráulico do canal.

Os efeitos do confinamento, baseados em estudos de escoamento capilar, serão significativos para canais com número de confinamento superior a 0,5. Uma escala mais refinada é proposta por Kandlikar e Grande (2003), que divide os tamanhos entre convencionais (maiores que 3 mm), mini canais (de 0,2 mm a 3 mm), micro tubos (de 10 μm a 200 μm) e nano canais (menores que 10 μm). Uma síntese destes dados é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1: Resumo das Classificações de Canais

Autores	Nano canal	Micro canal	Mini canal	Meso canal	Canal compacto/ convencional	Macro canal/canal convencional
⁽¹⁾	-	$Co > 0,5$	-	-	-	$Co < 0,5$
⁽²⁾	-	$D_h \approx D_{bolha}$	$D_h \approx D_{bolha}$	-	-	$D_h > D_{bolha}$
⁽³⁾	$D_h < 10 \mu\text{m}$	$10 \mu\text{m} < D_h < 200 \mu\text{m}$	$0,2 \text{ mm} < D_h < 3 \text{ mm}$	-	-	$D_h > 3 \text{ mm}$
⁽⁴⁾	-	$1 \mu\text{m} < D_h < 100 \mu\text{m}$	-	$0,1 \text{ mm} < D_h < 1 \text{ mm}$	$1 \text{ mm} < D_h < 6 \text{ mm}$	$D_h > 6 \text{ mm}$

Fonte: Elaborado pela autora.

Kew e Cornwell (1997)¹, Jacobi e Thome (2002)², Kandlikar e Grande (2003)³, Mehendale, Jacobi e Shah (2009)⁴.

2.1.1 Padrões de Escoamento em Micro Canais Horizontais

Os escoamentos bifásicos são classificados como dispersos, intermitentes e anulares, conforme o padrão de bolhas.

a) Escoamento disperso:

- Bolhas isoladas.

b) Escoamento intermitente:

- Bolhas alongadas;
- Pistonado (*plug*);
- Em golfadas (*slug*);
- Agitado (*churn*).

c) Escoamento separado:

- Estratificado liso e ondulado;
- Anular liso e ondulado.

Os padrões observados em macro canais podem ser bolhas dispersas, pistonado, intermitente em golfadas, estratificado, anular e névoa, que dependem da orientação do tubo, escoamento

adiabático ou diabático, vazão do fluido, etc. (COLLIER; THOME, 1994). Esses não são necessariamente vistos em mini e micro canais. Os padrões para canais de diâmetros reduzidos que geralmente são observados são bolhas isoladas, bolhas alongadas, pistonado, intermitente e anular. (MEHENDALE; JACOBI; SHAH, 2009).

- Bolhas dispersas

Caracterizado por volumes circulares de vapor, dispersos na fase líquida do escoamento, conforme pode ser observado na Figura 1. Geralmente não alcançam tamanho que cheguem a ser comparáveis ao diâmetro do tubo. Devido à força da gravidade e às forças de empuxo, as bolhas costumam se acumular próximas à parede superior do canal e ocorrem, com mais frequência, para vazões intermediárias.

Figura 1: Padrão de Escoamento de Bolhas Dispersas



Fonte: Adaptado de Collier e Thome (1994).

- Pistonado

Como o próprio nome sugere, são pistões de vapor escoando dentro da fase líquida, similar ao padrão de bolhas alongadas, pois possuem o formato de uma bolha com uma tampa esférica, tanto no início quanto no final da fase gasosa. Também devido à força da gravidade e empuxo, tanto o nariz quanto a cauda do pistão são localizados nos dois quadrantes superiores do tubo, como mostra a Figura 2. As bolhas alongadas ocupam quase todo o diâmetro do canal, mas em mini e micro canais, podem chegar ao próprio diâmetro hidráulico do tubo. Este padrão ocorre tanto em baixas quanto em altas vazões, diferindo apenas no formato de pistão gerado em cada um dos casos.

Figura 2: Padrão de Escoamento pistonado



Fonte: Adaptado de Collier e Thome (1994).

- Estratificado Liso

Em macro canais, dependendo da maneira como ocorre a transferência de calor e qual é a velocidade do fluido, pode ocorrer uma separação clara entre as fases, como visto na Figura 3, sendo este o padrão estratificado. A divisão entre vapor e líquido se dá de

maneira suave, sendo fácil de observar o vapor na parte superior do tubo e o líquido na inferior.

Figura 3: Padrão de Escoamento Estratificado Liso

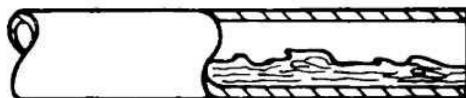


Fonte: Adaptado de Collier e Thome (1994).

- Estratificado Ondulado

Ainda com uma separação clara entre as fases, esse padrão apresenta ondulações devido ao aumento da velocidade do escoamento, esse também é um padrão observado somente em macro canais. A Figura 4 apresenta essa agitação que ocorre entre o vapor e o líquido.

Figura 4: Padrão de Escoamento Estratificado Ondulado



Fonte: Adaptado de Collier e Thome (1994).

- Intermitente

Mostrado na Figura 5 e também conhecido como padrão em golfadas, este apresenta jatos de vapor que surgem com o aumento da velocidade da fase não líquida. Este escoamento, quando numa situação de mudança de fase, cria uma fina camada de vapor super-aquecido na parte superior do canal, já que as intermitências do vapor se acumulam nesta região, no caso de uma orientação horizontal do canal.

Figura 5: Padrão de Escoamento Intermitente



Fonte: Adaptado de Collier e Thome (1994).

- Anular

Neste padrão, ocorre o acúmulo da fase líquida nas paredes do canal, formando um corredor no centro do tubo, onde podem ocorrer alguns desprendimentos de bolhas para esta região central, o que pode ser observado na Figura 6.

Figura 6: Padrão de Escoamento Anular



Fonte: Adaptado de Collier e Thome (1994).

Ainda existem os padrões de transição, que ocorrem quando o escoamento está passando de um padrão para outro, que são etapas que ocorrem entre as alterações de vazões ou fluxo de calor no escoamento. A Tabela 2 mostra o compilado dos casos encontrados por alguns autores, para mini e micro canais, sendo importante salientar que o tipo de fluido, caso seja uma mistura ou um fluido em mudança de fase, pode alterar os padrões encontrados em cada experimento.

Tabela 2: Padrões de Escoamento Observados em Micro Canais

Autor	Fluido	Diâmetro do Canal [mm]	G [$kg/m^2 \cdot s$]	q'' [kW/m^2]	Bolhas isoladas/dispersas	Bolhas confinadas	Pistonado	Pistonado instável	Intermitente	Estratificado ondulado	Disperso	Anular intermitente	Anular	Transições de anular	Névoa
(1)	R141b	1,39 - 3,69	188 - 1480	16,6 - 90	o	o						o			
(2)	Ar-água	1 - 3	300 - 1600	-	o		o		o	o	o		o		
(3)	Água DI e gás N_2	0,1	-	-										o	
(4)	R134a; R245fa	0,509 - 0,79	210 - 2094	3,1 - 415									o	o	
(5)	CO_2	1 - 3	100 - 700	5 - 50	o		o		o	o			o	o	o
(6)	Ar-água	1,05	-	-	o		o	o	o						

Fonte: Elaborado pela autora.

Kew e Cornwell (1997)¹, Yang e Shieh (2001)², Kawahara, Chung e Kawaji (2002)³, Revellin e Thome (2007)⁴, Ozawa et al. (2009)⁵ e Donaldson, Kirpalani e Macchi (2011)⁶.

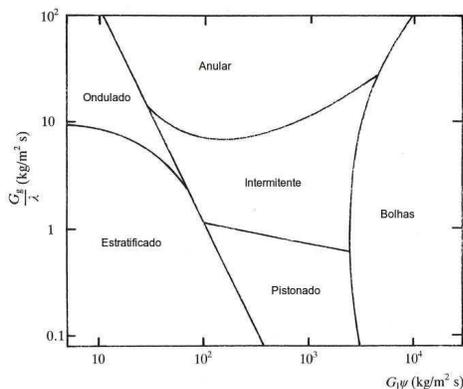
2.1.2 Mapas de Padrões de Escoamento

Os mapas de padrões de escoamento são gráficos construídos baseados em um banco de dados experimentais e servem para auxiliar na previsão dos padrões a serem encontrados nos testes, assim como nas transições entre eles. Os mapas podem ser construídos baseados em parâmetros como velocidades das fases, velocidade mássica, título de vapor e alguns outros parâmetros adimensionais (como número de Reynolds, por exemplo), e as linhas delimitadoras

dos padrões podem ser traçadas indicando a transição.

Baker (1954) foi um dos precursores desta técnica para escoamentos bifásicos horizontais. A Figura 7 mostra o mapa proposto para o escoamento da mistura de óleo-água, que mostra os padrões existentes baseado nas velocidades mássicas das fases, G_g e G_l , e nos fatores adimensionais ψ e λ , que consideram as propriedades da mistura, da água e do ar.

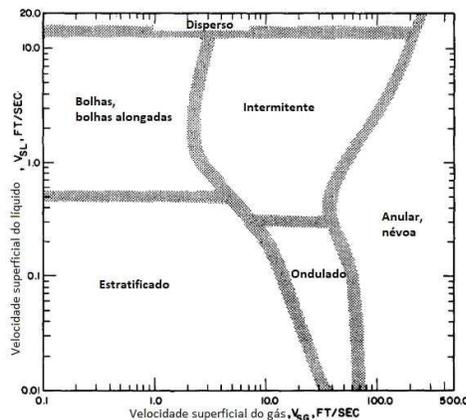
Figura 7: Mapa de Padrões de Escoamento de Baker



Fonte: Baker (1954).

Depois dele, vários outros autores criaram outros mapas, como Mandhane, Gregory e Aziz (1974), que compilaram os dados de escoamento bifásico ar-água em tubos horizontais com diâmetros internos que variavam de 12,7 mm até 165,1 mm. A Figura 8 mostra o mapa proposto em função das velocidades superficiais das fases durante o escoamento. Os padrões encontrados foram bolhas, bolhas alongadas, estratificado, disperso, intermitente, ondulado, anular e névoa.

Figura 8: Mapa de Padrões de Escoamento de Mandhane, Gregory e Aziz

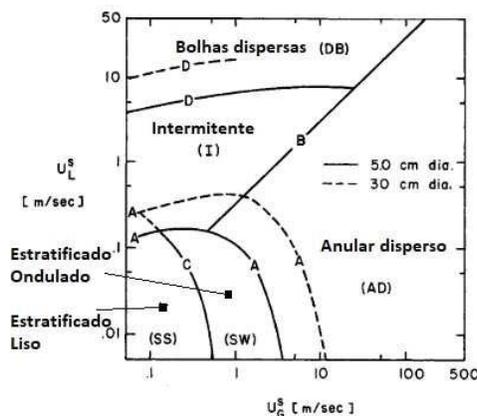


Fonte: Mandhane, Gregory e Aziz (1974).

Já Taitel e Dukler (1976) propuseram um mapa relacionando as velocidades da fase líquida e da fase de vapor, para escoamento ar-água horizontal, mostrado na Figura 9. O mapa mostrado

apresenta comparação entre experimentos com diferentes diâmetros internos (5 cm e 30 cm), sendo possível observar que para o maior diâmetro são necessárias menores velocidades, tanto de líquido quanto de vapor, para o desenvolvimento dos padrões.

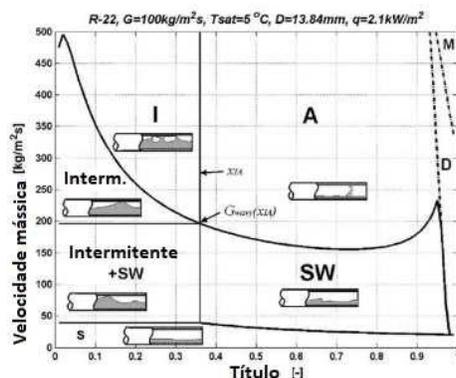
Figura 9: Mapa de Padrões de Escoamento de Taitel e Dukler



Fonte: Taitel e Dukler (1976).

Wojtan, Ursenbacher e Thome (2005) realizaram um estudo de comparação entre os padrões de escoamento bifásico (ebulição) dos refrigerantes R22 (clorodifluorometano) e R410A (difluorometano e pentafluoroetano), para um canal de 13,84 mm de diâmetro interno, relacionando a velocidade mássica dos fluidos, que variou de 70 a 200 kg/m²s para o R22 e de 70 a 300 kg/m²s para o R410A, o título de vapor. A Figura 10 apresenta o mapa para o R22 e os padrões identificados foram estratificado (S), estratificado ondulado (W), intermitente (I), anular (A), secagem (D), névoa (M) e as transições entre eles.

Figura 10: Mapa de Padrões de Escoamento de Wojtan, Ursenbacher e Thome



Fonte: Wojtan, Ursenbacher e Thome (2005).

Da macro para a micro escala os padrões mudam, e alguns observados na macro escala não se observam quando o diâmetro do canal diminui. Isto se deve a que na macro os padrões

sofrem significativa influência das forças da gravidade e inerciais, enquanto que na micro escala as forças de tensão superficial substituem as da gravidade.

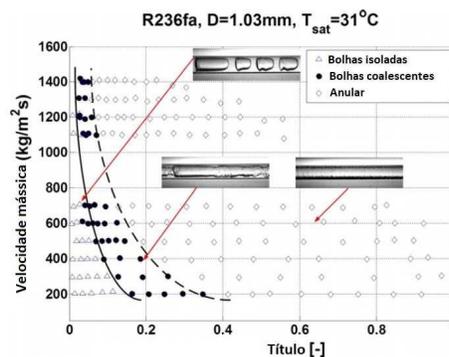
Alguns estudos realizados, tanto por Revellin e Thome (2007), quanto por Ong e Thome (2009), para ebulição em mini e micro canais, mostram que os padrões são de bolhas, pistões, *slug*, *churn* e anular (ondulado ou liso). Agrupados nas denominações de bolhas isoladas (BI), bolhas coalescentes (BC), que caracteriza o escoamento intermitente, e anular.

O estudo experimental realizado por Ong e Thome (2011) com os refrigerantes R134a, R236fa e R245fa durante a ebulição em canais de 1,03, 2,20 e 3,04 mm de diâmetro permitiram propor os modelos para as linhas de transição entre as regiões.

A Figura 11 apresenta o mapa proposto por Ong e Thome (2011) para o refrigerante R236fa (hexafluoropropano) em um canal de 1,03 mm de diâmetro interno relacionando a velocidade mássica, G , e o título de vapor.

Nesse caso, onde o diâmetro era reduzido, o padrão de bolhas isoladas foi encontrado para velocidades mássicas reduzidas ou então para combinações de títulos muito baixos e velocidades mássicas maiores. Já bolhas coalescentes acumularam-se em uma faixa mais central do mapa, para títulos intermediários e em todas as velocidades avaliadas, assim como o padrão anular, que foi observado até em títulos menores, mas para altas velocidades mássicas.

Figura 11: Mapa de Padrões de Escoamento de Ong e Thome



Fonte: Ong e Thome (2011).

2.2 Caracterização do Escoamento Bifásico

Para determinar as características de um escoamento, métodos experimentais podem ser aplicados. No caso de escoamentos bifásicos, fatores que devem ser observados são as proporções de vapor e de líquido, padrões de escoamento, existência ou não de transferência de calor, tipo de fluido e aplicação, etc, sendo que fatores físicos que ainda podem influenciar nas medições são a orientação e o diâmetro do canal, existência de uma seção de visualização no experimento, tipos de sensores disponíveis e métodos de aquisição dos dados.

Importantes parâmetros do escoamento são o título de vapor, a fração de vazio e as velocidades superficiais das fases.

O título de vapor, x , é a razão entre as vazões mássicas da fase gás ou vapor, \dot{m}_g , e a total, \dot{m} , conforme Equação 2.2.

$$x = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}} \quad (2.2)$$

A fração de vazio, α , é dada pela razão entre a área transversal da seção ocupada pelo gás ou vapor e a sua área total, de acordo com a Equação 2.3.

$$\alpha = \frac{A_g}{A} = 1 - \frac{A_l}{A} \quad (2.3)$$

A velocidade superficial da fase é a velocidade que ela desenvolveria se escoasse sozinha no canal, e é calculada pela vazão volumétrica da fase pela área transversal. As Equações 2.4 e 2.5 apresentam as velocidades das fases gás ou vapor e da fase líquida, respectivamente, usando como parâmetros o título (x), a velocidade mássica (G) e a massa específica da fase (ρ_g , para vapor, e ρ_l , para líquido).

$$j_g = \frac{xG}{\rho_g} \quad (2.4)$$

$$j_l = \frac{(1-x)G}{\rho_l} \quad (2.5)$$

A relação entre essas duas velocidades superficiais é dita razão de escorregamento, dada pela Equação 2.6.

$$S = \frac{j_g}{j_l} \quad (2.6)$$

2.2.1 Métodos Experimentais para Determinação dos Padrões e da Fração de Vazio

Nesta seção serão apresentadas técnicas experimentais de medição de escoamentos bifásicos em micro e mini canais, que são utilizadas para a identificação dos padrões gerados devido às variações de vazão mássica, de fluxo de calor, podendo ser com ou sem ebulição do fluido.

Como o uso de mini e micro canais para aplicações industriais vêm crescendo, a necessidade de estudo das características de escoamento nesse tipo de tubo também está aumentando. A

determinação da transferência de calor e da perda de pressão pode ser realizada através de testes para diferentes condições de temperatura, pressão, fluxo de calor e de massa, além do fluido.

Para a identificação dos padrões de escoamento, uma das técnicas utilizadas é a visualização e análise de imagens obtidas com câmeras de alta velocidade. Entretanto, como a observação provém da percepção de quem está avaliando as mesmas, os padrões são subjetivos, já que o que para uma pessoa pode ser considerado o padrão pistonado, para outra pode ser o agitado.

Com esta técnica, sem que as imagens passem por um tratamento via *software* ou rotina de programação, não é possível determinar a fração de vazio. Para identificar os padrões de escoamento em mini e micro canais, técnicas subjetivas de previsão e mapas de padrões podem ser utilizadas, mas além destas, existem as técnicas objetivas, que são baseadas na análise de sinais característicos do escoamento através de técnicas estatísticas de agrupamento de dados.

Os sinais podem estar relacionados à variação de pressão, vazão ou temperatura. Também podem ser utilizados sensores fixados nas paredes do tubo onde está ocorrendo o escoamento. Para esta geometria de tamanho reduzido os sensores não podem ser intrusivos, ou seja, não devem perturbar o processo, nem podem ser invasivos, o que significa que não podem atravessar as paredes do tubo para não alterar o desenvolvimento do escoamento.

Os sensores ópticos utilizam as mudanças na propagação da luz dentro do canal para auxiliar na determinação da fração de vazio, por este motivo, exige que exista uma seção de visualização. Os mesmos baseiam-se no princípio de variação de tensão de um sensor receptor, que ocorre devido às variações luminosas. O arranjo deste tipo de sensor pode variar entre a necessidade dos autores, já que existem várias configurações para a sua montagem e utilização, podem ser utilizados conjuntos de resistores dependentes de luz (LDRs) e diodos emissores de luz (LEDs) de alto brilho, lasers, leds infravermelhos, leds ultravioletas.

Revellin et al. (2006), em um experimento para avaliar a ebulição de R-134a em um canal circular horizontal com diâmetro interno de 0,5 mm, utilizaram uma configuração de sensor óptico composto por um par de lasers com potência de 1 mW, posicionados de maneira a propagar o feixe de luz em duas lentes que direcionam o feixe para o centro do tubo. Do outro lado do tubo foi instalado um fotodiodo, responsável por receber o feixe vindo dos lasers. Esta quantidade de luz recebida varia conforme o padrão de bolhas dentro do canal e os sinais de tensão dos fotodiodos receptores relacionados são registrados, permitindo identificar os regimes de escoamento e as transições entre eles.

Já Schembri e Bucolo (2011) utilizaram um conjunto de sensor eletro-óptico com amplificação, que era composto por um sistema de aquisição de imagens e um circuito com fotodiodos, onde ambos realizavam a medição da intensidade luminosa, que variava com a passagem das bolhas de ar no escoamento ar-água, dentro do tubo em formato de serpentina, com 640 μm de diâmetro interno.

Ao utilizar duas maneiras de medição de fração de vazio para o escoamento ar-água para dois canais de diâmetros distintos, Oliveira et al. (2015) optaram por utilizar três receptores IR

(infravermelho - *infrared*), do modelo ME-9204B da Pasco, que capturam a mudança da intensidade de propagação da luz infravermelha, emitida por um led IR, que atravessa o primeiro tubo de 8,8 mm e, para a outra configuração, o canal de 15,1 mm de diâmetro interno, vindo do emissor, posicionado no outro lado do tubo. Aliado ao uso deste sensor, os autores ainda registraram a passagem das bolhas com uma câmera de alta velocidade. Utilizando um transmissor de infravermelho 333-A e um fotodiodo PD333-3B, Sulthana et al. (2018) avaliaram os padrões de escoamento bifásico ar-água, em um canal quadrado de 2 mm x 0,5 mm.

Com uma combinação de led de alto brilho e LDR, Oliveira (2017) avaliou as variações de tensão que ocorriam devido à interação entre as fases do escoamento em ebulição de isobutano (R600a), propano (R290) e propileno (R1270) para diferentes condições de fluxo de calor e massa. O autor estudou as frequências associadas aos diferentes padrões de escoamento, além da fração de vazio, do título de vapor, dos coeficientes de transferência de calor convectivos e da perda de pressão, para um experimento em um canal horizontal de 1 mm de diâmetro interno.

Diferentemente dos sensores ópticos, os sensores que medem as variações de campo elétrico não exigem uma seção de visualização. Dentro desse tipo, existem os sensores de condutividade, impedância e capacitância, que agem identificando as variações dos parâmetros elétricos. Estes sensores são compostos por resistores, capacitores ou combinações destes que formam uma impedância. No sensor condutivo utilizado por Costigan e Whalley (1997), dois eletrodos de cobre foram colocados no interior do tubo de acrílico e conectado à um conjunto de resistências e um gerador de sinais. Os dados foram analisados a partir da diferença entre o sinal de entrada e o de saída, sendo que estas variações foram decorrentes das variações de temperatura do fluido. Ao invés de eletrodos independentes, anéis resistivos foram utilizados por Klein, Junior e Hervieu (2004), acoplados à circuitos de amplificação para que fosse possível identificar as variações de campo elétrico induzido pelas passagens das bolhas no local onde os sensores foram posicionados.

Ainda utilizando o princípio de identificação de variações de campo elétrico, Maria e Rosa (2016) utilizaram um sensor montado por eles mesmos, na forma de uma bobina de um único condutor. Os valores de tensão da saída do sensor indicavam 0 ou 1, associadas às fases, líquido ou vapor, com as respectivas variações neste intervalo para mistura ou mudança de fase. (MARIA; ROSA, 2016). Sete pares de anéis condutores foram colocados no interior do canal por Han et al. (2017), para formar o sensor de condutância múltiplo utilizado para investigar o desenvolvimento do escoamento da mistura.

Com o mesmo princípio de medição de campo elétrico, Song, No e Chung (1995) implantaram um sensor de impedância (IVM) composto por dois eletrodos posicionados frente a frente, para realizar a medição do volume de líquido do escoamento, sendo que foram utilizados mais quatro eletrodos de blindagem, para garantir que não houvesse efeito da distribuição de fase nas leituras. Uma versão aprimorada do IVM foi elaborada por Nguyen, Euh e Song (2010), que passaram a usar o processamento por multicanais para a aquisição dos dados, assim como a utilização de mais pares de eletrodos no experimento.

Com a passagem das bolhas no canal, a permeabilidade elétrica da seção varia, fazendo com que o sensor capacitivo utilizado e desenvolvido por Jaworek e Krupa (2010) identificasse as mudanças de padrão dentro do canal, já que a capacitância equivalente do conjunto é alterada. Este sensor é composto por dois eletrodos côncavos, posicionados na parte exterior do canal. Esta análise baseia-se na detecção de mudança de fase do sinal, pois este capacitor formado pelos eletrodos é conectado à um amplificador operacional (AmpOp) que chaveia o sinal de saída conforme a mudança da capacitância.

Medidores de pressão também podem ser utilizados para a determinação da fração de vazio. Estes podem ser de pressão absoluta ou diferencial, utilizados para a determinação da queda de pressão do sistema, que ocorre devido ao aumento ou diminuição do título de vapor, x , da velocidade mássica, G , rugosidade do tubo, etc.

Wang e Shoji (2002) fizeram uso de um medidor de pressão diferencial e de um demodulador de sinal de pressão, fazendo com que os valores de pressão que o escoamento horizontal ar-água gerava contra a junção em T, localizada na parte superior do canal, fossem lidos como um sinal de tensão, representando os valores de pressão em diferentes patamares de diferença de potencial elétrico. Outros autores que utilizaram medidores de pressão diferencial foram Situ et al. (2008) e Shaban e Tavoularis (2014).

Já Sun, Chen e Gong (2012), Maria e Rosa (2016), Hanafizadeh et al. (2016), Lu et al. (2018) e Ma et al. (2018) utilizaram um ou mais medidores de pressão absoluta, que mediam as pressões na seção de teste e depois no tratamento dos dados era avaliada a diferença entre as medições dos sensores, para determinar a queda de pressão do sistema, validando assim as imagens obtidas dos padrões de escoamento.

Outros sensores ou técnicas de medição utilizados em canais reduzidos são:

- a) Câmeras de alta velocidade: utilizadas para a captura de imagens, que podem ser utilizadas para determinação dos padrões e da fração de vazio, após serem submetidas à tratamentos gráficos. (RYSAK et al., 2016).
- b) Sensores Doppler ultrasônicos: funcionam a partir da mudança da onda acústica, que é emitida por um sensor e recebida por outro, quando existe um movimento entre estes sensores esse sinal acústico é recebido. (DONG et al., 2015, 2016).
- c) Sensores de força piezoelétricos: utilizados para medir a força periódica gerada pelo momento criado pelo escoamento, quando o mesmo colide contra a superfície onde se encontra o sensor. (SIM; BAE; MUREITHI, 2010).
- d) Sondas de fibra ótica: geram um sinal de corrente contínua quando identifica uma variação no coeficiente de reflexão no escoamento onde este está localizado. (MAHVASH; ROSS, 2008).

2.2.2 Métodos para Análise de Fração de Vazio

Existem muitas possibilidades para o tratamento de dados obtidos experimentalmente, podendo essa análise ser realizada utilizando-se os valores lidos pelos sensores, como tensão, corrente e frequência, ou ainda pelas imagens de câmeras de alta velocidade. Muitas das vezes, essas técnicas são associadas, para que exista um estudo mais aprofundado dos parâmetros medidos. Aqui serão apresentadas técnicas de análise de dados, para caracterização de padrões e outras informações acerca do escoamento, que são utilizadas.

2.2.2.1 Análise por Imagens

O processamento de imagens para a identificação de padrões de escoamento e determinação da ocupação do canal pela fase de vapor, é um dos métodos existentes para análise da fração de vazio, e é amplamente utilizado em conjunto com outras técnicas, muito para validar os resultados obtidos através de tratamento de dados lidos por sensores. Porém, o método exige que exista uma seção de visualização transparente na bancada, o que limita esta metodologia de ser aplicada tão facilmente ou em experimentos que não tenham sido previamente preparados para este tipo de análise.

Esta análise pode ser realizada de duas maneiras:

- Utilização das imagens para determinação visual dos padrões, sem a utilização de *software* para a identificação;
- Processamento via *software* dos *frames* e uso de técnicas de identificação de cores e/ou padrões de imagem, que permitem calcular as frações de vazio associadas a cada padrão e são utilizados como referência para a calibração de sensores (ópticos, capacitivos, resistivos, etc).

Para estudar a ebulição convectiva forçada subresfriada de água, Situ et al. (2008) capturaram imagens em 58 experimentos com variações de temperatura, velocidade de escoamento e fluxo de calor. O aparato experimental consistia em um canal circular vertical, com fluxo ascendente do fluido, e uma câmera de alta velocidade, utilizada para registrar o início da ebulição nucleada na região de aquecimento do canal. A frequência de aparecimento das bolhas foi determinada pela análise das imagens, sendo realizada uma análise adimensional para comparação com outros autores sobre a relação entre as frequências de nucleação e a transferência de calor. Os autores propuseram uma correlação que valida os dados obtidos experimentalmente com análises para baixos valores de superaquecimento de parede. Através dessa correlação, foi observado que as variações de velocidade e aquecimento da parede são significantes para a alteração da frequência de desprendimento das bolhas, mas a mesma não é válida para avaliar ebulição em piscina. Outro fator que os autores ressaltam é a não influência sobre a frequência de bolhas referente às variações dos números adimensionais de Reynolds - Equação 2.7 -

(Re , que relaciona as forças de inércia e viscosas e é utilizado para determinação do regime de escoamento) e de Jakob - Equação 2.8 - (Ja , que relaciona o calor sensível e o calor latente absorvido durante a mudança de fase líquido-vapor):

$$Re = \frac{\rho u_o l_0}{\mu} \quad (2.7)$$

sendo u_o é a velocidade média do escoamento, ρ é a massa específica do fluido, μ é a viscosidade dinâmica do fluido e l_0 é o comprimento característico, que no caso de um tubo circular é o próprio diâmetro.

$$Ja = \frac{c_p(T_w - T_{sat})}{h_{lv}} \quad (2.8)$$

sendo T_w e T_{sat} são as temperaturas de parede e saturação, respectivamente, c_p é o calor específico do fluido a pressão constante e h_{lv} é a entalpia de vaporização.

Para uma mistura de ar e água, com o intuito de estudar a transição do padrão de escoamento de bolhas alongadas para intermitente, Oliveira et al. (2015) utilizaram um método de agrupamento de imagens, através de uma interface de médias agrupadas de valores vetoriais, vindo da vetorização das imagens. O objetivo era a determinação de um critério de caracterização da transição entre os padrões, baseado no formato do salto hidráulico decorrente da transição de um padrão para o outro. Este método proposto não apresenta dados estatísticos, mas mostra uma dependência linear entre a posição do nariz da bolha e o número de Froude - Equação 2.9 - (Fr , que é a relação entre a inércia do escoamento e o campo externo, gravitacional, que determina os efeitos da estratificação), que também influencia na velocidade translacional das bolhas. Com o intuito de aprimorar o disparo da câmera, fazendo com que as imagens fossem adquiridas no momento exato da passagem da fase gasosa, foram realizadas medições instantâneas de velocidade e determinado um *delay* adaptativo do tempo de aquisição dos *frames*. Os padrões encontrados com esta metodologia, através da captura das imagens realizadas no canal de 50,8 mm de diâmetro interno (d_i), foram comparados e validados com outros resultados da literatura.

$$Fr = \frac{u_o}{\sqrt{g_o l_0}} = \frac{G^2}{\rho^2 g D} \quad (2.9)$$

sendo u_o é a velocidade característica do escoamento, g_o é o campo externo característico e l_0 é o comprimento característico, assim como G é a velocidade mássica, ρ é a massa específica e D é o diâmetro do canal.

O escoamento ar-água, em um canal de 30,8 mm de diâmetro interno foi utilizado por Talley, Worosz e Kim (2015), para criar uma base de dados com informações para avaliar a equação de transporte da área interfacial para escoamentos horizontais. Também foram realizadas aquisições de imagens para criar um estudo baseado na visualização dos padrões, para determinar o momento de transição entre o padrão de bolhas e o padrão intermitente. Esse estudo foi comparado com o estudo de Taitel e Dukler (1976), mostrando que os dados experimentais são validados pela metodologia proposta. Com o processamento das imagens, foram obtidas as distribuições das fases do fluido ao longo do canal, que possibilitou a visualização do efeito do escoamento na parede do tubo, assim como uma tendência das bolhas acelerarem no meio do canal, com uma frequência de bolhas maior na parte superior.

Em um canal de 5 mm, para escoamento ar-água, Rysak et al. (2016) utilizaram uma câmera de alta velocidade para registrar os padrões de escoamento do fluido, sendo que o canal foi posicionado de três maneiras distintas, orientação vertical, horizontal e inclinada 45°. Estas imagens em alta resolução foram utilizadas para criar séries de espaço-tempo com correlações Eulerianas, sendo assim possível analisar as mesmas através do expoente de Hurst, criando uma correlação experimental e numérica relevante, que permite a determinação da vazão de líquido e as variações do volume de gás. Os resultados destas séries foram transformados em mapas 2D coloridos, e com a utilização da transformada de *wavelets*, todos os dados foram agrupados em uma mesma curva. Estes dados foram comparados com mapas de padrões e possibilitaram a apresentação de uma estrutura complexa de informações sobre a dinâmica do escoamento de maneira simples em apenas um gráfico.

2.2.2.2 Transformada de Fourier e de Ondaletas; Densidade de Potência Espectral (PSD)

A Transformada de Fourier (FT, *Fourier Transform*) é uma técnica matemática, desenvolvida por Jean-Baptiste Joseph Fourier, e é utilizada para mostrar uma determinada função em termos de ondas senoidais e cossenoidais, ou seja, transforma para domínio de frequências a função temporal dada. Uma das maneiras de calcular a FT é através da Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*), que é realizada com softwares matemáticos e possui uma janela de dados, que precisa ser uma quantidade de um valor de potência 2 (N^2). A FT pode ser expressa pela Equação 2.10: (LATHI, 2007).

$$F(\omega) \equiv \mathcal{F}\{f(t)\} \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.10)$$

sendo $e^{-i\omega}$ dado pela Equação 2.11, sendo ω a velocidade angular, e equivalente a $2\pi f$, e f é a frequência do sinal em Hertz (Hz).

$$e^{-i\omega} \equiv \cos(\omega) - i \sin(\omega) \quad (2.11)$$

O sinal base é decomposto em senoides e cossenoides de diferentes frequências, que somadas, resultam novamente no sinal original. Cada uma dessas ondas possui uma amplitude, que determina a sua influência na composição da função inicial, fazendo com que existam espectros de potência para cada uma das frequências da decomposição. Um gráfico no domínio das frequências pode ser construído, relacionando discretamente cada valor de f com um pico de amplitude de sinal, ou seja, de potência relativa desta frequência no somatório total do sinal. (LATHI, 2007).

Diferente da FT que utiliza integrais (exigindo uma função contínua) para definir um determinado valor no domínio das frequências, a Transformada Rápida de Fourier utiliza somatórios (o que possibilita realizar a transformada para sinais discretos), tornando o processo mais simples e permitindo que os sinais sejam computacionalmente viáveis de serem tratados. E as chamadas janelas da transformada, são processos utilizados em conjunto com a FT ou com a FFT, para evitar o espalhamento das frequências ao serem convertidas do tempo para frequência, pois fazem um tipo de ponderação do sinal.

Para um canal de 60 mm de diâmetro interno, Klein, Junior e Hervieu (2004) utilizaram a Transformada de Fourier de Janela, também conhecida por Transformada de Gabor, para tratar os dados obtidos por um sensor condutivo em um escoamento ar-água horizontal. Foram observados altos níveis de modulação de frequência, o que indica que o escoamento estava variando entre padrões intermitentes, já que o efeito da mudança contínua entre pequenos e grandes conjuntos de escoamento pistonado (*plug*) pode ser explicado por um aumento do nível não-estacionário da covariância dos sinais de tempo-frequência medidos.

O estudo de Revellin et al. (2006) avalia a frequência de geração das bolhas, a taxa de coalescência das bolhas, o comprimento das mesmas, assim como a velocidade média na ebulição do refrigerante R-134a, num canal de diâmetro reduzido de 0,5 mm com um sensor óptico (laser) e uma câmera de alta velocidade. A Transformada de Fourier foi empregada para tratar os dados do sensor, caracterizando as frequências e PSD dos padrões observados durante os testes na bancada experimental, que foram os de bolhas, intermitente, semi-anular e anular, assim como suas transições. Além disso, foi observado que a transição entre os padrões possui uma dependência direta com a coalescência das bolhas, que também é diretamente proporcional ao aumento da velocidade mássica do escoamento.

A Transformada de Ondaleta (*Wavelets*), desenvolvida nos anos 80 por Morlet, mostra-se um dos métodos mais aplicáveis na análise de padrões em transição. Isto se deve à sua rápida resposta, já que trabalha no domínio do tempo, não exigindo assim, grandes amostras de dados para ser realizada. Diferentemente da Transformada de Fourier, pelo método de *Wavelets* é possível avaliar funções locais em conjunto, considerando separadamente suas amplitudes e que os eventos de cada função podem ocorrer em tempos diferentes para cada uma das frequências.

(NGUYEN; EUH; SONG, 2010).

Por este motivo, este procedimento pode ser aplicado como uma função online de análise de padrões de escoamento, pois representa um sinal decomposto em sinais mais refinados, ou seja, com aperfeiçoamento da resolução dos mesmos. Com uma função chamada ondaleta-mãe $\psi(t)$, o sinal é modulado com transformações chamadas dilatações $\psi(t) \rightarrow \psi(2t)$ e translações $\psi(t) \rightarrow \psi(t+1)$, que são capazes de avaliar a concentração local de energia do sinal. (BOLZAN, 2009).

Em experimentos realizados por Elperin e Klochko (2002), foram observadas certas relações existentes entre as flutuações concentradas de energia nas escalas de tempo e os padrões de escoamento associados. Foi possível verificar que o padrão de bolhas dispersas apresenta estas flutuações nas menores escalas de tempo. Já o fluxo anular apresenta diminuições nas escalas de ondaletas. O padrão intermitente (*slug*) é diretamente relacionado com os espectros de baixa intensidade, quando o escoamento for mais borbulhante ou anular, e com os de média intensidade quando tiver características mais intermitentes. Além deste, o padrão ondulado é correlacionado com distribuições de flutuações de pressão diferencial em um conjunto de pequenas escalas de valores.

Com a análise das flutuações da fração de vazio, através da avaliação dos coeficientes locais de energia a partir das Transformadas Contínuas de Ondaletas, Nguyen, Euh e Song (2010) determinaram padrões de escoamento periódicos e intermitentes. Esta avaliação foi realizada para ar-água, em um canal de 80 mm de diâmetro interno, posicionado verticalmente, sendo que os sinais foram lidos com o auxílio de um sensor de impedância multicanal.

Semelhante à Transformada de Fourier, outro método que avalia a concentração dos espectros de potência nas diferentes frequências é o de Densidade de Potência Espectral (PSD), que é uma metodologia não probabilística, ou seja, avalia dados de funções reais e agrupa estes resultados em grupos de frequências. Esta técnica caracteriza o sinal por sua periodicidade e concentração de dados, o que resulta na informação de para quais frequências existe maior potência do sinal avaliado.

Sun, Chen e Gong (2012) utilizaram duas metodologias para avaliar os sinais de flutuações de pressão, decorrente dos padrões de escoamento existentes no escoamento horizontal ar-água, em um tubo de 50 mm de diâmetro interno. Com o uso da Transformada de Ondaleta, foi possível verificar que a frequência característica para o padrão de bolhas dispersas é de 40 Hz. Já com o uso da Densidade de Potência Espectral, os autores construíram um mapa com os padrões encontrados, correlacionando a fração de vazio volumétrica com o percentual de fluxo de massa, sendo que as fronteiras entre um padrão e outro, neste caso, são subjetivas, já que existem outros aspectos do escoamentos que precisariam ser levados em consideração para uma análise mais refinada.

O experimento de Wang e Shoji (2002) era composto de um canal vertical ($d_i = 15mm$) conectado na parte superior à uma junção T com dois braços horizontais, onde foi utilizada uma mistura de ar e água como fluido de trabalho e medidores de pressão. O método PSD

foi utilizado para a realização de uma análise estatística dos dados, permitindo a observação da influência dos percentuais de gás e líquido do escoamento nas frequências características de variação de pressão. Foi observado que com o aumento da velocidade, tanto do gás, quanto do líquido, ocorria também um aumento das flutuações de pressão e fluxo de massa. Também foi verificado que os sinais lidos na junção T mostram-se similares aos de um escoamento com um alto grau de caos, não podendo ser considerado um processo estocástico.

Um estudo que utilizou a Teoria do Caos em conjunto com a metodologia do PSD para a determinação de padrões de escoamentos, foi elaborado por Ma et al. (2018), que avaliou em um canal em C de 16 mm de diâmetro interno, tanto o fluxo ascendente quanto o descendente de ar-água, ou seja, com a entrada da mistura na parte inferior (ascendente) do tubo ou na superior (descendente). Foi utilizado um sensor de pressão para medir a variação de pressão e também uma câmera de alta-velocidade para a aquisição de imagens dos padrões. Cinco padrões de escoamento foram observados no experimento, mas para baixos valores de velocidade superficial, o padrão estratificado pistonado foi observado no escoamento descendente e para o ascendente, o padrão ficou intermitente. A força da gravidade mostrou possuir uma grande influência no resultado final do estudo, principalmente para velocidades menores.

2.2.2.3 Função de Densidade de Probabilidade (PDF)

O método de Função de Densidade de Probabilidade (PDF) é uma ferramenta estatística, que é utilizado para avaliar quais as chances que uma determinada variável aleatória possui de assumir certo valor em um espectro de valores a ser avaliado. Para isto, o método calcula a integral da função para uma determinada sequência de valores, avaliando assim onde será encontrada a maior concentração de valores do sinal, indicando que naquela localidade é onde existe a maior probabilidade dos valores se acumularem. Por este motivo, este método é muito utilizado para a predição e determinação de padrões de escoamento.

A transição entre padrão de bolhas dispersas para golfadas num escoamento ar-água vertical foi estudado por Song, No e Chung (1995), que utilizaram um sensor de impedância para a aquisição dos dados de fração de vazio. Com estas medições foram obtidas informações do escoamento, como flutuações das frequências de sinal, que possibilitaram a determinação da PDF através da Transformada Rápida de Fourier (FFT). O resultado foi a identificação das frequências predominantes dos escoamentos com bolhas dispersas e em golfadas, além da relação entre o tamanho das bolhas e a velocidade superficial das fases com as variações da fração de vazio.

Assim como em Song, No e Chung (1995), a influência da fração de vazio na velocidade superficial das fases do escoamento bifásico também foi observada por Costigan e Whalley (1997). A avaliação da variação dinâmica da fração de vazio e identificação dos padrões de escoamento foi realizada em um canal vertical de 32 mm de diâmetro interno com o auxílio de um sensor de condutividade. Com o uso da PDF, os picos dos sinais foram identificados e foi possível relacionar os padrões de escoamento encontrados, que variaram de bolhas até

anular, com as frequências características de concentração de sinais para cada um dos tipos de escoamento.

Com a intenção de medir a fração de vazio e a distribuição das fases ao longo do tubo, Paranjape, Ritchey e Garimella (2012) desenvolveram um sensor de impedância. O escoamento ar-água em um microcanal de $d_i = 780 \mu\text{m}$ horizontal, foi avaliado com o auxílio do sensor desenvolvido em conjunto com uma câmera de alta velocidade, para aquisição das imagens dos diferentes padrões (bolhas, pistonado, golfadas, agitante e longas golfadas). O sensor é calibrado em relação às frações de vazio calculadas a partir do processamento das imagens e usando a análise PDF, onde o sinal de fração de vazio é empregado para a identificação dos padrões de escoamento em microcanal. Este estudo mostrou que o sensor desempenhou de maneira adequada, auxiliando na identificação de padrões de escoamento em microcanais, assim como os dados permitiram definir um critério para determinação dos regimes de transição.

Para determinar os padrões de escoamento, Han et al. (2017) utilizaram um sensor condutivo no escoamento óleo-água de baixa velocidade. Em suas respectivas faixas de densidade, os padrões de bolhas, golfadas e transição entre padrões geraram muitos dados para serem tratados com o uso da PDF. O experimento foi realizado em um tubo vertical de 20 mm de diâmetro interno, onde foi observado que o padrão de golfadas de óleo ocorria com mais frequência para baixas velocidades de escoamento, mas com o aumento da velocidade e a ocorrência de restrição da entrada de água, este padrão começava a migrar para bolhas de óleo dispersas em água. Já quando a restrição de água aumentava, foi possível observar o padrão de transição, onde as golfadas de óleo coalesciam facilmente e formavam bolhas alongadas de óleo no centro do tubo. Ainda foi possível identificar uma diferença maior entre as bolhas e as bolhas dispersas, já que apesar de serem ambos padrões de bolhas, no primeiro as bolhas de óleo possuíam tamanhos diversos e, no segundo caso, estas eram de tamanhos muito reduzidos, de aproximadamente 1 mm de diâmetro, tornando este padrão o mais uniforme dos observados.

2.2.2.4 Comparação com Mapas de Padrões de Escoamento

Outro tipo de análise que pode ser realizada para identificação de padrões de escoamento é através da comparação com mapas de padrão elaborados por outros autores. Baseados em seus próprios experimentos, alguns autores propõem mapas que identificam as fronteiras entre os padrões, podendo estas delimitações serem baseadas em diferentes propriedades observadas e/ou medidas. Mishima e Ishii (1984), por exemplo, utilizaram as velocidades de líquido e de vapor para serem as coordenadas dos eixos em seu mapa, enquanto Barnea, Luninski e Taitel (1983) usaram os valores encontrados de Número de Reynolds (Re) para cada uma das fases do escoamento.

Com uma proposta de aprimoramento do método de Lockhart e Martinelli (1949), para uma melhor representação dos dados experimentais, Barreto, Oliveira e Passos (2015) estudaram as mudanças na pressão e as variações de fração de vazio em um canal vertical, de $d_i = 1,2 \text{ mm}$,

durante o escoamento ar-água. As medições de perda de pressão foram realizadas com sensor de pressão, já as leituras de fração de vazio foram realizadas com um sensor de impedância. Os autores notaram que as correlações desenvolvidas para fluidos refrigerantes, no que diz respeito à perda de pressão, não se aplicam para escoamentos onde o fluido de trabalho é uma mistura ar-água. Além disso, os padrões em transição, exceto agitante para anular, mostraram grande consonância com o mapa proposto por Mishima e Ishii (1984), assim como os demais padrões puderam ser comparados em igualdade com o mapa de Barnea, Luninski e Taitel (1983).

Kanizawa e Ribatski (2017) utilizaram uma técnica de fechamento rápido de válvulas para a formação de bolhas de ar, no escoamento de mistura ar-água em um canal vertical de 19 mm de diâmetro interno. A intenção era avaliar a fração de vazio e a queda de pressão do escoamento, para isso, os autores utilizaram um sensor capacitivo para a aquisição dos dados que foram utilizados para a elaboração do mapa de padrões. Os valores obtidos ficaram de acordo com o método preditivo criado por Zukauskas e Ulinskas (1983) de perda de carga para um escoamento monofásico, já que a diferença de pressão total diminui quando a velocidade da fase líquida é menor e a fase gasosa é mais elevada.

Para três diâmetros internos diferentes de canal (38,1 mm; 50,8 mm e 101,6 mm), Lu et al. (2018) avaliaram a queda de pressão por atrito e a fração de vazio num escoamento ar-água, com o intuito de avaliar o impacto da orientação do canal, já que o experimento foi realizado com o tubo na vertical e depois na horizontal. Além disso, também foi avaliada a influência do regime de escoamento e as diferenças de diâmetro. A partir dos dados obtidos com o auxílio de sensores de pressão e condutividade, os autores propuseram mudanças no método de Lockhart e Martinelli (1949) para fração de vazio, assim como em outros métodos que subestimam os valores obtidos experimentalmente. Ainda foi possível observar que o gradiente de pressão aumenta com o aumento da velocidade da fase gasosa, para uma velocidade de líquido constante.

2.2.2.5 Modelo de Fluxo de Deriva

Outra técnica para avaliar padrões de escoamento é o modelo de fluxo de deriva, utilizado para modelar a velocidade de fluidos bifásicos. Este método é aplicável quando é possível obter a velocidade de cada fase separadamente, como é o caso de escoamento mais disperso, como bolhas. O modelo foca na análise da interação entre as duas fases do escoamento.

Um experimento com vasta gama de fluidos foi conduzido por Bhagwat e Ghajar (2014), que avaliaram combinações de ar-água, argônio-água, gás natural-água, ar-querosene, ar-glicerina, argônio-acetona, argônio-etanol, argônio-álcool, vapor-água, ar-óleo e diversos fluidos refrigerantes, como R11, R12, R22, R134a, R114, R410A, R290 e R1234yf (tricloromonofluormetano, diclorodifluorometano, tetrafluoretano, tetrafluorodichloroetano, difluorometano e pentafluoroetano, propano, tetrafluoropropano, respectivamente). Estas análises foram executadas em canais que variavam de diâmetro de 0,5 mm até 305 mm, e também com mudanças de ori-

entação (horizontal, vertical e inclinação de 45°). O intuito do estudo era avaliar os parâmetros lidos pelo sensor e propor um modelo de distribuição destes parâmetros. A correlação elaborada pelos autores mostra a distribuição dos parâmetros de transferência de calor e a velocidade de deriva como uma função do diâmetro do tubo, da orientação do mesmo, das taxas das fases do escoamento, das propriedades do fluido e da fração de vazio, sendo que esta correlação não gera a necessidade de referenciar os dados com um mapa de regime de escoamento.

Este método também foi utilizado por Dong et al. (2015) e Dong et al. (2016), juntamente com uma correlação teórica que combina o perfil de velocidade com um modelo de fluxo de deriva. Isto foi utilizado para formular uma relação entre a velocidade em um volume de controle e o perfil global de velocidade, levando-se em conta o deslizamento entre as fases do escoamento. O fluido utilizado no experimento foi uma mistura água-óleo e o sensor aplicado para a medição dos dados da velocidade foi um ultrassom Doppler de ondas contínuas de 1 MHz, acoplado ao canal horizontal de 50 mm de diâmetro interno. Os autores observaram que existia uma separação clara entre as fases e que o escoamento poderia tanto ser caracterizado como escoamento disperso, quanto separado. Além disso, os resultados mostraram a influência do padrão de escoamento na variação média de frequências, devido às interações entre as fases.

Para a avaliar a fração de vazio e as diferenças de pressão de um escoamento intermitente ar-água, Maria e Rosa (2016) utilizaram o modelo de fluxo de deriva. Sensores de condutividade e pressão foram acoplados a um canal de 26 mm de diâmetro interno para a aquisição dos dados do escoamento. Após a análise destes dados, os autores identificaram que a velocidade da fase líquida era maior que da fase gasosa, além de que, conforme as ondas de fração de vazio avançavam, o perfil de pressão mudava, voltando a se estabilizar somente após as bolhas terminarem de escoar pela seção de testes.

2.2.2.6 Outros Métodos de Análise de Fração de Vazio

a) Modelo Contínuo Oculto de Markov (CHMM)

O CHMM (*Continuous Hidden Markov Model*) é uma técnica estatística utilizada para determinação de parâmetros não observáveis a partir de parâmetros tangíveis, técnica esta utilizada por Mahvash e Ross (2008). O experimento foi realizado em um canal vertical de diâmetro interno de 19 mm para um escoamento ar-água, sendo que o sensor utilizado foi uma ponta de prova de fibra óptica para a aquisição dos dados e também uma câmera de alta velocidade para a obtenção das imagens do escoamento. O modelo foi validado e os autores concluíram, ao comparar o modelo obtido com as imagens dos padrões, que esta técnica tem grande potencial para auxiliar na determinação de padrões em escoamentos bifásicos.

b) Mudança de fase do sinal

Com uma adaptação do uso de um sensor capacitivo, que ao invés de ser utilizado para medir a capacitância do canal foi usado para identificar as passagens por zero do sinal

lido, Jaworek e Krupa (2010) avaliaram o escoamento ar-água e ar-isopropanol em canais verticais de 1 mm, 2 mm, 4 mm e 9,5 mm de diâmetro interno, afim de determinar a fração de vazio. Com os dados obtidos, foi possível validar que as informações de mudança de fase do sinal são proporcionais à fração de vazio do escoamento, mostrando que esta técnica pode ser aplicada para este fim.

c) Maior expoente de Lyapunov

Através da técnica de medição da velocidade com a qual dois pontos se afastam ou se aproximam no espaço, chamada de Expoente de Lyapunov (λ), Schembri e Bucolo (2011) avaliaram o valor resultante para determinar se o sistema é estável (λ negativo), conservativo ($\lambda = 0$) ou divergente (λ positivo). Os autores também avaliaram os dados lidos no canal vertical serpenteado de 0,64 mm de diâmetro interno através de um sensor óptico pelo método da Transformada Rápida de Fourier. Após as medições, o escoamento ar-água foi avaliado e foi constatado que o fluxo é periódico e mantém um estado estável de bolhas, mas apresenta não-linearidades. Os autores também observaram que a amplitude do sinal lido está diretamente relacionada à frequência de ressonância e, que esta, está ligada às frequências do fluxo de entrada, uma vez que a própria frequência de ressonância depende diretamente da amplitude e frequência do escoamento forçado.

d) Redes neurais

Imagens do escoamento foram utilizadas por Hanafizadeh et al. (2016) para validar os resultados obtidos pelos sensores de pressão em um escoamento vertical ar-água e analisados por meio de redes neurais, a fim de identificar os padrões utilizando as flutuações e dados médios de pressão. Os autores observaram que, para um canal com diâmetro interno de 50 mm, os dados eram consistentes com as imagens. Além disso, foi observado que a mistura das fases e o momento do deslocamento das fases influenciam o comportamento turbulento do escoamento, o que resulta em padrões anulares e agitados para valores elevados de momento.

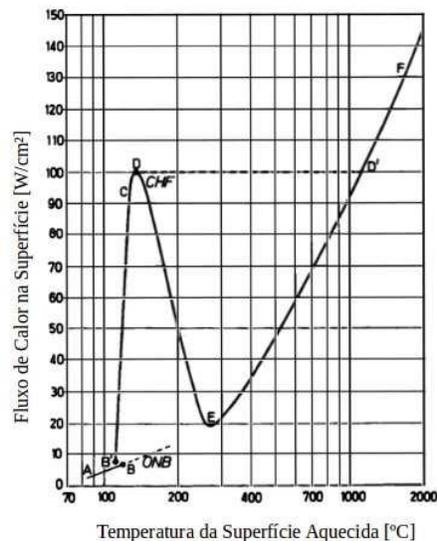
e) Vibração induzida pelo escoamento

Sim, Bae e Mureithi (2010) usaram um sensor de força piezoelétrico para medir a vibração que o escoamento ar-água em um canal vertical de $d_i = 30$ mm causou em uma junção T ($d_i = 20,8$ mm), conectada na parte superior do experimento. Foi observado que comportamentos periódicos de força tornam-se dominantes e alteram a forma de onda para um padrão quadrático quando a fração de vazio aumenta.

2.3 Ebulição

A curva de ebulição, conforme apresentada na Figura 12, representa a relação entre o fluxo de calor e o superaquecimento do fluido e as várias fases da ebulição do fluido em contato com uma superfície aquecida.

Figura 12: Curva de Ebulição



Fonte: Adaptado de Collier e Thome (1994).

A primeira fase (A-B) é por convecção natural ou livre, e se dá quando a temperatura da superfície sólida (T_s) atinge e ultrapassa levemente a temperatura de saturação (T_{sat}) do fluido. À medida que se aumenta o fluxo de calor, a diferença entre a T_s e a T_{sat} (ou $\Delta T_{superaq}$) aumenta e pode-se alcançar o superaquecimento necessário para iniciar o crescimento de bolhas de vapor sobre a superfície aquecida. Pequenas bolhas de vapor surgirão, o que representa o início da ebulição nucleada (*Onset nucleate boiling* - ONB). Essa etapa inicia-se com bolhas dispersas no líquido, e com o aumento de $\Delta T_{superaq}$, as mesmas aumentam de tamanho e quantidade, gerando coalescência entre elas, formando colunas e bolsões de vapor (B-C-D). O fluxo de calor atinge seu ápice no ponto D, chamado de fluxo de calor crítico (*Critical Heat Flux* - CHF), onde bolsas de vapor formam-se e impedem ou dificultam o resfriamento da superfície aquecida. Isso causa a secagem da superfície e a degradação da transferência de calor, causando uma drástica queda do fluxo de calor (D-E), sendo esta chamada de ebulição em transição.

Após o valor de $\Delta T_{superaq}$ do ponto E, chamado de ponto de Liedenfrost, as bolsas de vapor dão lugar à uma película de vapor estável, que cobre toda a superfície aquecida, fazendo com que, tanto o $\Delta T_{superaq}$, quanto o fluxo de calor aumentem significativamente, sendo essa a faixa da ebulição conhecida por ebulição em película (E-D'-F).

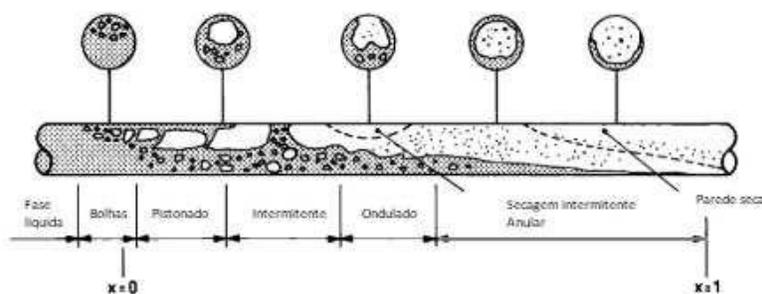
À medida que a temperatura da superfície aumenta, a transferência de calor da superfície sólida para o líquido acontece por condução e por radiação, através da película de vapor que se torna significativa e o q'' volta a aumentar com o grau de superaquecimento.

Ainda existem casos onde o $\Delta T_{superaq}$ cresce tão rapidamente, que faz com que do CHF, a ebulição passe diretamente para a situação de película (D-D'), sendo esse fenômeno chamado de histerese de aquecimento da curva de ebulição. O contrário também pode existir, que é o processo de histerese de resfriamento, quando há uma diminuição abrupta de temperatura a

partir do ponto de fluxo de calor mínimo (ponto E).

Para estudar o efeito da mudança de fase no escoamento, visando entender o impacto na transferência de calor, é necessário conceituar ebulição convectiva, que é a mudança de líquido para vapor de um fluido sendo forçado a escoar através de um tubo. A Figura 13 mostra a evolução dos padrões de escoamento ao longo do tubo, considerando que existe calor sendo aplicado nas paredes do canal, o que resultaria na ebulição do fluido que está em movimento. A mesma também apresenta a evolução dos padrões com o título de vapor (x), sendo que $x = 0$ representa um escoamento somente com a fase líquida e $x = 1$ um escoamento somente com a fase de vapor. Na Figura 13 são mostrados os padrões de bolhas, bolhas alongadas ou pistonado, intermitente, ondulado e anular, mas além disso, é representado o momento onde ocorre secagem intermitente da parede, antes da fase 100% vapor.

Figura 13: Padrões de Escoamento na Ebulição



Fonte: Adaptado de Collier e Thome (1994).

2.4 Fluidos Refrigerantes

A preocupação com as emissões de gases poluentes e degradação do meio ambiente vem sendo discutida há quase três décadas, desde a Convenção do Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática sediada no Rio de Janeiro em 1992, ganhando mais visibilidade em 1997 na criação do protocolo de Kyoto e com a resolução de pendências em Marrakesh, na VII Conferência das partes, no ano de 2001. (VIOLA, 2002). Devido aos acordos que foram assinados entre as nações, gerou-se a necessidade de avaliar substitutos para os fluidos refrigerantes sintéticos até então utilizados em sistemas de refrigeração industrial, em condicionadores de ar, na agricultura, e outras aplicações, como os fabricados à base de clorofluorcarbono (CFC), clorodifluorometano (HCFC), hidrofluorcarbono (HFC) e de brometo de metila, que possuíam grandes potenciais de aquecimento global (*Global Warming potential* - GWP) e destruição da camada de ozônio (*Ozone Depletion potential* - ODP). (PEREIRA, 2010).

Nesta busca por uma solução que atendesse às necessidades técnicas das aplicações dos fluidos refrigerantes halogenados, mantendo a premissa pela busca por substitutos que seguissem as exigências de não agredir a Camada de Ozônio, não colaborar com o Efeito Estufa e

que possuíssem baixos impactos no aquecimento global, os fluidos refrigerantes chamados de "naturais" ganharam destaque. Dentre estes, pode-se destacar o ar, a água, a amônia, o dióxido de carbono (CO_2) e os hidrocarbonetos (HC). (PEIXOTO, 2011).

2.4.1 Hidrocarbonetos

Dentre os refrigerantes "naturais", os hidrocarbonetos têm sido destaque como escolha para as aplicações em substituição dos fluidos como os HFCs, que foram escolhidos por possuírem ODPs menores que os CFCs e os HCFCs, mas que ainda assim, possuem altos índices de GWP. (PEREIRA, 2010).

Para a escolha de um fluido refrigerante, alguns critérios de segurança como toxicidade e inflamabilidade devem ser levados em conta, além do desempenho em sua aplicação, que também deve ser avaliado. Por fim, são estudadas as propriedades, a tecnologia e a eficiência energética dos refrigerantes, e custos, para daí sim, realizar a escolha do que melhor se adequa à aplicação desejada. (PIMENTA, 2011).

A toxicidade é a medida utilizada para definir o potencial tóxico das substância, ou seja, qual é o grau de nocividade de determinada substância para os seres vivos. Todas as substâncias químicas possuem um certo grau de potencial tóxico, escala de A a C, sendo A referente a um nível leve e C representando um efeito mais severo, classificada também como aguda, subcrônica ou crônica. (HEATING REFRIGERATING AIR CONDITIONING ENGINEERS, 2008).

Já a inflamabilidade, que possui seu valor dado em percentual, indica o quanto certo material possui de risco de entrar em combustão quando em contato com oxigênio e uma fonte de calor. Os fluidos são divididos em classes de inflamabilidade, sendo a classe 3, por exemplo, referente a materiais altamente inflamáveis. Também é importante ressaltar que líquidos inflamáveis precisam atingir uma certa temperatura para que o ponto de fulgor seja alcançado, ponto este que representa o momento em que a substância entra em combustão. (HEATING REFRIGERATING AIR CONDITIONING ENGINEERS, 2008).

Outros fatores que caracterizam os hidrocarbonetos são o potencial de aquecimento global e o de degradação da camada de ozônio, que quanto mais próximos de zero, menos impactos estes geram. Um ODP baixo significa que existe pouco ou nenhum impacto à camada de ozônio, assim como um GWP tendendo à zero mostra influências desprezíveis com relação ao aquecimento global. (HEATING REFRIGERATING AIR CONDITIONING ENGINEERS, 2008).

Dentre os tantos hidrocarbonetos existentes, este trabalho vai apresentar as informações referentes a três deles, o isobutano (R600a), o propano (R290) e o propileno (R1270). A Tabela 3 mostra as informações destes fluidos sobre os impactos ao meio ambiente e à segurança. (HEATING REFRIGERATING AIR CONDITIONING ENGINEERS, 2008).

Tabela 3: Classificação dos Hidrocarbonetos

	R600a	R290	R1270
Toxicidade	A	A	A
Flamabilidade	1,80%	2,30%	2,00%
Degradação da Camada de Ozônio	0	0	0
Potencial de Aquecimento Global	< 3	< 3	≈ 3

Fonte: Adaptado de Heating Refrigerating Air Conditioning Engineers (2008).

Algumas propriedades dos hidrocarbonetos tornam-os mais suscetíveis a serem escolhidos para certas aplicações, já que possuem menores pressões de operação, demandam menores cargas de fluido refrigerante, possuem baixas viscosidades, além de apresentarem altas condutividades térmicas. (PIMENTA, 2011).

Ainda segundo Pimenta (2011), vários estudos mostram que os coeficientes de performance, COP, dos HC são superiores ao dos CFC, HCFC e HFC. Mesmo possuindo várias vantagens sobre os fluidos sintéticos, por serem altamente inflamáveis, as instalações para aplicação de hidrocarbonetos precisam ser à prova de fogo e explosão, o que aumenta significativamente os custos para os investimentos iniciais. Os custos com os refrigerantes em si são menores, até porque exigem cargas menores, mas além dos custos dos equipamentos, ainda é necessário investir em outros itens de segurança e manutenções. Outro quesito importante acerca dos HC é que a tecnologia já está bastante desenvolvida, mas ainda existem possibilidades para avanços, que poderão possibilitar ainda otimização no uso das cargas e melhoria nas trocas térmicas, aumentando o desempenho dos sistemas.

A Tabela 4 apresenta algumas propriedades térmicas do hidrocarboneto utilizado neste trabalho (R600a) e de outros hidrocarbonetos, também aplicados como fluidos refrigerantes.

O calor específico do R600a é maior que dos demais, permitindo maiores coeficientes de transferência de calor com menores temperaturas no escoamento do fluido. Assim como a maior tensão superficial do R600a em relação ao R290 e R1270 indica um maior confinamento do R600a, o que leva a uma transição entre padrões de bolhas e anular a títulos de vapor menores.

Outras propriedades importantes são o calor latente de vaporização maior dos hidrocarbonetos que permite o uso de trocadores de calor mais compactos, além do maior volume específico, principalmente do R600a, que permite reduzir a carga de refrigerante no sistema, o que é vantajoso em relação à flamabilidade destes fluidos.

Tabela 4: Características e Propriedades: R600a, R290, R1270

	R600a	R290	R1270
GWP (100 anos)	3	3,3	2
ODP	0	0	0
Peso molecular [kg/mol]	58,12	44,1	42,08
Temperatura e pressão críticas [°C/MPa]	134,7/3,63	96,68/4,25	92,42/4,665
Pressão de saturação (20°C) [kPa]	302,2	836,46	1019
Pressão reduzida	0,083	0,197	0,2185
Massa específica do vapor/líquido [kg/m ³]	7,91/556,86	18,1/500	21,42/513
Volume específico vapor/líquido [m ³ /kg]	0,13/1,8x10 ⁻³	0,06/2x10 ⁻³	0,047/1,95x10 ⁻³
Condutividade térmica do líquido [W/mK]	0,0911	0,09606	0,1151
Calor específico líquido/vapor [kJ/kgK]	2,4/1,76	2,7/1,95	2,6/1,87
Viscosidade do líquido [μ Pa-s]	145,8	102,3	90,8
Calor latente de vaporização [kJ/kg]	334,33	344,31	344,3
Tensão superficial [mN/m]	10,7	7,63	7,722

Fonte: Elaborado pela autora.
 Informações consultadas em EES (2016) para T = 20 °C.

Como o R600a é o substituto mais utilizado do HCFC R134a, mas além de possuir um GWP muito inferior ao R134a, o R600a possui uma densidade menor e calores específico e latente superiores, promovendo uma troca térmica maior com menores cargas de fluido refrigerante. A Tabela 5 mostra a comparação de algumas propriedades desses dois fluidos.

Tabela 5: Características e Propriedades: R600a, R134a

	R600a	R134a
GWP (100 anos)	3	1300
ODP	0	0
Peso molecular [kg/mol]	58,12	102
Temperatura e pressão críticas [°C/MPa]	134,7/3,63	101/4,059
Pressão de saturação (20°C) [kPa]	302,2	571,7
Pressão reduzida	0,083	0,14
Massa específica do vapor/líquido [kg/m ³]	7,91/556,86	27,8/1225
Volume específico vapor/líquido [m ³ /kg]	0,13/1,8x10 ⁻³	0,036/8,2x10 ⁻⁴
Condutividade térmica do líquido [W/mK]	0,0911	0,08562
Calor específico líquido/vapor [kJ/kgK]	2,4/1,76	1,4/1,0
Viscosidade do líquido [μ Pa-s]	145,8	206,8
Calor latente de vaporização [kJ/kg]	334,33	182,27
Tensão superficial [mN/m]	10,7	8,69

Fonte: Elaborado pela autora.
 Informações consultadas em EES (2016) para T = 20 °C.

A menor viscosidade, maior tensão superficial e a maior condutividade térmica do R600a em

relação ao R134a contribuem positivamente para maiores coeficientes de transferência de calor. O maior volume específico do R600a causa maiores velocidades da fase vapor, intensificando os efeitos convectivos. Associado a menor pressão, causam a transição do padrão de escoamento de bolhas alongadas a anular em títulos de vapor mais baixos, influenciando no comportamento do coeficiente de transferência de calor. O coeficiente tende a diminuir em títulos de vapor menores que o R134a.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados obtidos foram tratados e avaliados, com o intuito de caracterizar os padrões de escoamento para diferentes condições operacionais, determinando a frequência associada a cada padrão, assim como analisar as imagens obtidas para determinação da ocupação longitudinal do canal pelo vapor.

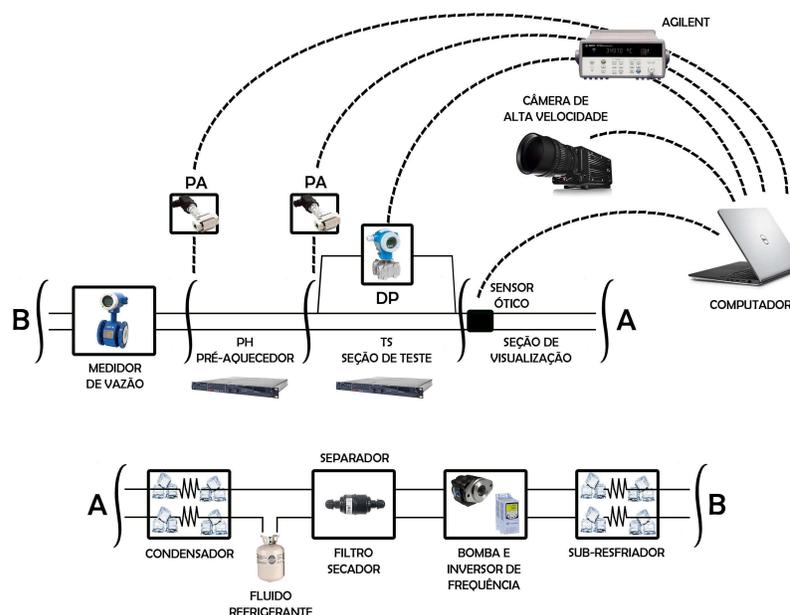
Neste capítulo, são detalhados o estudo experimental, os testes realizados e o tratamento dos dados.

3.1 Bancada Experimental

Foram realizados testes em uma bancada própria para estes estudos, conforme esquema mostrado na Figura 14 e os itens que compõem a bancada experimental e suas quantidades são mostrados na Tabela 6.

A bancada de testes é um circuito fechado de refrigerante que é vaporizado para diferentes condições em um micro canal. A parte principal da bancada é composta de uma seção de pré-aquecimento do fluido, a seção de testes e uma seção de visualização do escoamento. A parte secundária possibilita a condensação do fluido, e subresfriamento para iniciar novamente o processo de ebulição.

Figura 14: Esquema da Bancada Experimental



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 6: Composição da Bancada Experimental

Item	Quantidade
Condensador	1
Sub-resfriador	1
Banho Térmico	2
Separador de Refrigerante	1
Bomba	1
Inversor de Frequência	1
Reservatório de Refrigerante	1
Sistema de Aquisição de Dados	1
Medidor de Vazão Mássica	1
Transdutor de Pressão Absoluta	2
Transdutor de Pressão Diferencial	1
Termopar	18
Sensor óptico	1
Câmera de Alta Velocidade	1
Seção de Pré-aquecimento (PA ou PH)	1
Seção de Teste (ST ou TS)	1
Seção de Visualização	1
Fonte de Calor de Corrente Contínua (Fonte DC)	2

Fonte: Elaborado pela autora.

3.1.1 Seções de Pré-Aquecimento, Teste e Visualização

As seções de pré-aquecimento (PH) e de teste (ST) são compostas de tubos de aço inoxidável de $d_i = 1 \text{ mm}$ e $d_e = 1,51 \text{ mm}$, isoladas termicamente com lã de vidro e manta elastomérica. Já a seção de visualização (SV) é um tubo de vidro pirex, com o mesmo diâmetro interno das demais, mas com 6 mm de diâmetro externo.

A função da seção PH é pré-aquecer o refrigerante sub-resfriado para alcançar a condição de saturação (pressão e temperatura) na seção de testes. Esta seção possui 515 mm de comprimento, sendo que, 440 mm são aquecidos através do efeito Joule por uma fonte de potência conectada ao tubo. A própria parede do tubo serve como condutor de calor uniforme, que fornece este calor para o fluido. Um conjunto de 5 termopares estão distribuídos ao longo do tubo, posicionados na parede externa na parte superior, para controle da temperatura ao longo da seção e avaliação do escoamento monofásico do refrigerante.

A ebulição do fluido refrigerante é realizada na seção de testes, que tem um comprimento total de 366 mm, com 265 mm aquecidos. O aquecimento também é por efeito Joule. As medições de temperatura são realizadas por 10 termopares, fixados na superfície externa do tubo, dois em cada posição axial, distantes entre si de 180° em relação ao eixo do canal e dispostos verticalmente em 5 posições ao longo do comprimento. Além dos medidores de temperatura, ainda existem transdutores de pressão absoluta conectados na entrada e saída do

pré-aquecedor e um transdutor de pressão diferencial na seção de testes.

No início da seção de visualização, que possui 155 mm de comprimento, está conectado o sensor óptico. É nessa seção que as imagens dos padrões de cada teste são observadas e obtidas, através da câmera de alta velocidade.

3.1.2 Fontes de Potência

As fontes de potência utilizadas no PH e na ST são fontes de corrente contínua, com ajustes de tensão e corrente, para possibilitar o ajuste da potência a ser entregue. Ambas são da marca *Sorensen*[®], modelo DCS 8-125E de 1 kW, sendo que a tensão pode variar de 0 V até 8 V e a corrente pode chegar até 125 A. Os cabos de saída das fontes são conectados aos tubos do pré-aquecedor e da seção de testes através de conectores terminais de cobre, o que possibilita que a troca térmica tenha a menor perda de calor possível e o efeito Joule seja mais eficiente.

3.1.3 Condensador, Sub-resfriador, Banhos Térmicos

O vapor sai da seção de testes e é condensado em um trocador duplo-tubo com uma solução de água-etilenoglicol, que é mantida a baixa temperatura por um banho termostático Q214M da *Quimis*[®], que opera entre as temperaturas de -20 °C e 99 °C.

Semelhante ao condensador, após a bomba existe outro trocador de calor, que possui a função de sub-resfriador, ou seja, garante que o fluido refrigerante esteja na condição de sub-resfriamento para entrar no medidor de vazão mássica, pois não pode existir vapor na entrada desse, e posteriormente na seção de pré-aquecimento. O banho termostático que realiza a troca de calor com o sub-resfriador é o MQBTC 99-20, da *Microquímica*[®], sendo que este também opera entre -20 °C e 99 °C. Ambos os trocadores de calor são isolados com mantas elastoméricas para evitar perdas de calor.

3.1.4 Separador de Refrigerante, Reservatório e Filtro Secador

Para fins de controle de pressão do sistema, existe um reservatório com capacidade de 2 litros de fluido refrigerante, localizado entre a bomba e o condensador. Este controle de pressão é necessário pois podem ocorrer variações de pressão devido às mudanças de fluxo de calor. Já para evitar cavitação na bomba com a entrada de vapor na mesma, um separador cilíndrico de refrigerante é colocado antes da bomba, para realizar a decantação da fase líquida. O cilindro possui capacidade de armazenamento de, aproximadamente, 1 litro.

Juntamente com o separador de refrigerante, existe um secador modelo 100x1/4”R, da *Frigelar*[®], que é usado para retirar a umidade do fluido refrigerante após a sua inserção na bancada. O dispositivo de secagem é alocado em um by-pass próximo ao reservatório, então após a carga, a bomba faz com que o refrigerante circule pelo sistema, realizando a retirada de toda

a umidade presente no fluido. Depois de alguns minutos é possível fechar o by-pass onde o secador está e o fluido passa a circular vindo diretamente do reservatório.

3.1.5 Bomba e Inversor de Frequência

O inversor de frequência CFW 500 da *WEG*[®] é utilizado para controlar o motor *WEG*[®] B34D, de 0,75 CV, que aciona a bomba de acoplamento magnético da Tuthill[®], modelo D-1002-01, que faz com que o fluido refrigerante circule pela bancada, e a sua mudança de velocidade, conseqüentemente, controla a vazão do fluido. A bomba pode chegar a até 3500 rpm, sendo que esta rotação é indiretamente regulada pelo inversor, que pode variar a sua frequência de saída entre 0 Hz e 500 Hz.

3.1.6 Medidor de Vazão Mássica

O medidor da vazão mássica do fluido é do tipo Coriolis, modelo DCI, da *Endress+Hauser*[®], com limite de medição de vazão de 4 kg/h (precisão de $\pm 0,25\%$). Para possibilitar o envio dos dados lidos para o aquisitor de dados, há um transmissor eletrônico conectado ao medidor. O modelo de medidor utilizado ainda possibilita a leitura integrada de vazão volumétrica, temperatura e massa específica.

3.1.7 Transdutor de Pressão

A bancada possui três transdutores de pressão, sendo um deles de pressão diferencial e os demais de pressão absoluta. A função do medidor de pressão diferencial, localizado na ST, é mensurar a perda de pressão do fluido entre a saída e a entrada desta seção. Já os transdutores de pressão absoluta, servem para medir a pressão de entrada e de saída da seção de pré-aquecimento.

Os transdutores de pressão absoluta são da marca *Keller*[®], modelo PAA-33X (precisão $\pm 0,05\%$ de fundo de escala) e possuem faixa de operação variando entre 0 MPa e 15 MPa, com sinais de saída de tensão entre 0 V e 10 V. O transdutor de pressão diferencial opera entre 0 kPa e 75 kPa, mas com sinal de saída de corrente elétrica, variando entre 4 mA e 20 mA, sendo ele do modelo 600T da *ABB*[®] (precisão de $\pm 0,10\%$).

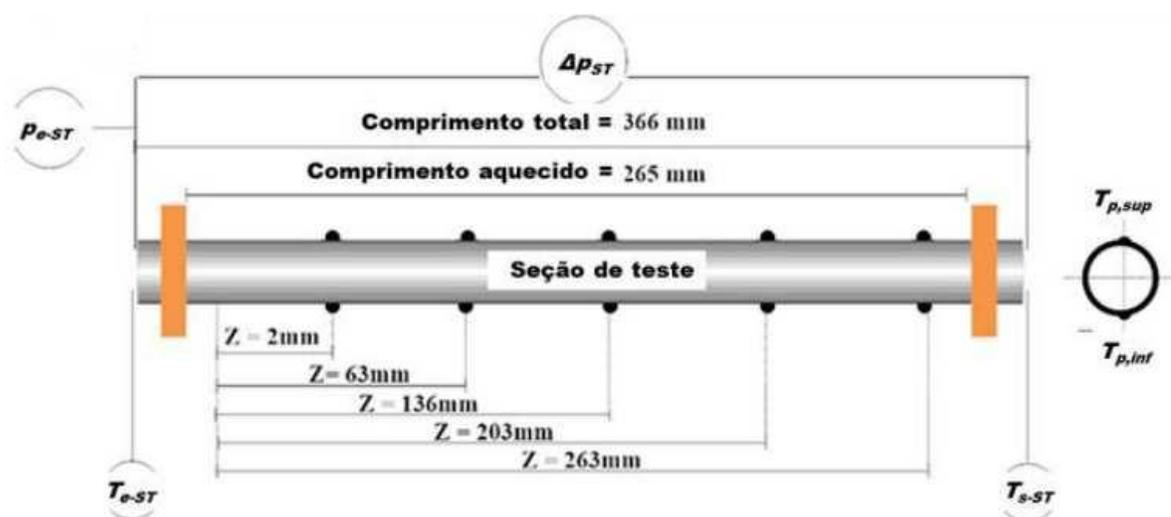
3.1.8 Sensores de Temperatura

As medições de temperatura são realizadas através de 18 termopares, da marca *Ômega*[®], de níquel-cromo do tipo E, com 76 μm de espessura, distribuídos ao longo das seções de pré-aquecimento e teste.

Os termopares da seção de PA estão posicionados na parte superior da parede do tubo, nas

posições +2 mm, +111 mm, +220 mm, +329 mm e +438 mm, sendo o início considerado no começo da superfície aquecida. Na seção de testes, os sensores são colados na superfície externa do tubo, conforme indicado no esquema da Figura 15. As posições destes termopares são nos comprimentos aquecidos de +2 mm, +69 mm, +137 mm, +204 mm e +263 mm.

Figura 15: Esquema do Posicionamento dos Termopares na Superfície da ST



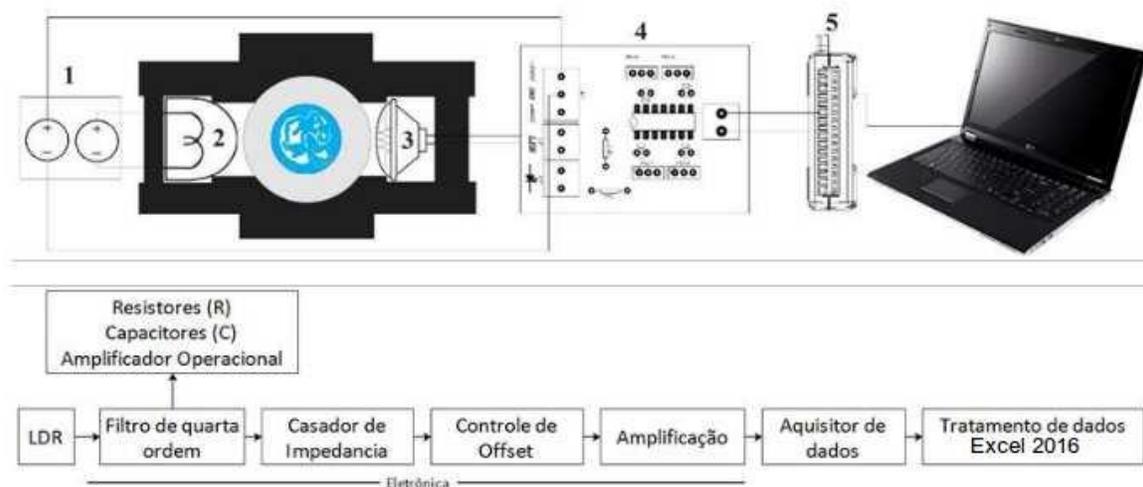
Fonte: Oliveira (2017).

Além destes 10 termopares posicionados na seção de teste e os 5 na seção de pré-aquecimento, que têm por finalidade verificar as mudanças de temperatura de parede, ainda existem outros três termopares posicionados junto com os transdutores de pressão para medir a temperatura no fluido. O termopar na entrada do pré-aquecedor indica o grau de sub-resfriamento do fluido, já o termopar entre PA e ST indica a condição de entrada do refrigerante na seção de testes. O último termopar está situado na entrada da SV e tem por função medir a temperatura de saída da seção de teste.

3.1.9 Sensor Óptico

Na entrada da seção de visualização (SV), está fixado na superfície externa do tubo de vidro um sensor óptico composto por um *Light Emitting Diode* (LED, diodo emissor de luz) de alto brilho, um *Light Dependent Resistor* (LDR, resistor dependente de luz) e um circuito eletrônico para amplificação e filtragem da frequência do sinal lido, este sensor foi desenvolvido no próprio LETEF (Laboratório de Estudos Térmicos e Fluido-Dinâmicos). O esquema da montagem do sensor no tubo e do conjunto sensor, filtragem e sistema de aquisição é apresentado na Figura 16.

Figura 16: Sensor Óptico e Circuito Eletrônico



Fonte: Adaptado de Oliveira (2017).

(1) Fonte de alimentação independente para o LED e o circuito eletrônico; (2) LED; (3) LDR; (4) Circuito eletrônico; (5) Sistema de aquisição NI 6009.

A leitura do sinal é realizada através da variação luminosa recebida pelo *LDR* devido à passagem do fluido com suas diferentes fases, com uma frequência de aquisição de 1 kHz . Isto ocorre devido à resistência deste componente variar com a mudança da intensidade luminosa, e é transformada em uma variação de tensão pelo circuito, que é composto por um filtro passa-baixas de 4ª ordem e por um amplificador operacional (amp-op) OPA 4227, sintonizado com frequência de corte de 1600 Hz .

3.1.10 Câmera de Alta Velocidade

A câmera utilizada para a aquisição das imagens dos padrões de escoamento é a *IDT[®] MotionPro Y4*, que é um equipamento de alta velocidade, capaz de gravar até 50.000 fps (*frames* por segundo) em uma área de captura de até 32 pixels quadrados. A câmera é posicionada na seção de visualização, que possui um conjunto de iluminação de LEDs de alto brilho, para auxiliar na melhora da qualidade das imagens.

Além das imagens, também são criados vídeos com a sequência de *frames* capturados, possibilitando verificar como ocorre o desenvolvimento dos padrões ao longo do tubo.

3.1.11 Sistema de Aquisição de Dados

A aquisição dos dados é realizada através do equipamento *Agilent[®]*, que é conectado a um computador via porta RS-232, para ler e registrar os dados lidos de vazão, pressão e temperatura. O multimedidor é do modelo 34972A, possuindo três módulos multiplexados 34901A. Os dados

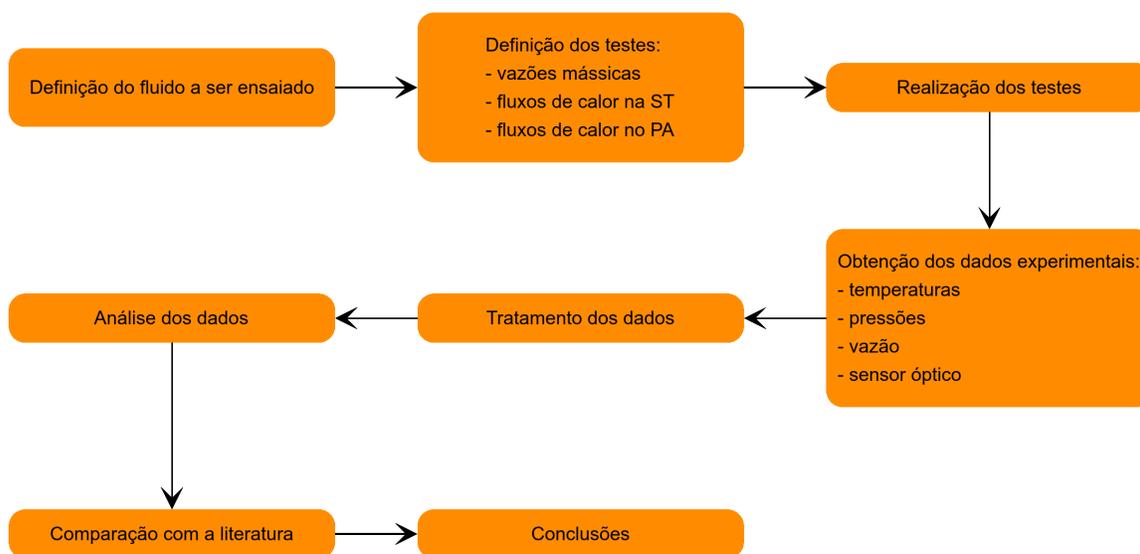
são registrados no computador através do *software BenchLink Data Logger Pro*, que é da mesma marca do equipamento.

Além disso, os valores de tensão lidos pelo sensor óptico são obtidos através do aquisitor NI cDAQTM-9171 da *National Instruments*[®], conectado via porta USB Tipo A (conectado ao computador) e USB Tipo C (conectado ao aquisitor), e também registrados pelo *Labview*[®] 2013, para então serem tratados com o auxílio do *Matlab*[®] 2018.

3.2 Métodos

Os métodos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa são descritos a seguir. A Figura 17 mostra as etapas realizadas para a elaboração do processo experimental desse trabalho.

Figura 17: Etapas do Experimento



Fonte: Elaborado pela autora.

- Definição do fluido e dos testes.

O fluido refrigerante utilizado foi o hidrocarboneto, isobutano, R600a. As condições dos testes realizados durante a pesquisa estão apresentados na Tabela 7, que mostram as variações de velocidade mássica (G) e fluxo de calor aplicado na seção de testes (q''_{ST}), definidos para que pudessem ser observados padrões de escoamento desde bolhas isoladas até anular ondulado, para uma temperatura de saturação de $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ e pressão de 371 kPa.

Tabela 7: Parâmetros Considerados nos Testes

Parâmetro	
Fluido	Isobutano - R600a
G [kg/m^2s]	520, 740, 920, 1220
q''_{ST} [kW/m^2]	10, 20, 30, 40, 60
T_{sat} [$^{\circ}C$] / P_{sat} [kPa]	27 / 371
Taxa de calor no PA [kW]	2 - 60
Número total de testes	102
Frequência do SO [kHz]	1
Tempo de aquisição do <i>Agilent</i> [®] [ms]	200
Aquisição da câmera [fps - $frames/s$]	2000

Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores definidos de taxa de calor ou, por unidade de área de superfície, do fluxo de calor na ST são ajustados na fonte de potência, variando os valores de tensão e corrente. Fixado o fluxo de calor na ST, a taxa de calor do pré-aquecedor é ajustada, também em uma fonte de potência, de modo a estabelecer em cada teste um padrão de escoamento. Assim, os diferentes padrões podem ser identificados na seção de visualização e testes.

Com esses testes, foi avaliada a relação entre as frequências geradas com os padrões de escoamento desenvolvidos. Os dados obtidos nos ensaios foram tratados conforme os métodos descritos nesse capítulo e apresentados no capítulo a seguir.

- Realização dos testes e aquisição dos dados.

Os testes da Tabela 7 foram realizados na bancada descrita na Seção 3.1, e os parâmetros medidos foram as temperaturas de entrada e saída no PA (T_{ePA} e T_{sPA}) e as pressões da entrada e da saída (P_{ePA} e P_{sPA}). Na ST as temperaturas (T_{eST} e T_{sST}), o diferencial de pressão (ΔP_{ST}) e as medidas de temperatura de superfície (superior e inferior) em cinco posições ao longo do comprimento da ST. Essas medições são realizadas pelo aquisitor de dados da *Agilent*[®], através do programa *Benchlink* a cada 200 ms.

Paralelamente, os sinais do sensor óptico (variações de tensão e as diferenças de pressão entre a entrada e a saída da seção de teste), são registrados com o uso do aquisitor de dados da *National Instruments*[®], através do programa *Labview*[®] 2013 com uma frequência de aquisição de 1000 Hz. Simultaneamente ao registro dos sinais, as imagens e vídeos dos padrões de escoamento correspondentes são capturadas com uma taxa de 2000 *frames* por segundo pela câmera de alta velocidade e armazenados.

- Tratamento dos dados.

A partir dos dados medidos foram calculados os principais parâmetros descritos abaixo, com o auxílio do *software EES*.

a) Taxa e fluxo de calor da seção de testes.

$$q_{ST} = V_{ST} I_{ST} \quad (3.1)$$

sendo V_{ST} e i_{ST} a tensão e a corrente fornecidas pela fonte de calor da ST.

$$q''_{ST} = \frac{q_{ST}}{A_{sup}} \quad (3.2)$$

na qual a área de superfície é dada por:

$$A_{sup} = \pi d_i L \quad (3.3)$$

b) Velocidade mássica.

$$G = \frac{\dot{m}}{A_{st}} \quad (3.4)$$

sendo a área da seção transversal do tubo dada por:

$$A_{st} = \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (3.5)$$

c) Temperatura de saturação.

Na saída da ST a condição é de saturação. A pressão de saída da ST é calculada a partir da pressão de entrada e do diferencial de pressão, ou:

$$P_{sST} = P_{eST} - \Delta P_{ST} \quad (3.6)$$

E a temperatura de saturação, T_{sat} , é a temperatura correspondente à pressão de saída, ou $P_{sST} = P_{sat}$.

d) Comprimento de início da ebulição ONB.

A condição de início de ebulição, denominada ONB, pode ocorrer no início da ST ou ao longo de seu comprimento. A distância do início da área aquecida (L_{sub}) que se inicia a ebulição nucleada (ONB) foi calculada com a Primeira Lei da Termodinâmica (Equação 3.7).

$$L_{sub} = G d_i c_p \frac{T_{sat} - T_{eST}}{4q_{flux}} \quad (3.7)$$

tendo c_p como o calor específico do fluido, em função da temperatura e pressão da entrada da seção de testes.

e) Título de vapor.

O título de vapor na saída da seção de testes é calculado com a Equação 3.8.

$$x_{sST} = \frac{i_{sST} - i_{lST}}{i_{v_sST} - i_{l_sST}} \quad (3.8)$$

sendo i_s é a entalpia de saída da seção de testes, que é calculada segundo a Equação 3.9, i_l é a entalpia de líquido saturado e i_v a de vapor saturado na condição de saturação na saída.

$$i_{sST} = \frac{q_{ST}}{\dot{m}} + i_{eST} \quad (3.9)$$

tendo q_{ST} como a taxa de calor na seção de testes, \dot{m} a taxa de massa e i_{eST} é a entalpia na entrada da ST, que é determinada a partir dos dados de pressão e temperatura desse local.

f) Determinação dos coeficientes convectivos de transferência de calor (h) para cada condição.

Utilizado para avaliar a eficiência da transferência de calor no escoamento e para indicar quais as configurações de vazão, pressão e temperatura são as ideais para um melhor

aproveitamento térmico do fluido refrigerante. O cálculo de h é dado pela equação da convecção (Equação 3.10), ou:

$$q''_{ST} = h(T_{si} - T_{sat}) \quad (3.10)$$

sendo T_{si} a temperatura da superfície interna do tubo.

Foram medidas para posição z ao longo do comprimento do tubo, duas temperaturas na superfície externa do tubo, superior $T_{se_s,z}$ e inferior $T_{se_i,z}$. A partir da média destas duas temperaturas, calcula-se a temperatura da superfície interna, $T_{si,z}$, considerando geração de calor uniforme na parede do tubo.

$$T_{se_z} = \frac{T_{se_s,z} - T_{se_i,z}}{2} \quad (3.11)$$

$$T_{sup_{i_z}} = T_{sup_{e_z}} + \frac{qg}{4k}(r_e^2 - r_i^2) - \frac{qg}{2k}r_e^2 \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) \quad (3.12)$$

sendo T_{sup_i} e T_{sup_e} as temperaturas de superfície interna e externa, qg é o calor gerado na parede do tubo devido ao efeito Joule (Eq. 3.13), r_e e r_i são os raios externo e interno do tubo, k é condutividade térmica do aço inoxidável.

$$q_g = \frac{q_{ST}}{volume} \quad (3.13)$$

- Cálculo da fração de vazio.

Para o cálculo da fração de vazio foi utilizada a correlação de Rouhani e Axelsson (1970), que engloba possíveis casos de ebulição sub-resfriada que ocorram no PH. Essa é função do título de vapor na saída, assim como das propriedades do fluido.

$$\alpha_s = \frac{x_s}{\rho_v} \left\{ \left[1 + 0,12(1 - x_s) \right] \left[\frac{x_s}{\rho_v} + \frac{1 - x_s}{\rho_l} \right] + 1,18(1 - x_s) \frac{g \cdot \sigma (\rho_l - \rho_v)^{0,25}}{G(\rho_l)^{0,5}} \right\}^{-1} \quad (3.14)$$

sendo σ a tensão superficial do fluido e, ρ_v e ρ_l as massas específicas do vapor e do líquido na temperatura de saturação.

- Cálculo do número de predição dos padrões de escoamento.

Um método para prever os padrões de escoamento é através do número β (Equação 3.15), que mostra uma dependência da fração de vazio, título de vapor e também das velocidades superficiais das fases.

$$\beta = (S \cdot Bo) \cdot 10^5 \quad (3.15)$$

onde S é o fator de escorregamento, mostrado anteriormente na Equação 2.6 e Bo é o Número de *Boiling*, dado pela Equação 3.16.

$$Bo = \frac{q_{flux}}{G(i v_{sST} - i l_{sST})} \quad (3.16)$$

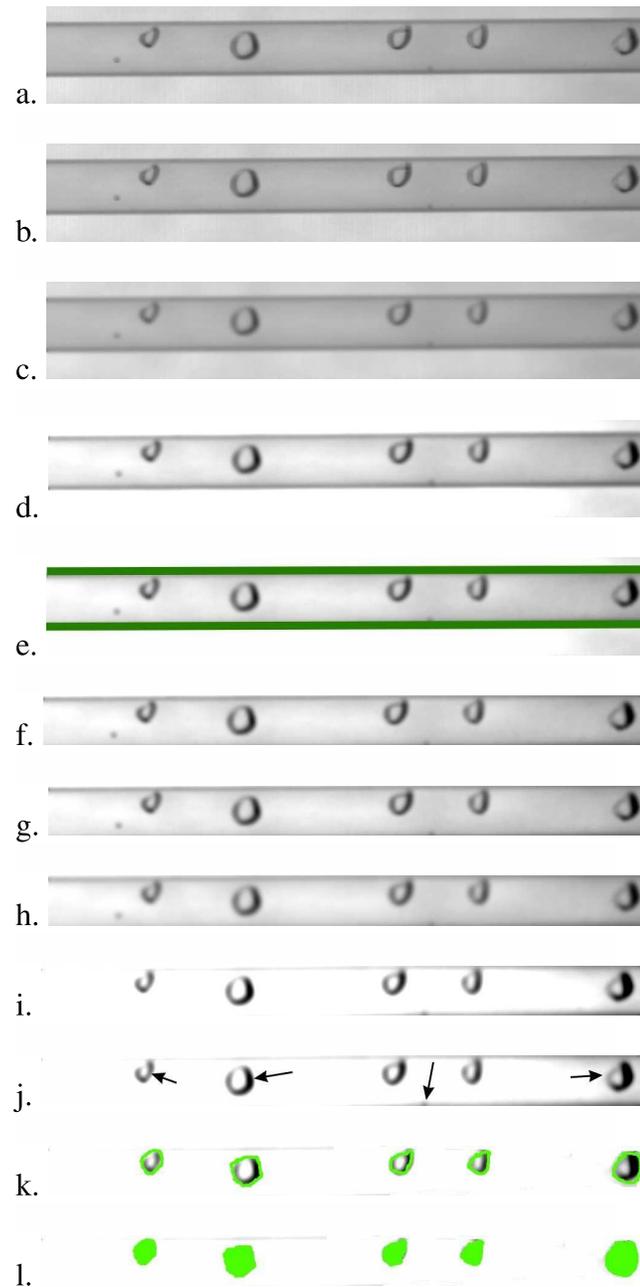
- Tratamento das imagens obtidas com câmera de alta velocidade e determinação da ocupação longitudinal do canal.

Através de um programa desenvolvido em linguagem de programação *Python*, as imagens registradas são processadas com técnicas de análise de diferenciação de cores e formas, sendo possível determinar a área ocupada pelo vapor dentro do canal. Isso possibilita determinar a ocupação longitudinal do vapor na área de visualização que é capturada pela câmera de alta velocidade. A sequência de imagens obtidas para cada conjunto definido de testes é passada pelo *script* e retorna o percentual de ocupação baseado nas imagens.

O programa desenvolvido para a análise das imagens utiliza alguns recursos de tratamento das imagens para permitir a identificação das bolhas e bolsas de vapor. Esta análise é realizada com todo o conjunto de imagens registradas, cerca de 2 s de aquisição à uma taxa de 2000 *frames* por segundo, então feita uma média dos valores obtidos.

A Figura 18 mostra um exemplo da evolução das etapas do tratamento da imagem. Primeiramente é realizado um pré-tratamento da imagem, que é transformada de uma foto colorida (Figura 18a) em uma em escala de cinza (Figura 18b), posteriormente ocorre o processo de *blur* na imagem (Figura 18c), que embaça a imagem fazendo a retirada de ruído dos *pixels*. A seguir a imagem é transformada de escala de cinza para preto e branco (P&B) (Figura 18d), para que seja possível identificar as linhas retas da imagem (Figura 18e), que são as paredes do canal (que é necessário para garantir que mesmo que o tubo não esteja 100% na horizontal, seja possível encontrar as bordas do tubo corretamente), após essa identificação, as paredes do canal são aparadas (Figura 18f), mantendo somente a área interna do tubo.

Figura 18: Processos do Tratamento de Imagem Realizados pelo Algoritmo



Fonte: Elaborado pela autora.

O segundo tratamento realizado na imagem é para a real identificação das bolhas, onde a imagem já cortada (sem as paredes do canal) recebe o mesmo tratamento inicial novamente (escala de cinza - Figura 18g, *blur* - Figura 18h e P&B - Figura 18i) e então passa por dois processos para eliminação de *pixels* de ruído, pois podem haver pontos na imagem que são provenientes dos tratamentos e não devem influenciar na análise, então os *pixels* ao redor desses pontos são dilatados (as cores são contrastantes, já que a imagem está num formato preto e branco, então as bordas das bolhas e ruídos são pretos e o fundo é branco) e posteriormente, as

cores do fundo são retraídas, para que as bordas das bolhas voltem ao tamanho normal (como se os *pixels* preto fossem dilatados nesse momento) (exemplo desses *pixels* são indicados com setas na Figura 18j). Assim que os ruídos são eliminados, o algoritmo localiza as bordas brancas e cria contornos, posteriormente esses contornos são fechados, criando conjuntos de bordas (que são as bolhas da imagem) (Figura 18k). Assim que isso ocorre, o programa faz um desenho da bolha e pinta a área interna (Figura 18l), possibilitando a medição dessa área projetada, então a área total da imagem é calculada e assim é realizado o cálculo da ocupação longitudinal do canal.

- Tratamento dos dados obtidos com o sensor óptico para a determinação das frequências características dos padrões observados, através do PSD da Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform - FFT).

Essa análise é realizada com o auxílio do *Matlab*® 2018, através de um código que trata os sinais do sensor óptico e fornece a FFT dos mesmos, que posteriormente é usada como parâmetro de entrada para obter o PSD do sinal lido pelo sensor óptico. Os dados de amplitude e frequência da transformada são plotados e avaliados, comparando as diferentes configurações dos testes e padrões de escoamento encontrados.

Para o cálculo da FFT, os dados lidos pelo NI cDAQ™-9171 são inseridos no *script* desenvolvido, que calcula o valor do sinal lido menos a sua média, então esse sinal resultante possui seu tamanho reduzido para um comprimento de potência 2. Este sinal é utilizado para calcular a Transformada Rápida de Fourier através da função *fft* do próprio *Matlab*® 2018.

Para a determinação do PSD da FFT, os valores da transformada são multiplicados pelo seu próprio conjugado e divididos pelo comprimento do sinal. Os valores do PSD são dados em W/Hz , pois representam a potência do sinal lido em cada valor de frequência da FFT.

- Análise dos dados experimentais e comparativo com a literatura.

Os dados experimentais foram analisados de modo a permitir uma comparação com resultados existentes na literatura, visando encontrar paralelos entre os resultados desse trabalho e de outros autores. Para ser possível realizar esse paralelo condizente entre os dados experimentais e os dados da literatura, é necessário que certas semelhanças existam entre esta pesquisa e os selecionados. Dentre essas semelhanças estão:

- a) Parâmetros avaliados;
- b) Tamanho do canal;
- c) Tipo de fluido;
- d) Mudança de fase;
- e) Tipo de sensor utilizado;

f) Método utilizado para análise.

Conforme observado por Dias, Copetti e Oliveira (2019), existe uma lacuna referente a estudos que avaliam padrões de escoamento durante a mudança de fase, já que muitos dos trabalhos elaborados na área são referentes a escoamento bifásico (líquido-líquido ou líquido-gás).

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

O principal objetivo do presente estudo é investigar e mapear os padrões de escoamento do fluido refrigerante R600a durante a ebulição em um micro canal. Para os experimentos realizados, as análises dos dados se dão conforme descrito a seguir.

4.1 Padrões de Escoamento

A Figura 19 apresenta os padrões de escoamento identificados nos diferentes testes com o R600a realizados a diferentes velocidades mássicas (G) e fluxo de calor (q''), assim como os valores de título de vapor (x), fração de vazio (α) e as velocidades superficiais das fases líquido (j_l) e vapor (j_v), associadas. Os padrões foram bolhas isoladas, bolhas alongadas, pistonado, *slug*, *churn* e anular, de acordo com os padrões identificados em outros estudos realizados em micro canais (REVELLIN; THOME, 2007; ONG; THOME, 2009, 2011).

Figura 19: Padrões de Escoamento do R600a

	R600a imagens	x [-]	G [kg/m ² s]	q'' [W/m ²]	α [-]	j_l [m/s]	j_v [m/s]	Padrão
a		0,01245	520	10	0,358	0,934	0,703	Bolhas Isoladas
b		0,01245	740	20	0,3609	1,344	0,9904	Bolhas Isoladas
c		0,04973	520	20	0,6619	0,8847	2,808	Bolhas Alongadas
d		0,03587	740	30	0,591	1,303	2,749	Bolhas Alongadas
e		0,01967	740	20	0,463	1,326	1,55	Pistonado
f		0,02507	920	30	0,524	1,657	2,505	Pistonado
g		0,02653	1220	40	0,5383	2,171	3,450	Pistonado
h		0,04335	520	10	0,6326	0,885	2,394	Slug
i		0,0464	740	20	0,6464	1,287	3,614	Slug
j		0,03385	1220	20	0,5782	2,150	4,122	Slug
k		0,2192	520	40	0,8538	0,7312	11,67	Churn
l		0,09036	920	30	0,7561	1,543	8,588	Churn
m		0,1421	740	30	0,8067	0,979	8,738	Churn
n		0,3814	520	60	0,8999	0,5932	19,43	Anular Ondulado
o		0,1072	920	40	0,7771	1,510	9,969	Anular Ondulado
p		0,1192	1220	60	0,7884	1,924	13,800	Anular Ondulado

Fonte: Elaborado pela autora.

Os testes foram realizados a uma velocidade mássica fixa e incrementos no fluxo de calor

na ST. Desta forma o que se observa é que para a menor velocidade mássica, $G = 520 \frac{kg}{m^2s}$, se verificam todos os padrões, de bolhas isoladas a anular ondulado, conforme aumentam o q e o título de vapor.

Com o aumento da velocidade mássica, de 740 a $1220 \frac{kg}{m^2s}$, os padrões de bolhas isoladas e alongadas, praticamente não se verificam e o padrão evolui de *slug* a *churn* e anular ondulado a baixos títulos.

É possível observar (Figura 19 a, b) que os títulos de vapor para bolhas isoladas, ou dispersas, são reduzidos, caracterizando um escoamento com mais líquido que vapor. Assim como a fração de vazio, que em quase todos os casos, mostra uma ocupação reduzida do canal com as bolhas de vapor, tendo em sua maioria, líquido ocupando o espaço do tubo, o que vai de encontro com o que as velocidades das fases mostram, que é uma velocidade de líquido superior à de vapor.

A diferença entre os padrões é possível de ser observada devido ao registro das imagens, que permite identificar bolhas mais dispersas (isoladas) e bolhas mais parecidas com pistões, que são as alongadas. Semelhante ao padrão de bolhas isoladas, o padrão de bolhas alongadas (Figura 19 c, d) é verificado em velocidades mássicas menores, a fração de vazio aumenta e a velocidade do vapor aumenta com relação à do líquido.

Com velocidades da fase vapor mais elevadas, o padrão pistonado, que é caracterizado por longas bolhas de vapor formadas da coalescência das bolhas alongadas, foi observado para diversas combinações de fluxo de calor e velocidades mássicas (Figura 19 e, f, g). Verifica-se que para as velocidades mássicas maiores, este padrão já é verificado a títulos muito reduzidos, como apresentado na Figura 19 g para $G = 1220 \frac{kg}{m^2s}$ ($x = 0,02653$), mas possui uma fração de vazio maior e velocidade de fase vapor maior que a do líquido.

Assim como no padrão pistonado, o padrão *slug* (Figura 19 h, i, j) é um padrão intermitente, no qual os largos pistões de vapor se rompem por golfadas de líquido, dando uma característica própria, que é uma cauda com bolhas dispersas e um nariz não tão bem definido. É um padrão encontrado em títulos maiores para menor G , e em títulos menores conforme o G aumenta (Figura 19 h - $G = 520 \frac{kg}{m^2s}$; Figura 19 i - $G = 1220 \frac{kg}{m^2s}$). As velocidades superficiais de vapor são bem maiores que as de líquido, e as frações de vazio aumentam com relação aos demais padrões já apresentados.

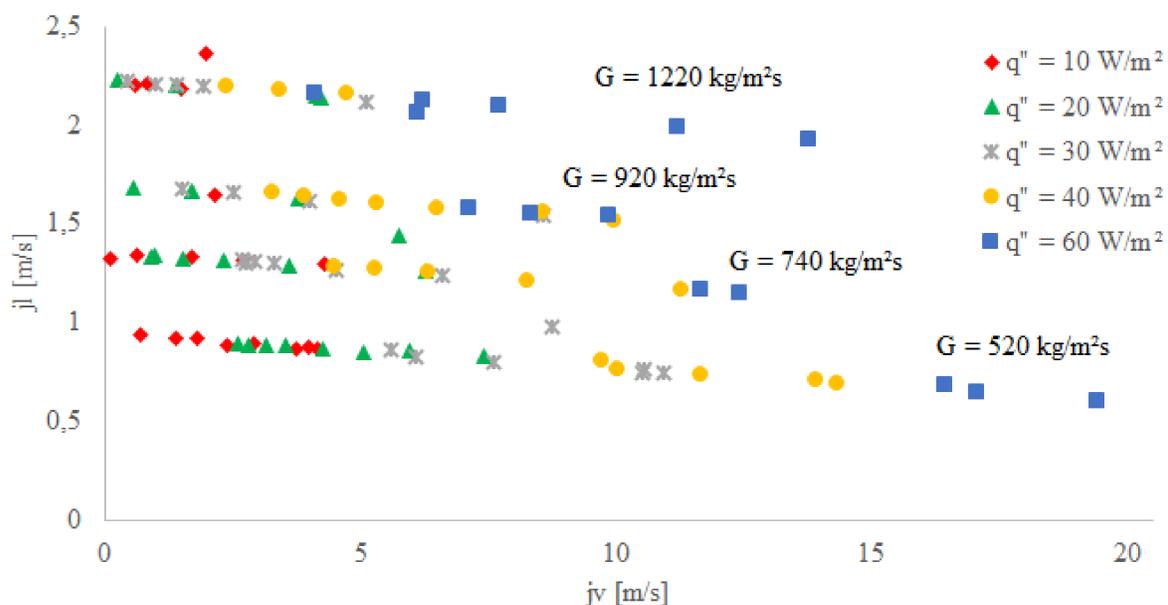
Na transição para o padrão anular, observa-se o padrão denominado *churn* (Figura 19 k, l, m), que é caracterizado por um fluxo bastante agitado, logo evoluindo para o anular ondulado e, finalmente, o anular liso.

O padrão anular ondulado foi observado em todas as configurações de teste (diferentes velocidades mássicas e fluxos de calor na ST). A fração de vazio para esse tipo de escoamento é a que possui os maiores valores (Figura 19 n, o, p). A velocidade superficial da fase vapor é elevada e significativamente maior que a do líquido, já que os cilindros de vapor desenvolvem-se no centro do tubo e são únicos, não havendo golfadas, como pode ser visto nas imagens adquiridas com a câmera de alta velocidade.

A Figura 20 apresenta a relação entre as velocidades superficiais do líquido (j_l) e do vapor (j_v) para as diferentes velocidades mássicas, G , e fluxos de calor q'' .

Para o padrão de bolhas isoladas, a velocidade do líquido é sempre superior à do vapor, mas com a evolução dos padrões a velocidade do vapor passa a ser maior e aumenta com o aumento do fluxo do calor para todas as velocidades mássicas testadas. Na Figura 20 observa-se a diminuição suave da velocidade do líquido em relação ao aumento significativo na velocidade do vapor para padrões de intermitente a anular.

Figura 20: Mapa de Velocidades de Escoamento para o R600a



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 21 mostra o mapa de padrões de escoamento que relaciona as velocidades mássicas, G , com o título de vapor, x . Foram plotados os padrões identificados através das imagens para todas as velocidades G e todos os fluxos de calor q'' .

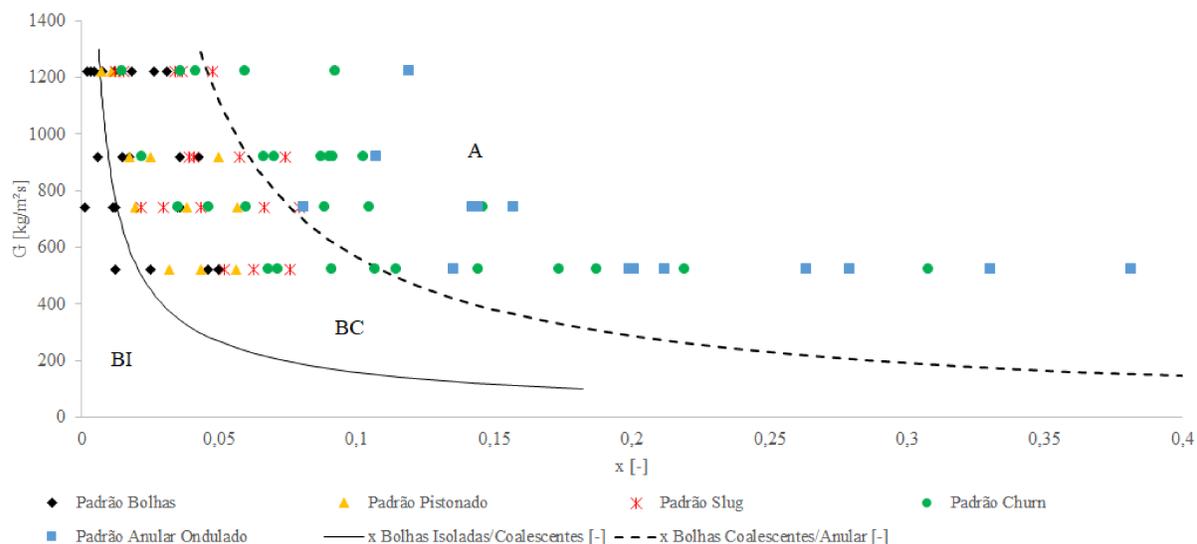
Para a menor velocidade mássica, $G = 520 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$, é possível observar títulos mais elevados, chegando a $x = 0,38$, já para velocidades mássicas maiores, em menores títulos já se observam os padrões intermitentes *churn* e anular ondulado. Por exemplo, para $G = 1220 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$, os valores dos títulos de vapor para bolhas alongadas ($x = 0,0033$) e anular ondulado ($x = 0,119$) não variam consideravelmente. Pode-se verificar uma sobreposição dos títulos em padrões que assemelham-se, bolhas e pistonado (que pode ser formado por pistões menores), em valores intermediários de G ($740 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$ e $920 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$).

Na Figura 21 foram plotadas as curvas das regiões de transição de bolhas isoladas (BI), bolhas coalescentes (BC) e anular (A), segundo modelo proposto por Ong e Thome (2011) para escoamento em microcanais, conforme citado anteriormente. Esse modelo se aplica a microcanais, com número de confinamento $C_o > 0,5$ (KEW; CORNWELL, 1997) e no caso deste

trabalho para R600a e o canal de 1 mm de diâmetro interno, o $C_o = 1,351$, portanto está de acordo com esse critério. Quando o tamanho do canal diminui, as bolhas de vapor crescem e coalescem rapidamente para preencher a seção transversal do canal, expandindo-se a jusante em comparação aos canais de maiores diâmetros. A força de inércia domina sobre a força de tensão superficial, promovendo coalescência para formar um núcleo de vapor contínuo e um filme líquido em torno da periferia do canal. Como se pode observar na Figura 21, isso resulta na expansão do regime anular, que é a transição BC/A.

O efeito do aumento da velocidade mássica é mostrado pelo comportamento das curvas. Conforme G aumenta, os títulos de vapor correspondentes às transições do padrão de escoamento tendem a diminuir. O regime pistonado/*slug* também é gradualmente suprimido e os padrões *churn* e anular praticamente dominam em G maiores. O regime de escoamento anular gradualmente expande-se e se estende por uma faixa mais ampla de títulos com o aumento de G , às custas das regiões gradualmente decrescentes do regime BI e BC. Este comportamento coincide com os dados apresentados.

Figura 21: Mapa de Padrões de Escoamento para R600a



Fonte: Elaborado pela autora.
 Curvas de transição Ong e Thome (2011) para $q'' = 45 \frac{kW}{m^2}$.

As curvas de transição do modelo de Ong e Thome (2011) foram desenvolvidas com dados experimentais dos fluidos refrigerantes R134a (Tetrafluoroetano), R236fa (Hexafluoropropano) e R245fa (Pentafluoropropano), que são fluidos refrigerantes com propriedades diferentes do R600a (Isobutano), utilizado nesse trabalho. Esse é um dos motivos para que os padrões identificados pelos dados experimentais não correspondam adequadamente ao modelo de transições de padrões apresentado na Figura 21.

As propriedades do fluido influem de modo significativo no desenvolvimento dos padrões.

Para o R600a a maior tensão superficial, assim como a menor massa específica do vapor, conforme mostrado na Tabela 5 comparando com o R134a, levam a um aumento do grau de expansão da fase de vapor durante a mudança de fase e a menores títulos de transição de BI/BC e BC/A. A pressão de saturação mais baixa também influi neste sentido.

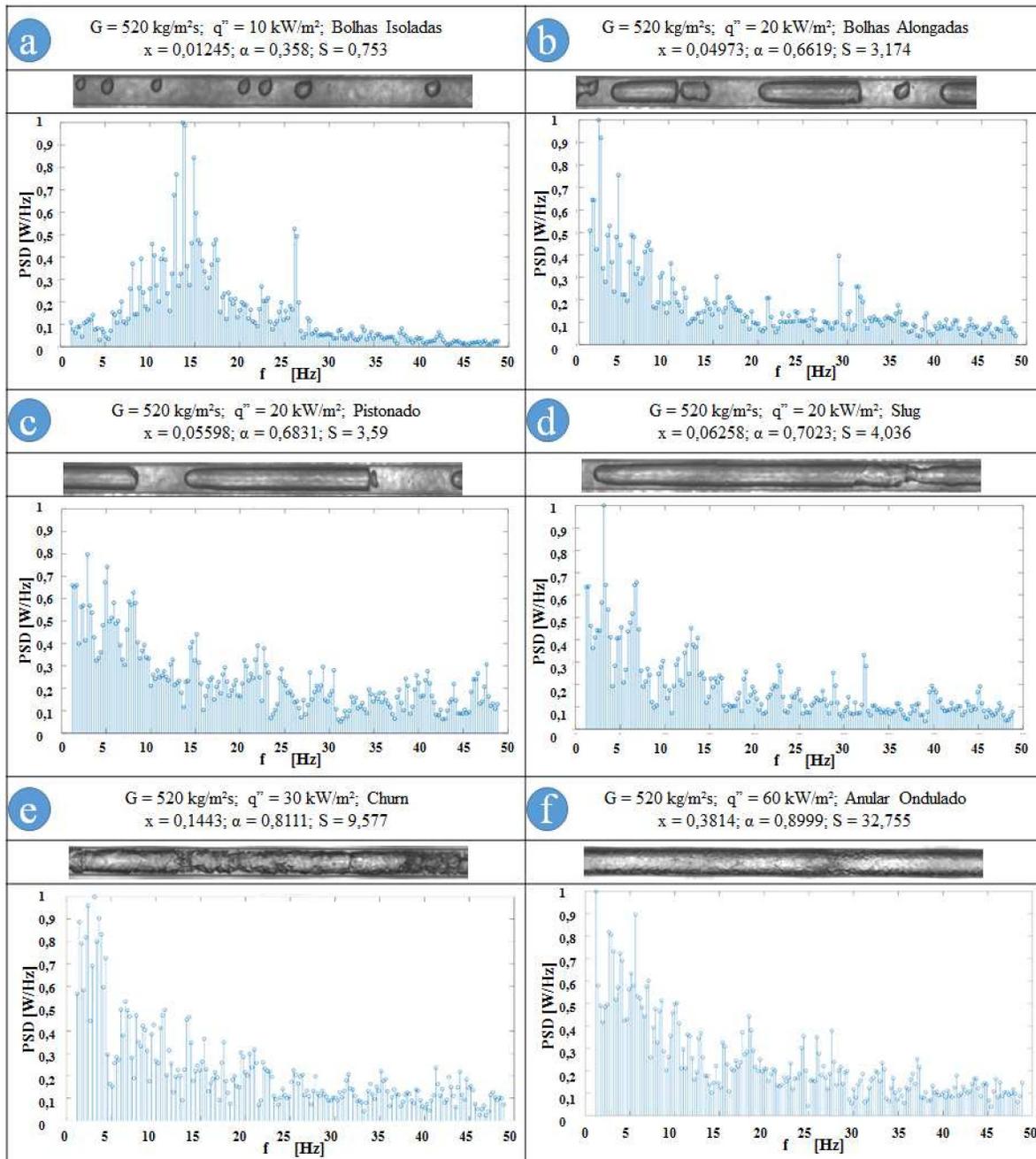
Para velocidades mássicas mais elevadas, mesmo para fluxos de calor menores, os títulos são reduzidos, e os padrões apresentam-se mais desenvolvidos. É possível observar que o comportamento dos dados está mais condizente com o modelo para o menor, $G = 520 \frac{kg}{m^2s}$, onde o padrão *churn*, semianular, está na região anular (A), o que não ocorre para os demais G, onde os padrões de transição ainda estão na região de bolhas coalescentes (BC).

4.2 Frequências Características

Os dados obtidos através das leituras do sensor óptico foram tratados através da Densidade de Potência Espectral (PSD) da Transformada Rápida de Fourier (FFT), gerando como resultado valores de potência no domínio das frequências. O valor de frequência onde ocorre a maior amplitude do sinal é aquele chamado de frequência característica daquele conjunto de dados, mas é importante notar que esses são valores médios de frequência do aparecimento das bolhas, por isso que existem picos de potência que ocorrem ao longo do espectro de frequência, não somente acumulados no local da frequência característica.

A Figura 22 mostra os espectros de frequência para os diferentes padrões observados nos experimentos para $G = 520 \frac{kg}{m^2s}$ e diferentes fluxos de calor na ST, que acarreta aumento nos valores de título de vapor (x), de fração de vazão (α) e de razão de escorregamento (S), conforme a velocidade de vapor aumenta.

Figura 22: Espectros de Frêquência: R600a, $G = 520 \frac{kg}{m^2s}$ e diferentes q''



Fonte: Elaborado pela autora.

Para bolhas isoladas (Figura 22a) é possível observar que a concentração dos maiores valores de densidade de potência estão acumulados em torno da frequência de 15 Hz, ocorrendo mais um pico entre 25 Hz e 30 Hz, o que pode ser explicado pela variação do aparecimento das bolhas, ou seja, a maior densidade de aparecimento ocorre em 15 Hz, mas como é uma média de frequências, pode existir uma concentração menor em alguma das frequências harmônicas da característica.

Com o aumento do fluxo de calor (Figura 22b) ocorre a coalescência das bolhas isoladas, gerando o aparecimento do padrão de bolhas alongadas, que possui a densidade de potência numa frequência menor (aproximadamente 5 Hz), mas assim como para bolhas isoladas, existe uma concentração para um valor de frequência maior (≈ 30 Hz), mesmo que para uma intensidade menor de sinal, o que é explicado pelas pequenas bolhas isoladas que ainda existem no escoamento.

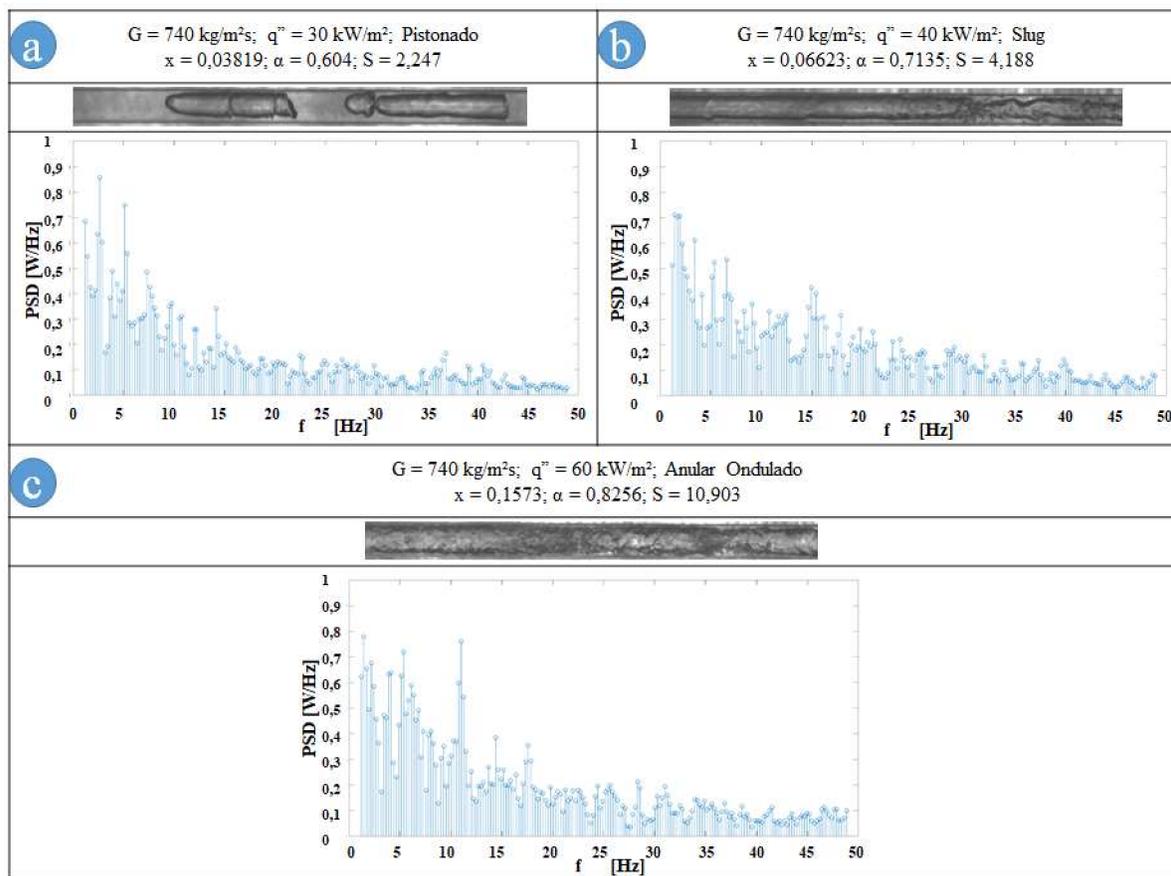
Assim como o padrão de bolhas alongadas é proveniente da coalescência das bolhas isoladas, o padrão pistonado (Figura 22c) vem da aderência das bolhas alongadas devido ao incremento do fluxo de calor na ST. Como este padrão é formado por pistões de vapor que podem variar o seu tamanho, a intensidade do PSD pode ser menor, mas com um range de frequências maior, sendo estas frequências baixas (no máximo 10 Hz).

O padrão *slug* (Figura 22d) é caracterizado por grandes pistões de vapor com uma cauda com bolhas coalescentes, devido às golfadas intermitentes de líquido. Devido à esta semelhança com o padrão pistonado, suas frequências características também se parecem com as desse padrão, ou seja, acumulam-se em valores de frequência menores (≈ 5 Hz), mas possuem um pico mais expressivo, devido à intermitência existente em seu escoamento.

Os gráficos de frequência dos padrões *churn* e anular ondulado possuem muitas semelhanças, como por exemplo, uma densidade de potência do sinal bem elevada em somente uma frequência bem reduzida (menores que 5 Hz) e outras potências menores espalhadas ao longo das frequências maiores (entre 20 Hz e 30 Hz), mas devido à morfologia do escoamento, o padrão *churn* (Figura 22e) possui intermitências ao longo da fase de vapor, apresentando um degrau maior entre o PSD da maior frequência e das demais, o que não ocorre para o padrão anular ondulado (Figura 22f), que mostra vários PSD com valores altos ao longo do espectros de frequência, conforme as mesmas crescem.

Esses mesmos efeitos podem ser observados para um $G = 740 \frac{kg}{m^2s}$, mostrado na Figura 23. Para o padrão pistonado (Figura 23a) a maior densidade aparece para valores próximos de 5 Hz, assim como para o padrão *slug* (Figura 23b), que também ocorre nessa frequência, mas com uma intensidade menor.

Figura 23: Espectros de Frêquência: R600a, $G = 740 \frac{kg}{m^2s}$ e diferentes q''

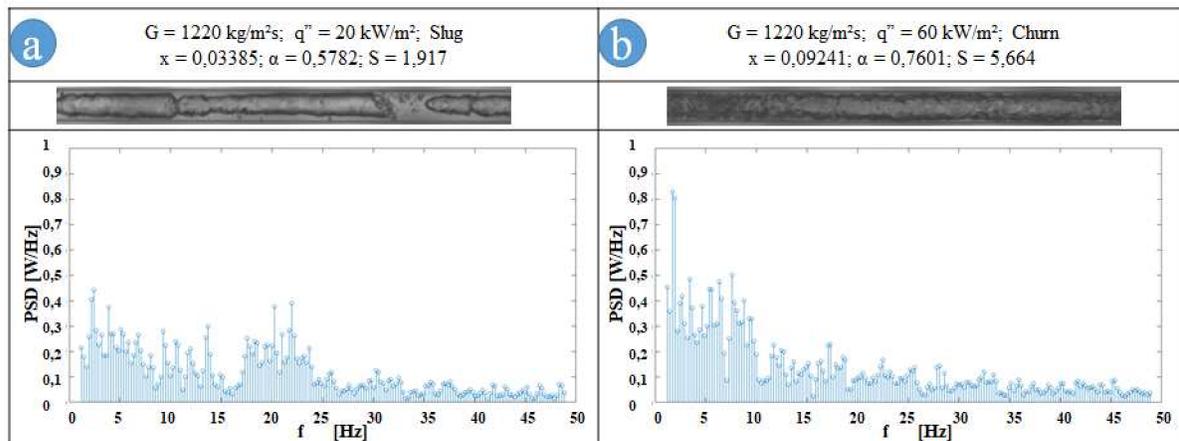


Fonte: Elaborado pela autora.

Já o padrão anular ondulado (Figura 23c), assim como para a velocidade mássica de $520 \frac{kg}{m^2s}$, também possui vários picos de densidade de potência ao longo do espectro de frequência. Com o incremento do fluxo de calor, q'' , existe o aumento do título de vapor, da fração de vazio e da relação entre a velocidade superficial do vapor e do líquido (razão de escorregamento).

A Figura 24 apresenta o efeito da variação do fluxo de calor para a maior velocidade mássica, $G = 1220 \frac{kg}{m^2s}$. Os padrões de bolhas isoladas e alongadas não foram observados e os padrões desenvolvidos já aparecem com títulos muito reduzidos, diferentemente do que ocorre para valores de G menores (Figura 24b - $x = 0,092$ para padrão *churn*, enquanto Figura 22e - $x = 0,219$ também para *churn*). Para o padrão *slug* (Figura 24a) as intensidades de potência espectral não apresentaram valores expressivos, mas seus picos ocorreram em duas regiões, em frequências menores que 5 Hz e numa faixa entre 20 Hz e 25 Hz. Já o padrão *churn* (Figura 24b) teve a sua concentração de PSD na faixa iniciada abaixo de 5 Hz e foi até valores de 10 Hz, sendo que o ponto com mais potência estava próximo de valores de corrente contínua (DC).

Figura 24: Espectros de Frêquência: R600a, $G = 1220 \frac{kg}{m^2 s}$ e diferentes q''

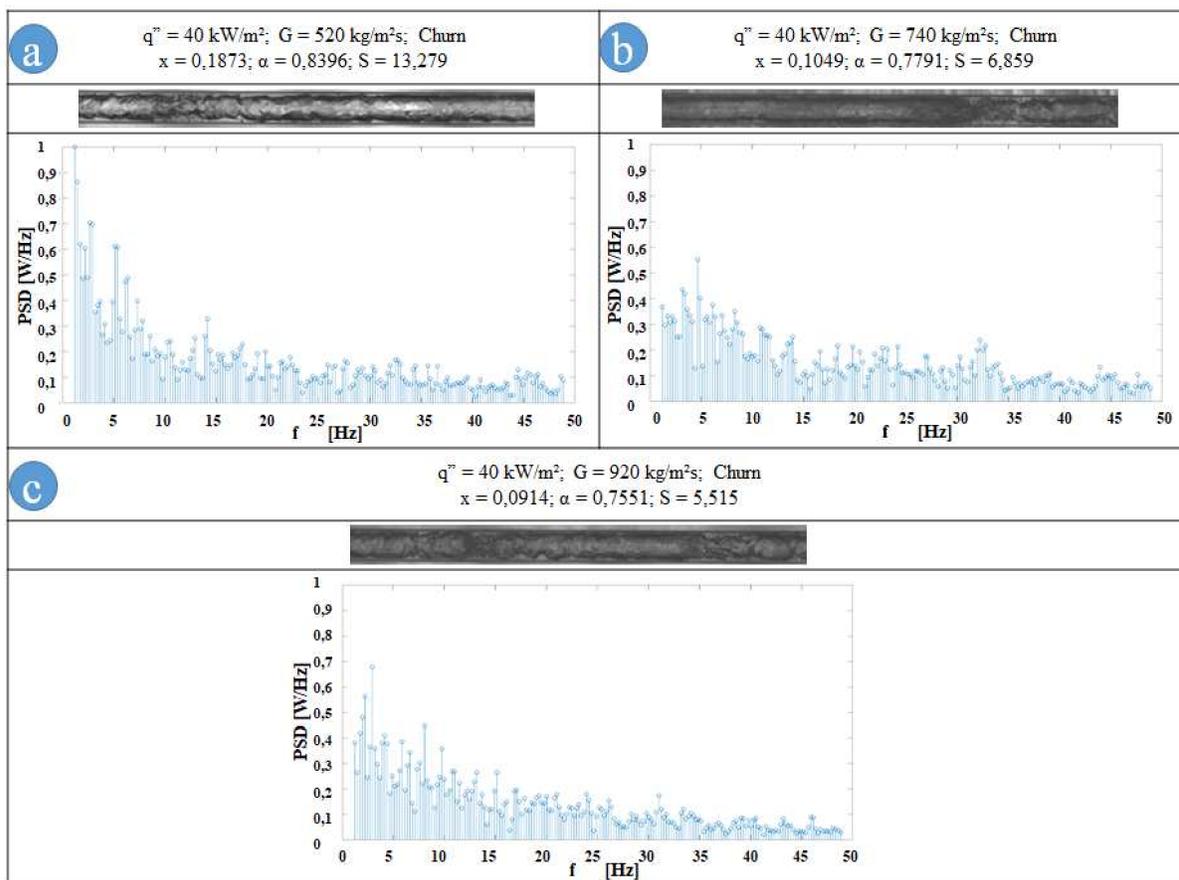


Fonte: Elaborado pela autora.

Outra análise realizada é do efeito da variação da velocidade mássica, mantendo-se o fluxo de calor. A Figura 25 mostra o comportamento da relação entre os padrões de escoamento e o aumento do G , pois, como mencionado anteriormente, conforme a velocidade mássica aumenta, os títulos de vapor diminuem para os mesmos padrões. O mesmo ocorre para os valores de α e de S , já que as velocidades superficiais da fase líquida elevam-se para G maiores.

Como se trata de um canal reduzido ($d_i = 1 \text{ mm}$), as bolhas acabam coalescendo mais rapidamente e tendem a preencher toda a seção transversal do canal, isso ocorre ainda mais com o aumento do fluxo de calor.

Figura 25: Espectros de Frêquência: R600a, $q'' = 40 \frac{kW}{m^2}$ e diferentes G



Fonte: Elaborado pela autora.

Com o aumento das velocidades mássicas os valores de título de vapor são reduzidos, assim como a intensidade do PSD nas frequências características do padrão *churn* (que semelhante à Figura 24b, ocorre numa faixa para valores menores que 10 Hz). Outro fator notável na Figura 25, é que mesmo para títulos baixos, a fração de vazio, α , apresenta valores elevados, mesmo para G mais elevado ($G = 920 \frac{kg}{m^2s}$: Figura 25c - $\alpha = 0,7551$), devido ao padrão, já que no *churn* a área do tubo ocupada pelo vapor é considerável, como se pode observar nas imagens.

4.3 Tratamento de Imagens

Como existem muitos processos de tratamento das imagens e nem sempre o algoritmo consegue criar o conjunto de bordas corretamente, a identificação dos padrões mais desenvolvidos ainda não é possível, isso exigiria uma implementação mais elaborada do código, utilizando técnicas incrementais de análise, dividindo a imagem em pequenas frações e calculando a integral das áreas encontradas, para estimar o volume das bolhas, podendo assim realizar a comparação com a fração de vazio do escoamento.

Na Figura 26 pode-se observar alguns padrões que o algoritmo conseguiu tratar e apre-

sentaram resultados adequados. Para padrões como *slug*, *churn* e anular ondulado, devido às intermitências características desses padrões, a definição das fases não é precisa o suficiente para o algoritmo realizar o reconhecimento.

Figura 26: Ocupação Longitudinal do Canal

	R600a imagens	α_{long} [%]	Padrão
a		21,17%	Bolhas Isoladas
b		22,15%	Bolhas Isoladas
c		17,32%	Bolhas Alongadas
d		20,08%	Bolhas Alongadas
e		22,41%	Bolhas Alongadas

Fonte: Elaborado pela autora.

O fato das Figuras 26a,b apresentarem percentuais de área ocupada maiores (21,17% e 22,15%, respectivamente), mesmo sendo esses padrões de bolhas isoladas, com relação à Figura 26c (17,32%), que é de bolhas alongadas, pode ser explicado devido ao conjunto de imagens que foi tratado, pois a ocorrência de bolhas alongadas pode ocorrer com menos frequência que as bolhas isoladas, fazendo assim com que as imagens mostrem mais bolhas isoladas do que alongadas, justificando a medição de ocupação de área com valores menores para o segundo caso.

Através do tratamento de imagens, foi possível relacionar os padrões de escoamento com o percentual de ocupação longitudinal do canal pela fase vapor (α_{long}). Quanto maior este valor, mais bolhas ou bolsas de vapor podem ser observadas nas imagens. Como se trata de uma análise computacional das imagens registradas pela câmera, a precisão do resultado depende, diretamente, da qualidade da imagem e resolução dos traços dos limites das bolhas, pistões e afins.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os padrões de escoamento resultantes da ebulição do R600a em um micro canal foram identificados e avaliados, levando-se em consideração os sinais lidos pelos sensores de temperatura, pressão, vazão e óptico, assim como as imagens obtidas pela câmera de alta velocidade. Aliado à identificação dos padrões realizada visualmente pelas imagens, os sinais de tensão do SO foram utilizados para uma análise de frequências características de cada padrão, com o intuito de identificar similaridades nos valores de PSD por frequência para cada padrão. Através dos dados dos sensores de pressão, temperatura e vazão foram calculados os valores de título de vapor, fração de vazio e velocidades superficiais das fases.

Diversos padrões foram encontrados nos variados testes realizados, onde foram alterados os valores de velocidade mássica e fluxo de calor. Para os menores G, foram obtidos os maiores títulos de vapor, e todos os padrões de bolhas isoladas, alongadas, *slug*, *churn* e anular foram observados. Enquanto que para os G mais elevados, mesmo quando aplicado um fluxo de calor na ST maior, os títulos foram reduzidos e os padrões predominantemente observados foram intermitentes (*slug* e *churn*) e anular. Outro fator a ser considerado é que as propriedades do fluido influem de modo significativo no desenvolvimento dos padrões, o que explica que mesmo com títulos menores os padrões do R600a tendem a evoluir prematuramente ao anular, principalmente para G mais elevados.

O mapa dos padrões de escoamento do R600a foi elaborado com as transições propostas por Ong e Thome (2011), mas como os fluidos utilizados pelos autores possuíam propriedades muito diferentes das do fluido utilizado nesse trabalho, as curvas não se adequaram para todos os casos avaliados, sendo possível notar que apenas a menor velocidade mássica ($G = 520 \frac{kg}{m^2s}$) avaliada possui dados aderentes ao modelo. Na análise das velocidades superficiais das fases líquido e vapor, observou-se que a velocidade do líquido diminuía, para os padrões intermitentes (*slug* e *churn*) e anular, quando ocorria uma elevação da velocidade do vapor.

Na análise das frequências foi possível notar que existem similaridades nos valores de frequência onde ocorrem os maiores picos de densidade de potência entre os diferentes padrões de escoamento. Na análise das bolhas isoladas, foi possível identificar acúmulo dos valores de PSD nas proximidades da frequência de 15 Hz, mas também com outro pico de potência, menos expressivo, na segunda harmônica desse sinal (30 Hz). O padrão *churn*, por exemplo, possui a densidade de potência espectral acumulada na faixa de frequências iniciada abaixo de 5 Hz e que chega até valores de 10 Hz, sendo que o ponto com mais potência localiza-se próximo de valores de corrente contínua.

O algoritmo criado funcionou de maneira adequada para padrões de bolhas isoladas e bolhas alongadas, já que as fronteiras entre líquido e vapor nesses padrões são bem definidas nas imagens, sendo assim possível de determinar a área longitudinal ocupada pelo vapor. É importante levar em consideração que é uma proposta inicial de algoritmo, que precisa ser aprimorada e testada em mais casos, mas que possui um grande potencial de evolução.

Sendo assim, com os resultados apresentados anteriormente, pode-se considerar que os objetivos, tanto o geral quanto os específicos desse trabalho foram alcançados.

5.1 Sugestão de Trabalhos Futuros

Como continuidade desse trabalho, sugerem-se os seguintes estudos:

- a) Aprimorar o algoritmo de tratamento das imagens, levando em consideração o volume das bolhas, não somente a área, assim como utilizar outra técnica para identificação dos contornos da imagem;
- b) Ajustar o algoritmo para calcular a fração de vazio pelo conceito de área transversal;
- c) Ajustar modelos de curvas de transição no mapa de padrões para os resultados encontrados;
- d) Analisar o sinal da variação de pressão e taxa de massa, complementando a análise do SO;
- e) Realizar o experimento com outros fluidos, como o propano ou o propileno;
- f) Realizar o experimento com velocidades mássicas menores;
- g) Realizar o experimento com fluxos de calor maiores;
- h) Analisar outras configurações de PSD.

REFERÊNCIAS

- BAKER, O. Simultaneous flow of oil and gas. **Oil and Gas Journal**, [S.l.], v. 26, p. 185 – 195, 1954.
- BARNEA, D.; LUNINSKI, Y.; TAITEL, Y. Flow pattern in horizontal and vertical two phase flow in small diameter pipes. **Can. J. Chem. Eng.**, [S.l.], v. 61, p. 617–620, 1983.
- BARRETO, E. X.; OLIVEIRA, J. L. G.; PASSOS, J. C. Frictional pressure drop and void fraction analysis in air-water two-phase flow in a microchannel. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 72, p. 1–10, 2015.
- BHAGWAT, S. M.; GHAJAR, A. J. A flow pattern independent drift flux model based void fraction correlation for a wide range of gas-liquid two phase flow. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 59, p. 186–205, 2014.
- BOLZAN, M. J. A. Análise da transformada em ondas aplicadas em sinal geofísico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S.l.], v. 26, n. 1, p. 37–41, 2009.
- COLLIER, J. G.; THOME, J. R. **Convective Boiling and Condensation**. 3. ed. New York: Oxford Science Publications, 1994. 596 p.
- COSTIGAN, G.; WHALLEY, P. Slug flow regime identification from dynamic void fraction measurements in vertical air-water flows. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 23, n. 2, p. 263–282, 1997.
- DIAS, I. C.; COPETTI, J. B.; OLIVEIRA, J. D. de. Experimental Methods of Flow Pattern Measurement and Analysis - A Review. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIPHASE FLOW, 10., 2019, Rio de Janeiro. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019.
- DONALDSON, A. A.; KIRPALANI, D. M.; MACCHI, A. Curvature induced flow pattern transitions in serpentine mini-channels. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 37, n. 5, p. 429–439, 2011.
- DONG, X. et al. Oil-water two-phase flow velocity measurement with continuous wave ultrasound Doppler. **Chemical Engineering Science**, [S.l.], v. 135, n. 92, p. 155–165, 2015.
- DONG, X. et al. Measuring Oil-Water Two-Phase Flow Velocity with Continuous-Wave Ultrasound Doppler Sensor and Drift-Flux Model. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, [S.l.], v. 65, n. 5, p. 1098–1107, 2016.
- EES. **EES**. [S.l.]: F-Chart Software, 2016.
- ELPERIN, T.; KLOCHKO, M. Flow regime identification in a two-phase flow using wavelet transform. **Experiments in Fluids**, [S.l.], v. 32, n. 6, p. 674–682, 2002.
- HAN, Y. et al. Flow pattern and holdup phenomena of low velocity oil-water flows in a vertical upward small diameter pipe. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, [S.l.], v. 159, n. September, p. 387–408, 2017.
- HANAFIZADEH, P. et al. Experimental identification of flow regimes in gas-liquid two phase flow in a vertical pipe. **Meccanica**, [S.l.], v. 51, n. 8, p. 1771–1782, 2016.

HEATING REFRIGERATING AIR CONDITIONING ENGINEERS, A. S. of (Ed.). **2008 ASHRAE handbook - heating, ventilating, and air-conditioning systems and equipment**. SI Edition. ed. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2008.

JACOBI, A. M.; THOME, J. R. Heat Transfer Model for Evaporation of Elongated Bubble Flows in Microchannels. **Journal of Heat Transfer**, [S.l.], v. 124, n. 6, p. 1131, 2002.

JAWOREK, A.; KRUPA, A. Phase-shift detection for capacitance sensor measuring void fraction in two-phase flow. **Sensors and Actuators, A: Physical**, [S.l.], v. 160, n. 1-2, p. 78–86, 2010.

KANDLIKAR, S. G.; GRANDE, W. J. Evolution of microchannel flow passages-thermohydraulic performance and fabrication technology. **Heat Transfer Engineering**, [S.l.], v. 24, n. 1, p. 3–17, 2003.

KANIZAWA, F. T.; RIBATSKI, G. Void fraction and pressure drop during external upward two-phase crossflow in tube bundles – part I Experimental investigation. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, [S.l.], v. 65, p. 200–209, 2017.

KAWAHARA, A.; CHUNG, P. M. Y.; KAWAJI, M. Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 28, p. 1411–1435, 2002.

KEW, P. A.; CORNWELL, K. Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small-diameter channels. **Applied Thermal Engineering**, [S.l.], v. 17, p. 705–715, 1997.

KLEIN, F. L.; JUNIOR, P. S.; HERVIEU, E. Time-frequency analysis of intermittent two-phase flows in horizontal piping. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, [S.l.], v. 26, n. 2, p. 174–179, 2004.

LATHI, B. P. **Sinais e Sistemas Lineares**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.

LOCKHART, R. W.; MARTINELLI, R. C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. **Chemical Engineering Progress**, [S.l.], v. 45, p. 39–48, 1949.

LU, C. et al. Frictional pressure drop analysis for horizontal and vertical air-water two-phase flows in different pipe sizes. **Nuclear Engineering and Design**, [S.l.], v. 332, n. September 2017, p. 147–161, 2018.

MA, X. et al. Flow pattern identification for two-phase flow in a U-bend and its contiguous straight tubes. **Experimental Thermal and Fluid Science**, [S.l.], v. 93, n. July 2017, p. 218–234, 2018.

MAHVASH, A.; ROSS, A. Two-phase flow pattern identification using continuous hidden Markov model. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 34, n. 3, p. 303–311, 2008.

MANDHANE, J. M.; GREGORY, G. A.; AZIZ, K. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 1, n. 4, p. 537–553, 1974.

- MARIA, L. D.; ROSA, E. S. Void fraction and pressure waves in a transient horizontal slug flow. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 84, p. 229–244, 2016.
- MEHENDALE, S. S.; JACOBI, A. M.; SHAH, R. K. Fluid Flow and Heat Transfer at Micro- and Meso-Scales With Application to Heat Exchanger Design. **Applied Mechanics Reviews**, [S.l.], v. 53, n. 7, p. 175, 2009.
- MISHIMA, K.; ISHII, M. Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes. **Int. J. Heat Mass Transf.**, [S.l.], v. 27, p. 723–737, 1984.
- NGUYEN, V. T.; EUH, D. J.; SONG, C. H. An application of the wavelet analysis technique for the objective discrimination of two-phase flow patterns. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 36, n. 9, p. 755–768, 2010.
- OLIVEIRA, J. D. de. **Análise experimental da ebulição convectiva de hidrocarbonetos em um mini canal de seção circular**. 2017. 201 p. Tese — Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.
- OLIVEIRA, W. R. de et al. Bubble characterization in horizontal air-water intermittent flow. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 69, p. 18–30, 2015.
- ONG, C. L.; THOME, J. R. Flow boiling heat transfer of R134a, R236fa and R245fa in a horizontal 1.030mm circular channel. **Experimental Thermal and Fluid Science**, [S.l.], v. 33, n. 4, p. 651–663, 2009.
- ONG, C. L.; THOME, J. R. Macro-to-microchannel transition in two-phase flow Part 1 - Two-phase flow patterns and film thickness measurements. **Experimental Thermal and Fluid Science**, [S.l.], v. 35, n. 1, p. 37–47, 2011.
- OZAWA, M. et al. Flow pattern and boiling heat transfer of CO₂ in horizontal small-bore tubes. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 35, n. 8, p. 699–709, 2009.
- PARANJAPE, S.; RITCHEY, S. N.; GARIMELLA, S. V. Electrical impedance-based void fraction measurement and flow regime identification in microchannel flows under adiabatic conditions. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 42, p. 175–183, 2012.
- PEIXOTO, R. **Uso de fluidos refrigerantes hidrocarbonetos em refrigeração doméstica, comercial e ar condicionado estacionário**. Disponível em: [http://www.protocolodemontreal.org.br/eficiente/repositorio/Apresentacoes/Seminario Difusao do Uso de Fluidos Refrigerantes/870.pdf](http://www.protocolodemontreal.org.br/eficiente/repositorio/Apresentacoes/Seminario%20Difusao%20do%20Uso%20de%20Fluidos%20Refrigerantes/870.pdf). Data de acesso: 28 jun. 2019.
- PEREIRA, R. d. A. **UMA NOVA METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DO IMPACTO DAS APLICAÇÕES DE REFRIGERAÇÃO RESIDENCIAIS SOBRE O AQUECIMENTO GLOBAL**. 2010. 156 p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Universidade de Brasília, Brasília, 2010.
- PIMENTA, J. Uso de Hidrocarbonetos em Sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado Introdução Considerações quanto à. In: DIFUSÃO DO USO DE FLUIDOS ALTERNATIVOS EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO E AR, 2011, Brasília. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. p. 67.
- REVELLIN, R. et al. Characterization of diabatic two-phase flows in microchannels Flow parameter results for R134a in a 0.5 mm channel. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 32, n. 7, p. 755–774, 2006.

- REVELLIN, R.; THOME, J. R. Adiabatic two-phase frictional pressure drops in microchannels. **Experimental Thermal and Fluid Science**, [S.l.], v. 31, n. 7, p. 673–685, 2007.
- ROUHANI, S. Z.; AXELSSON, E. Calculation of void volume fraction in the subcooled and quality boiling regions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [S.l.], v. 13, n. 2, p. 383–393, 1970.
- RYSAK, A. et al. Investigation of two-phase flow patterns by analysis of Eulerian space-time correlations. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 85, p. 23–37, 2016.
- SCHEMBRI, F.; BUCOLO, M. Periodic input flows tuning nonlinear two-phase dynamics in a snake microchannel. **Microfluidics and Nanofluidics**, [S.l.], v. 11, n. 2, p. 189–197, 2011.
- SHABAN, H.; TAVOULARIS, S. Measurement of gas and liquid flow rates in two-phase pipe flows by the application of machine learning techniques to differential pressure signals. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 67, p. 106–117, 2014.
- SIM, W. G.; BAE, B. M.; MUREITHI, N. W. An experimental study on characteristics of two-phase flows in vertical pipe. **Journal of Mechanical Science and Technology**, [S.l.], v. 24, n. 10, p. 1981–1988, 2010.
- SITU, R. et al. Bubble departure frequency in forced convective subcooled boiling flow. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [S.l.], v. 51, n. 25-26, p. 6268–6282, 2008.
- SONG, C. H.; NO, H. C.; CHUNG, M. K. Investigation of bubble flow developments and its transition based on the instability of void fraction waves. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 21, n. 3, p. 381–404, 1995.
- SULTHANA, S. A. et al. Slug-bubble regime identification in a square channel using a IR Sensor. **MATEC Web of Conferences**, [S.l.], v. 172, p. 1002, 2018.
- SUN, Z.; CHEN, Y.; GONG, H. Classification of gas liquid flow patterns by the norm entropy of wavelet decomposed pressure fluctuations across a bluff body. **Measurement Science and Technology**, [S.l.], v. 23, n. 12, 2012.
- TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. **AIChE Journal**, [S.l.], v. 22, n. 1, p. 47–55, 1976.
- TALLEY, J. D.; WOROSZ, T.; KIM, S. Characterization of horizontal air–water two-phase flow in a round pipe part II Measurement of local two-phase parameters in bubbly flow. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 76, p. 223–236, 2015.
- THOMAS EDISON, A. **Brainyquote**. Disponível em: https://www.brainyquote.com/quotes/thomas_a_edison_132683. Data de acesso: 09 jun. 2020.
- VIOLA, E. O regime internacional de mudança climática e o Brasil. **RBCS**, [S.l.], v. 17, n. 50, p. 25–179, 2002.
- WANG, S.; SHOJI, M. Fluctuation characteristics of two-phase flow splitting at a vertical impacting T-junction. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 28, n. 12, p. 2007–2016, 2002.

WOJTAN, L.; URSENBACHER, T.; THOME, J. R. Investigation of flow boiling in horizontal tubes Part I - A new diabatic two-phase flow pattern map. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [S.l.], v. 48, n. 14, p. 2955–2969, 2005.

YANG, C. Y.; SHIEH, C. C. Flow pattern of air-water and two-phase R-134a in small circular tubes. **International Journal of Multiphase Flow**, [S.l.], v. 27, n. 7, p. 1163–1177, 2001.

ZUKAUSKAS, A.; ULINSKAS, R. Banks of plain and finned tubes. In: **Heat exchanger design handbook 2 - fluid mechanics and heat transfer**. [S.l.]: Hemisphere Publishing Corporation, 1983.

APÊNDICE A – CÓDIGO DE TRATAMENTO DAS IMAGENS

```

import cv2
import numpy as np
import sys

import random as rng

#####
rng.seed(12345)
kernel = np.ones((4,4),np.uint8)

#####
def getAddress():
if len(sys.argv) < 2:
print "USAGE:"
print "python main.py address_to_picture.jpg"
print ""
return "NO ADDRESS GIVEN IN ARGUMENT"
return str(sys.argv[1])

#####
def warpImage(sample):
sampleGray = cv2.cvtColor(sample, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
sampleGrayBlurred = cv2.GaussianBlur(sampleGray, (5,5), 0)

sampleBinaryBlurredInv = cv2.adaptiveThreshold(sampleGrayBlurred, 255,
cv2.ADAPTIVE_THRESH_GAUSSIAN_C, \
cv2.THRESH_BINARY_INV, 11, 2)
lines = cv2.HoughLinesP(sampleBinaryBlurredInv, 1, np.pi/180, 100, 10, 10)

leftUp = 0
rightUp = 0
leftDown = sample.shape[0]
rightDown = sample.shape[0]

for x1,y1,x2,y2 in lines[:,0]:
if x1==0:
if y1 > sample.shape[0]/2:

```

```

if y1 < leftDown:
    leftDown = y1
else:
    if y1 > leftUp:
        leftUp = y1
    if x2==sample.shape[1]-1:
    if y2 > sample.shape[0]/2:
    if y2 < rightDown:
        rightDown = y2
    else:
        if y2 > rightUp:
            rightUp = y2

leftUp += 8
rightUp += 8
leftDown -= 8
rightDown -= 8

pts1 = np.float32([
    [0,leftUp],
    [sample.shape[1]-1, rightUp],
    [0,leftDown],
    [sample.shape[1]-1, rightDown]])
pts2 = np.float32([
    [0,0],
    [sample.shape[1]-1,0],
    [0,sample.shape[0]-1],
    [sample.shape[1]-1,sample.shape[0]-1]])

M = cv2.getPerspectiveTransform(pts1,pts2)
sampleWarped = cv2.warpPerspective(sample,M,(sample.shape[1],
sample.shape[0]))
return sampleWarped

#####
def getHullContours(warpImage):
    sampleWarpedGray = cv2.cvtColor(warpImage, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    sampleWarpedGrayBlurred = cv2.GaussianBlur(sampleWarpedGray,(3,3),0)

```

```

sampleWarpedBinaryBlurred = cv2.adaptiveThreshold(
sampleWarpedGrayBlurred,255,cv2.ADAPTIVE_THRESH_GAUSSIAN_C,\
    cv2.THRESH_BINARY,19,2)

sampleWarpedBinaryBlurredDilated = cv2.dilate(
sampleWarpedBinaryBlurred, kernel, iterations=1)
sampleWarpedBinaryBlurredClosed = cv2.erode(
sampleWarpedBinaryBlurredDilated, kernel, iterations=1)
threshold = 30
sampleEdges = cv2.Canny(sampleWarpedBinaryBlurredDilated,threshold,
threshold*2,apertureSize = 3)

_, contours, _ = cv2.findContours(sampleEdges, cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
# Find the convex hull object for each contour
hullList = []
for i in range(len(contours)):
hull = cv2.convexHull(contours[i])
hullList.append(hull)
# Draw contours + hull results
drawing = np.zeros((sampleEdges.shape[0], sampleEdges.shape[1], 1),
dtype=np.uint8)
for i in range(len(contours)):
color = (0,0,255)#(rng.randint(0,256), rng.randint(0,256),
rng.randint(0,256))
#cv2.drawContours(drawing, contours, i, color)
cv2.drawContours(drawing, hullList, i, color)

cv2.fillPoly(drawing, hullList, 255, 0)

_, contours, _ = cv2.findContours(drawing, cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

#print contours

drawing = np.zeros((sampleEdges.shape[0], sampleEdges.shape[1], 1),
dtype=np.uint8)
for i in range(len(contours)):
color = (255,0,0)#(rng.randint(0,256), rng.randint(0,256),

```

```

rng.randint(0,256)
#cv2.drawContours(drawing, contours, i, color)
cv2.drawContours(warpImage, contours, i, color)

#cv2.imshow("sampleWarpedBinaryBlurred", sampleWarpedBinaryBlurred)
#cv2.imshow("sampleEdges", sampleEdges)
#cv2.imshow("drawing", drawing)
#cv2.imshow("sampleWarpedBinaryBlurredClosed",
sampleWarpedBinaryBlurredClosed)

return contours

#####
def computeVoidFraction(sampleWarped, hullList):
void_area=0
for hull in hullList:
void_area+=cv2.contourArea(hull)

voidFraction = void_area/(sampleWarped.shape[0]*
sampleWarped.shape[1])
return voidFraction

#####
if __name__ == '__main__':
    mypath = getAddress()
#onlyfiles = [f for f in listdir(mypath) if isfile(join(
mypath, f))]
#onlyfiles.sort(key=lambda f: int(filter(str.isdigit, f)))

sample = cv2.imread(mypath) #/home/wolf/Pictures/G900q1k_001/
Y4 Camera000002.jpg
sampleWarped = warpImage(sample)
hullList = getHullContours(sampleWarped)
voidFraction = computeVoidFraction(sampleWarped, hullList)
print voidFraction

cv2.imshow("sampleWarped", sampleWarped)
cv2.imwrite("sample.jpg", sampleWarped)
cv2.waitKey()

```

APÊNDICE B – SCRIPT MATLAB PARA CÁLCULO DA FFT E PSD

```

prop = %%% dados NI cDAQ-9171 %%%

sigg = prop-mean(prop); %%% Sinal menos a sua média %%%
sig = sigg(1:2^(floor(log2(length(sigg))))); %%% Redução sinal a um
comprimento de uma potência de 2 %%%
fs = 1000; %%% Frequência de aquisição sinal pelo NI cDAQ-9171 %%%
L =length(sig);
f = fs*(1:L)/(1*L);
x_range=200;

F = fft(sig);
PSD = F.*conj(F)/(1*L);

[pxx,ff]=pwelch(sig,[],[],[],fs);
PSD_norm = pxx/max(pxx);

figure(1);
subplot(1,1,1);
stem(f(5:x_range),PSD_norm(5:x_range));
title('PSD normalizado da FFT')
xlabel('f [Hz]','FontSize',12,'FontName','Times New Roman',
'FontWeight','bold','Color','k')
ylabel('PSD [W Hz^{-1}]','FontSize',12,'FontName',
'Times New Roman','FontWeight','bold','Color','k')

```