

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

GUILHERME HENRIQUE DE SENA E OLIVEIRA

Análise de perda de carga e padrão de escoamento para canal retangular de
dimensões reduzidas

São Carlos

2017

GUILHERME HENRIQUE DE SENA E OLIVEIRA

Análise de perda de carga e padrão de escoamento para canal retangular de
dimensões reduzidas

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Mecânica, da Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Gherardt Rhibatski

São Carlos

2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Oliveira, Guilherme Henrique de Sena e
O953a
Análise de perda de carga e padrão de escoamento
para canal retangular de dimensões reduzidas /
Guilherme Henrique de Sena e Oliveira; orientador
Gherardt Rhibatski; coorientador Fernando Guimarães
Aguiar. São Carlos, 2017.
Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2017.
1. Padrão de escoamento. 2. Escoamento bifásico. 3.
Perda de pressão. 4. Instrumentação. 5. Análise de
Sinais. I. Título.

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato: GUILHERME HENRIQUE DE SENA E OLIVEIRA


Título: Análise de perda de carga e padrão de escoamento para canal retangular de dimensões reduzidas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecatrônica.

BANCA EXAMINADORA


Professor Doutor Gherardt Ribatski
(Orientador)

Nota atribuída: 10 (DEZ)


(assinatura)

Professora Doutor Fernando Guimarães Aguiar

Nota atribuída: 10 (Dez)


(assinatura)

Professor Doutor Luben Cabezas Gómez

Nota atribuída: 10 (Dez)


(assinatura)


Média: 10 (DEZ)

Resultado: APROVADO

Data: 11/12/2017

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM NÃO Visto do orientador



RESUMO

Oliveira, G. H. S. **Título: Análise de perda de carga e padrão de escoamento para canal retangular de dimensões reduzidas.** 2017. 198 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Este trabalho objetivou estudar um escoamento de uma mistura de água e ar através de um duto retangular de pequenas dimensões. Para a realização do experimento, foram bombeadas quantidades medidas de água e ar em um duto em uma bancada, onde foram fotografados os padrões de escoamento, medidos os gradientes de pressão entre a entrada e a saída com um manômetro diferencial, e, com o auxílio de um laser, mediu-se a frequência de passagem de bolhas. A partir dos experimentos, criou-se curvas para a queda de pressão comparada com o que se esperaria de métodos de previsão da literatura, um mapa que relaciona as vazões de água e ar com os padrões de escoamento observados, e verificou-se a possibilidade de utilizar a frequência de formação de bolhas medida com o laser para determinar o padrão do escoamento bifásico. O experimento conseguiu resultados bons para o mapa de padrões e para os gradientes de pressão, e mostrou que a análise da correlação cruzada de frequência de formação de bolhas pode vir a ser uma ferramenta útil para a determinação de padrões de escoamento, mostrando o resultado correto em 3 dos 4 casos analisados.

Palavras-chave: Padrão de escoamento. Escoamento bifásico. Perda de pressão. Instrumentação. Análise de sinais.

ABSTRACT

Oliveira, G. H. S. **Title: Pressure drop and flow pattern analysis for a small-sized rectangular duct.** 2017. 198 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

This work sought to study a two-phase flow of water and air through a small sized rectangular duct. For the experiment, known measures of water and air were pumped through a duct in a stand, where pictures of the flow patterns were taken, the pressure drops between entering and leaving the duct were measured with a differential pressure transducer and, with a laser device, the frequency of bubble formation was measured. From the results of the experiments, curves were drawn and compared with results from methods from literature, a flow-type chart relating flows of water and air was created, and the use of the bubble formation frequency measured with the laser for determining the flow pattern was verified. The experiments got good results for both the chart of flows and the pressure drops, and showed that the bubble formation frequency can be a useful tool for determining the flow pattern, having shown correct results in 3 of 4 cases.

Keywords: Flow pattern. Two-phase flow. Pressure drop. Instrumentation. Signal analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ilustração dos padrões de escoamento para escoamento (a) vertical e (b) horizontal, segundo Cheng et al. (2008).....	19
Figura 2 – Sinal adquirido e pós-processado por Du et al. (2012).....	24
Figura 3 – Esquemático do posicionamento dos sensores na bancada de testes.	26
Figura 4 – Curva de calibração do transdutor diferencial.	29
Figura 5 – Queda de pressão monofásica para inclinações de 0°, 15°, 30° e 45° pelo número de Reynolds do escoamento.	29
Figura 6 – Queda de pressão dos experimentos realizados, dos resultados obtidos por Loyola (2015) e as correlações de Çengel e Hagen.	30
Figura 7 – Comparação dos resultados obtidos neste experimento com os obtidos por Loyola.....	31
Figura 8 – Esquema de montagem do sistema receptor de laser e do canal de testes.....	32
Figura 9 – Função f(t).....	34
Figura 10 – FFT da função f (t).	34
Figura 11 – Transformada de Gabor de f(t) para $\alpha=0,1$	35
Figura 12 – Transformada de Gabor de f(t) para $\alpha=1,0$	35
Figura 13 – Transformada de Gabor de f(t) para $\alpha=5,0$	36
Figura 14 – Transformada de Gabor de f(t) para $\alpha=10$	36
Figura 15 – Queda de pressão para 142 kg/m ² s em função da velocidade superficial do ar.	38
Figura 16 – Queda de pressão para 244 kg/m ² s em função da velocidade superficial do ar.	39
Figura 17 – Queda de pressão para 447 kg/m ² s em função da velocidade superficial do ar.	39
Figura 18 – Queda de pressão para 651 kg/m ² s em função da velocidade superficial do ar.	40
Figura 19 – Foto lateral de escoamento com bolhas dispersas.....	41
Figura 20 – Foto superior de escoamento com bolhas dispersas.	41
Figura 21 – Foto lateral de escoamento com bolhas alongadas.	41
Figura 22 – Foto superior de escoamento com bolhas alongadas.	42
Figura 23 – Foto lateral de escoamento ondulado.	42
Figura 24 – Foto superior de escoamento ondulado.	42
Figura 25 – Foto lateral de escoamento pistonado.....	42
Figura 26 – Foto superior de escoamento pistonado.....	43
Figura 27 – Mapa dos padrões de escoamento em função da velocidade mássica de água e velocidade da fase de ar.	43

Figura 28 – Sinais originais do laser de escoamentos do padrão bolhas dispersas, com as vazões (a) 447 kg/m ² s de água e 0,017 m/s de ar, (b) 447 kg/m ² s de água e 0,034 m/s de ar, (c) 651 kg/m ² s de água e 0,017 m/s de ar e (d) 651 kg/m ² s de água e 0,052 m/s de ar.....	45
Figura 29 – Gráficos das transformadas de Gabor para escoamentos do padrão bolhas dispersas, com vazões de (a) 447 kg/m ² s de água e 0,017 m/s de ar, (b) 447 kg/m ² s de água e 0,034 m/s de ar, (c) 651 kg/m ² s de água e 0,017 m/s de ar e (d) 651 kg/m ² s de água e 0,052 m/s de ar.	46
Figura 30 – Sinais originais do laser de escoamentos do padrão bolhas alongadas, com as vazões (a) 142 kg/m ² s de água e 0,043 m/s de ar, (b) 447 kg/m ² s de água e 0,051 m/s de ar, (c) 447 kg/m ² s de água e 0,068 m/s de ar e (d) 651 kg/m ² s de água e 0,085 m/s de ar.....	47
Figura 31 – Gráficos das transformadas de Gabor para escoamentos do padrão bolhas alongadas, com vazões de (a) 142 kg/m ² s de água e 0,043 m/s de ar, (b) 447 kg/m ² s de água e 0,051 m/s de ar, (c) 447 kg/m ² s de água e 0,068 m/s de ar e (d) 651 kg/m ² s de água e 0,085 m/s de ar.	48
Figura 32 – Sinais originais do laser de escoamentos do padrão pistonado, com as vazões (a) 142 kg/m ² s de água e 0,051 m/s de ar, (b) 244 kg/m ² s de água e 0,085 m/s de ar, (c) 244 kg/m ² s de água e 0,137 m/s de ar e (d) 651 kg/m ² s de água e 0,188 m/s de ar.....	49
Figura 33 – Gráficos das transformadas de Gabor para escoamentos do padrão pistonado, com vazões de (a) 142 kg/m ² s de água e 0,051 m/s de ar, (b) 244 kg/m ² s de água e 0,085 m/s de ar, (c) 244 kg/m ² s de água e 0,137 m/s de ar e (d) 651 kg/m ² s de água e 0,188 m/s de ar.	50
Figura 34 – Sinais originais do laser de escoamentos do padrão ondulado, com vazões de (a) 142 kg/m ² s de água e 0,222 m/s de ar, (b) 142 kg/m ² s de água e 0,256 m/s de ar, (c) 244 kg/m ² s de água e 0,256 m/s de ar e (d) 244 kg/m ² s de água e 0,291 m/s de ar.....	51
Figura 35 – Gráficos das transformadas de Gabor para escoamentos do padrão ondulado, com vazões de (a) 142 kg/m ² s de água e 0,222 m/s de ar, (b) 142 kg/m ² s de água e 0,256 m/s de ar, (c) 244 kg/m ² s de água e 0,256 m/s de ar e (d) 244 kg/m ² s de água e 0,291 m/s de ar.	52
Figura 36 – Gráficos das correlações do filtro do padrão bolhas dispersas com escoamentos das vazões (a) 447 kg/m ² s e 0,034 m/s (b) 142 kg/m ² s e 0,043 m/s (c) 244 kg/m ² s e 0,085 m/s (d) 244 kg/ m ² s e 0,291 m/s.....	54
Figura 37 – Gráficos das correlações do filtro do padrão bolhas alongadas com escoamentos das vazões (a) 447 kg/m ² s e 0,034 m/s (b) 142 kg/m ² s e 0,043 m/s (c) 244 kg/m ² s e 0,085 m/s (d) 244 kg/s e 0,291 m/s.	55
Figura 38 – Gráficos das correlações do filtro do padrão pistonado com escoamentos das vazões (a) 447 kg/m ² s e 0,034 m/s (b) 142 kg/m ² s e 0,043 m/s (c) 244 kg/m ² s e 0,085 m/s (d) 244 kg/ m ² s e 0,291 m/s.....	56
Figura 39 – Gráficos das correlações do filtro do padrão ondulado com escoamentos das vazões (a) 447 kg/m ² s e 0,034 m/s (b) 142 kg/m ² s e 0,043 m/s (c) 244 kg/m ² s e 0,085 m/s (d) 244 kg/ m ² s e 0,291 m/s.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

Dh	Diâmetro hidráulico [m]
G	Velocidade mássica [kg/m ² .s]
μ	Viscosidade [kg/m.s]
ρ	Densidade [kg/m ³]
f	Frequência [Hz]
Δp	Queda de pressão [Pa]
$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)$	Queda de pressão total por unidade de comprimento [Pa/m]
Re	Número de Reynolds
x	Título da fase gasosa
J _G	Velocidade do ar

Subscritos:

z: na direção do escoamento

g: gravitacional

fr: friccional

TP: duas fases

G: fase gasosa

L: fase líquida

SUMÁRIO

1. Introdução	16
1.1. Objetivos	17
2. Revisão Bibliográfica	18
2.1. Padrões de escoamento bifásico (líquido-gás)	18
2.2. Perda de carga em escoamento bifásico	19
2.3. Determinação de padrões de escoamento	22
2.4. Análise tempo-frequência	23
3. Metodologia	26
3.1. Calibração dos sistemas de medição	28
3.1.1. Queda de pressão em escoamento monofásico	29
3.1.2. Padrões de escoamento avaliados	31
3.2. Pós-processamento dos sinais do <i>laser</i>	32
4. Resultados e Discussão	38
4.1. Padrões de escoamento observados experimentalmente	40
4.2. Análise tempo-frequência	43
5. Conclusão	60
6. Referências Bibliográficas	62

1. Introdução

Um escoamento multifásico pode ser definido como aquele em que há dois ou mais fluidos em movimento simultâneo no mesmo canal (GHIAASIAAN, 2008). Esses dois fluidos podem se diferenciar tanto pelo estado termodinâmico (se encontrando em fase gasosa, líquida ou sólida), como por sua composição química, como é o caso de um escoamento de ar e água, ou petróleo e gás. Além disso, essas diferenciações por fase ou composição química podem ocorrer durante o escoamento, como ocorre quando há criação de vapor em um sistema de arrefecimento.

A partir da metade do século XX, houve um aumento no interesse do estudo de escoamentos bifásicos, motivado especialmente pelo desenvolvimento de reatores nucleares, sendo que quase todo estudo realizado acerca desses escoamentos antes desse momento era empírico.

Atualmente, além do uso de reatores nucleares, diversos processos em engenharia se beneficiam desse estudo. Podemos citar, por exemplo, o uso de escoamentos bifásicos na indústria siderúrgica, trocadores de calor com mudança de fase, sistemas frigoríficos, sistemas de pulverização, transporte de gás e petróleo, destiladores, sistemas de potência, e até em sistemas biológicos, como correntes sanguíneas.

Apesar de haver uma boa quantidade de estudos envolvendo escoamentos bifásicos, esses estudos esbarram na alta complexidade dos fenômenos físicos envolvidos nesses escoamentos. Enquanto escoamentos monofásicos dependem de características do fluido, como viscosidade, temperatura e velocidades, e da geometria do canal onde ocorre o escoamento, os escoamentos bifásicos dependem muito também da forma assumida pelas duas fases. Por essa razão, embora simulações numéricas tenham tido grandes evoluções, o estudo de escoamentos bifásicos ainda é altamente empírico.

A forma assumida pelo escoamento, normalmente referida como “padrão de escoamento”, refere-se aos padrões assumidos em movimento relativo entre o gás e o líquido. Tal determinação é complexa dependendo das viscosidades, temperaturas, velocidades, vazões e inclinação do canal com relação à ação da gravidade, molhabilidade e outros. Destaca-se que o padrão de escoamento tem alta influência na perda de pressão do escoamento, bem como na transferência de calor e por isso é de grande interesse a capacidade

de estimar e avaliar o padrão de um determinado escoamento, no intuito de criar sistemas mais eficientes para troca de calor.

Por sua vez, temos canais com área transversal reduzida ($D_h < 10\text{mm}$), de aplicações comuns na indústria atual, seja para escoamentos monofásicos, como em pequenos tubos em trocadores de calor, ou bifásicos, como é o caso de tubos capilares em refrigeradores e o de sangue correndo em artérias. Portanto, tem sido alvo de estudos, como o de Zhai (2015) e Choi (2011).

Na área de mecânica dos fluidos e transferência de calor, em que a maioria dos fenômenos não são observáveis a olho nu, por ser muito pequeno ou muito rápido, o uso de aparelhos eletrônicos para obtenção de dados é cada vez mais comum para o entendimento dos fenômenos. Quando se há obtenção de dados por aparelhos eletrônicos, é importante também que haja uma interpretação correta desses dados, o que nem sempre é simples, visto que o sinal pode se mostrar de difícil visualização dependendo da complexidade do processo. Por essa razão, é importante também que haja um processamento adequado dos dados, o que se torna uma parte fundamental do estudo.

Neste contexto, o presente trabalho se insere, realizando um estudo empírico de um escoamento bifásico água-ar em canais de dimensões reduzidas.

1.1. Objetivos

O presente trabalho objetiva uma análise de padrões de escoamento em um canal de diâmetro reduzido retangular de 6,0 por 6,5 mm em acrílico, para escoamento bifásico adiabático água-ar, avaliando os critérios de transição entre padrões de escoamento e a perda de pressão.

Ainda, objetiva-se desenvolver uma metodologia não intrusiva para determinação dos padrões de escoamento, a partir da análise de sinais no domínio do tempo, frequência e tempo-frequência de um laser perpendicular ao escoamento.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Padrões de escoamento bifásico (líquido-gás)

Vale destacar que a forma visível relativa entre dois fluidos em um escoamento bifásico é comumente chamada de padrão de escoamento. O padrão de escoamento pode ser definido tanto por características dos fluidos e do escoamento (viscosidade, velocidade e vazão) como por características do canal, (tamanho geometria e orientação com relação à gravidade).

Para a classificação de um canal considerando a dimensão, deve-se considerar o seu diâmetro hidráulico (D_h). De acordo com Ghiaasiaan (2008), para $D_h < 3\text{mm}$, tem-se um microcanal; para $3\text{mm} < D_h < 10\text{mm}$, o canal é considerado de dimensões reduzidas, enquanto $10\text{mm} < D_h < 100\text{mm}$ é considerado um canal convencional.

Deve-se ressaltar que a inclinação do canal pode alterar significativamente o padrão de escoamento para uma mesma vazão dos fluidos. Em um escoamento horizontal há uma tendência de a fase de menor densidade se acumular na parte superior da canal, o que não ocorre em um escoamento vertical. Por essa razão, há padrões que só são observados em canais verticais e outros que só ocorrem em horizontais.

As definições desses padrões também são passíveis de variação conforme o estudo. Simpson et al. (1977) relatou 84 padrões distintos, por exemplo. No entanto, embora hajam inúmeras classificações é possível também distinguir os escoamentos em apenas alguns pequenos grupos. Cheng et al. (2008) classificou os escoamentos em 6 padrões escoamentos verticais (bolhas dispersas, bolhas alongadas, pistonado, anulado, anulado agitado e névoa) e 7 para horizontais (estratificado, estratificado ondulado, pistonado, bolhas alongadas, bolhas dispersas, anular e névoa)¹, tal como apresentado na Figura 1.

¹ Adota-se a seguinte tradução para os termos em inglês: *stratified* (estratificado); *wavy* (ondulado); *plug* (bolhas alongadas); *slug* (pistonado); *dispersed bubbles*(bolhas dispersas); *annular* (anular); *mist* (névoa).

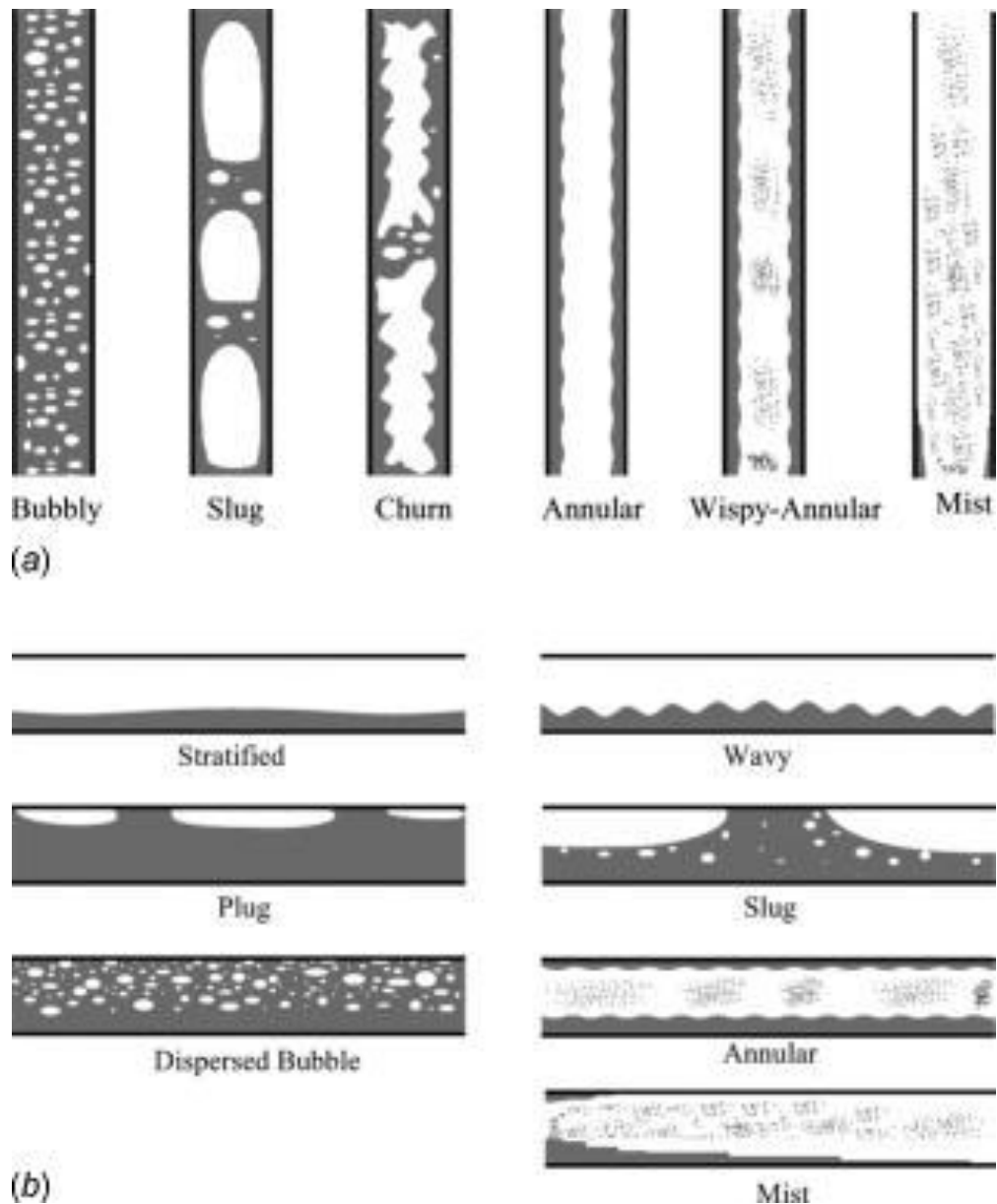


Figura 1 – Ilustração dos padrões de escoamento para escoamento (a) vertical e (b) horizontal, segundo Cheng et al. (2008).

2.2. Perda de carga em escoamento bifásico

A perda de carga em um escoamento bifásico pode ser analisada usando-se, por exemplo, a conservação de quantidade de movimento. Neste caso, considera-se que a criação de momentum pelo fluxo se equilibra com as forças que agem contra esse escoamento.

De acordo com Collier (1994), variação de pressão total pode ser descrita em função de três componentes que agem sobre escoamentos adiabáticos com equilíbrio termodinâmico entre as fases: forças gravitacionais, forças de cisalhamento da parede, e forças interfaciais entre as fases, tal como apresentado pela Equação (1).

$$\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right) = \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_g + \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_a + \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_{fr} \quad (1)$$

Onde $\frac{\partial P}{\partial z}$ é a queda de pressão total por unidade de comprimento do duto, $\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_g$ a variação de pressão por efeito da gravidade, $\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_a$ representa o gradiente de pressão aceleracionais e $\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_{fr}$ o gradiente de pressão devido à fricção do escoamento com a parede.

Ainda, destaca-se que o escoamento ocorre no canal na direção “z”.

Para analisar a perda de carga em um escoamento bifásico tem-se diversos modelos disponíveis na literatura. Dentre os modelos, destaca-se o de mistura homogênea (HM – acrônimo do inglês *homogeneous mixture*), em que se assume que as duas fases entram em equilíbrio e o escoamento age como se fosse quase monofásico. Tal modelo funciona razoavelmente bem para escoamentos bem misturados, como é o caso de um escoamento de bolhas dispersas ou névoa vertical. Para outros padrões, no entanto, ele apresenta erros significativos.

No modelo homogêneo, o gradiente de pressão por fricção podem ser estimadas pela Equação (2).

$$\left(-\frac{\partial P}{\partial z}\right)_{fr} = \frac{2f_{TP}G^2}{D_h\rho_{TP}} \quad (2)$$

Onde G é a velocidade mássica (vazão mássica total do escoamento dividida pela área do canal), ρ_{TP} é a densidade das duas fases, e f_{TP} o fator de atrito de *Fanning* das duas fases.

G é determinado somando-se as vazões mássicas de gás e líquido, D_h tem um valor definido como 4 vezes a área sobre o perímetro, tal como expresso na Equação(3).

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (3)$$

Para determinar ρ_{TP} pode-se utilizar a Equação (4).

$$\rho_{TP} = \left(\frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L}\right)^{-1} \quad (4)$$

Sendo x o título de gás da mistura (a fração de massa do gás na mistura), ρ_L e ρ_G são as densidades do líquido e do gás respectivamente.

Já f_{TP} pode ser o valor definido pela Equação de Blasius (5).

$$f_{TP} = 0,079 \text{Re}_{TP}^{-0,25} \quad (5)$$

Onde Re_{TP} é o número de reynolds das duas fases, definido pela Equação (6).

$$\text{Re}_{TP} = \frac{GD_h}{\mu_{TP}} \quad (6)$$

E μ_{TP} é a viscosidade da mistura, definida de forma análoga a ρ_{TP} , a Equação (7).

$$\mu_{TP} = \left(\frac{x}{\mu_G} + \frac{1-x}{\mu_L} \right)^{-1} \quad (7)$$

Como as variáveis se mantêm constantes para cada escoamento, temos a Equação (8) para queda de pressão.

$$\Delta p = \int_0^L \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)_{fr} dz = \frac{2f_{TP}G^2}{D_h\rho_{TP}} L \quad (8)$$

Sendo L o comprimento do canal de seção constante em que ocorrerá a medição de queda de pressão.

Para casos em que o modelo homogêneo não se aplica, foram criados modelos separados, capazes de medir as quedas de pressão de cada fase usando multiplicadores de fluxo para as duas fases (Φ^2).

De acordo com esse método, a queda de pressão de cada fase é dada pela Equação (9):

$$\Delta p = \frac{2f_{TP}G^2}{D_h\rho_{TP}} L \frac{1}{x} \int_0^x \Phi^2 dx \quad (9)$$

O primeiro método foi a correlação de Lockhart-Martinelli (Lockhart e Martinelli, 1949), baseado em um modelo que posteriormente mostrou-se impreciso depois, de forma que é considerado um método empírico hoje. Além dessa, podemos citar as correlações de Martinelli-Nelson (1948), Thom (1964) e Baroczy (1965), entre outras. Cada uma dessas correlações provê uma forma distinta de encontrar os valores de Φ^2 baseado nos valores de título da fase gasosa e da pressão dessa fase durante o escoamento.

2.3. Determinação de padrões de escoamento

Como o padrão de um escoamento bifásico se relaciona diretamente com a perda de pressão e a transferência de calor é de grande interesse determinar o padrão de escoamento. Em aplicações industriais, é comum que aconteçam variações nas vazões de um escoamento bifásico, de forma que os padrões de escoamento sejam alterados ao longo do tempo e em diferentes posições longitudinais. Por essa razão, é interessante que haja formas de detectar sempre o padrão vigente. No caso de um escoamento em tubos opacos, ou em grandes velocidades, essa determinação pode se mostrar muito difícil e há diversos estudos envolvendo métodos de determinação para esses padrões.

Um método comum é a criação de gráficos que relacionam as vazões de gás e líquidos e dividem os padrões de escoamentos em regiões, como é o caso do mapa de regime de Baker (1954), que avalia as vazões mássicas, e o de Mandhane (1974), que analisa as velocidades, ambos para escoamentos horizontais.

Para fins industriais, no entanto, esses mapas podem não se mostrar tão úteis, visto que são feitos para escoamentos envolvendo determinados fluidos em canais específicos a uma inclinação também específica, além de que nem sempre a indústria saberia dizer com quais vazões e velocidades está trabalhando. Por isso, muitas vezes se faz necessários o uso de tecnologias intrusivas para determinação do padrão de escoamentos. O trabalho de G. Monni et al. (2014), por exemplo, usou uma malha de fios capazes de ler a concentração de ar e água em escoamentos em dutos horizontais à partir da condução gerada por cada fase e assim classificar o escoamento analisado.

É comum o uso de sensores eletrônicos para medição de fração de vazio, definida como a razão entre o volume de gás e o volume total do escoamento em um determinado

comprimento do tubo, para a determinação de padrões de escoamentos. Selegheim et al.(1999) sugeriu o uso de redes neurais para analisar o escoamento a partir da análise de sinais de uma sonda sensível à passagem de água e ar no canal, enquanto Duarte e Prata (2002) sugeriram o uso de sensores capacitivos para determinar a fração de vazio do escoamento. Guilizzoni (2012) propôs o uso de sensores capacitivos para determinar as densidades das fases e determinar os padrões a partir disso.

O uso de sensores intrusivos, embora traga resultados confiáveis, tem o problema de os sensores precisarem estar em contato com os fluidos, de forma a alterar o padrão de escoamento previamente estabelecido.

No intuito de criar métodos que não tenham o mesmo problema, foram propostos métodos não-intrusivos. É o caso de Massignam (2007) e Dong (2014), que estudaram o uso de um ultra-som para visualizar escoamentos em tubos, e Zhao (2013) que propôs o uso de um densitômetro gamma em tubos transparentes para determinar a fração de vazio e o padrão de escoamento.

2.4. Análise tempo-frequência

Na área de ciências térmica e mecânica dos fluidos, é comum a obtenção de dados experimentais para explicar determinados fenômenos. Porém, algumas vezes esses dados não são suficientes para apresentar informações relevantes por si só, de forma que é necessário realizar uma análise numérica de pós-processamento do sinal, para um resultado satisfatório.

No caso de escoamentos bifásicos, para que se faça um estudo da interação das fases, é possível fazer uso de uma análise de tempo-frequência da passagem de ar ou água no escoamento para caracterizá-lo. É o caso dos estudos de Li (2013), que estuda os espectros de frequência em escoamentos ascendentes, e Du et al. (2012), que fez um estudo no tempo-frequência de um escoamento bifásico usando um sensor VMEA (acrônimo do inglês *vertical multiple electrode array*), que consiste em múltiplos sensores eletrônicos instalados em um tubo vertical capazes de ler as vazões volumétricas de cada fase e os padrões de escoamento. Este estudo comparou análises usando a distribuição Wigner-Ville, a qual consiste em uma distribuição para o sinal, capaz de ler as distribuições de frequências do sinal, a distribuição de Choi-Williams, que consiste em um filtro para Wigner Ville, anulando distúrbios indesejados no sinal, e AOK TFR (acrônimo do inglês *alternative optimal kernel time-frequency representation*), uma adaptação das distribuições obtidas anteriormente capaz de

tornar a resolução do tempo frequência satisfatória para qualquer tipo de sinal. Seus resultados estão demonstrados na Figura 2.

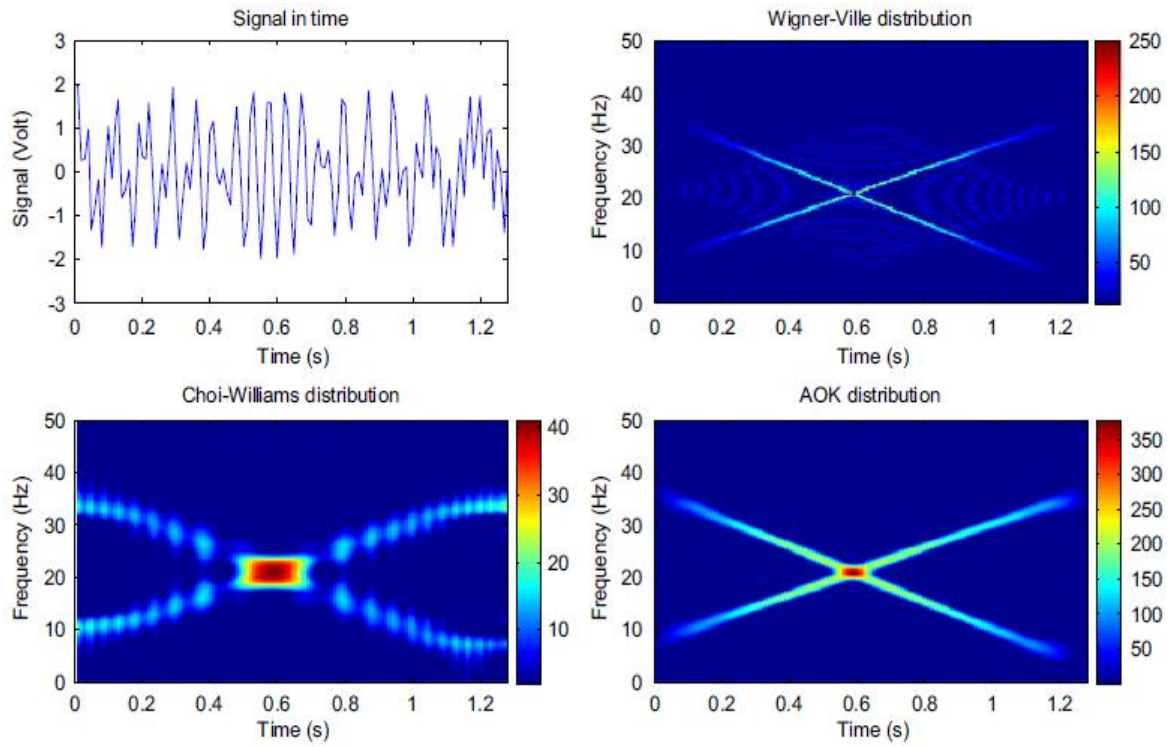


Figura 2 – Sinal adquirido e pós-processado por Du et al. (2012).

3. Metodologia

Para a realização de ensaios experimentais foi utilizado uma bancada experimental projetada e construída por Loyola (2015), com algumas alterações na seção experimental, composta por um canal de perfil retangular com seção transversal de 6,0 mm por 6,5 mm por 960 mm de comprimento total. Na seção podem escoar água destilada e ar a diferentes vazões, propiciando a observação de diferentes padrões de escoamento, quedas de pressão e frequência de escoamento de bolhas. A Figura 3 mostra um esquema de como a bancada de testes estava montada.

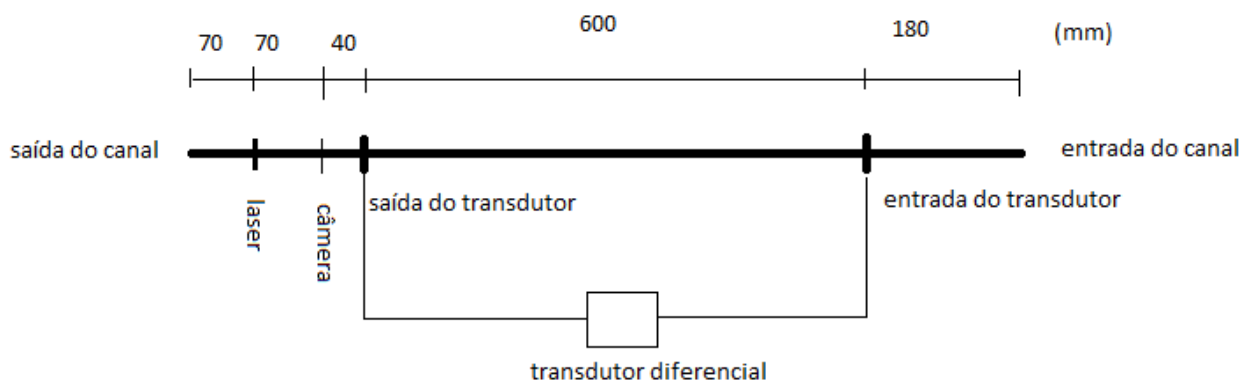


Figura 3 – Esquemático do posicionamento dos sensores na bancada de testes.

Para escoar a água, foi usada uma bomba de engrenagens modelo Micropump GJ N23 PF1SA, com deslocamento nominal de 0,64 mL/revolução e acoplamento magnético. O acionamento é realizado através de um motor elétrico trifásico da WEG, com potência nominal 3000 W/220 V e rotação máxima de 3370 rpm. Para controlar a velocidade de rotação utiliza-se um variador de frequência da Danfoss, modelo VLT-176F7301 de 0,75W/220V trifásico, o qual foi controlado usando um sistema de aquisição de dados e controle desenvolvido em ambiente Labview, através de uma placa NI USB 6009.

A medição de vazão de água é realizada através de um rotâmetro Cole Parmer, modelo PMR1- 010565, com escala mínima de 96 Lpm e fundo de escala de 1881 mLpm, dividido em 150 mm. Seu erro está sujeito tanto ao número de divisórias de sua régua como também à capacidade de visualização do operador em determinar o ponto medido.

O sistema para fornecimento de ar utiliza uma conexão ao sistema de ar comprimido do laboratório, através de uma válvula reguladora de pressão. Em seguida, o ar escoar por dois rotômetros fabricados Cole Parmer, um modelo FR2A12BVBN-CP, para vazões entre 0,04 e

0,5 Lpm e um modelo FR4A40BVBN-CP, que mede vazões entre 0,4 e 5 Lpm, ambos funcionam numa faixa de até 6,9 bar e 65°C e foram conectados em paralelo. O escoamento de ar e de água são conectados a um misturador que utiliza um meio poroso para homogeneizar a mistura e então introduzir a mistura na seção de testes. Após escoar pela seção de testes, o ar é liberado para atmosfera e a água é captada no reservatório da bomba de água, para futura recirculação no sistema. Da mesma forma que o rotâmetro de água, o rotâmetro de ar também necessita da visualização humana, o que pode acarretar erros.

Para assegurar que a pressão de ar se manteve dentro da faixa desejada (de 0 a 6 bar), utiliza-se um transdutor de pressão absoluto da marca Danfoss modelo 060G3040, com sinal de saída de 4 a 20 ma e tempo de resposta de 4 ms, instalado a jusante dos rotômetros de ar.

O canal de testes é formado por um sanduíche de placas acrílico com vedação de borracha e prensada com parafusos, possibilitando a visualização por ambos os lados, bem como a passagem do sinal de laser por ele. A mesa também foi montada de forma a permitir que o canal fosse inclinado há qualquer ângulo desejado, para se ter escoamento ascendente ou descendente através do canal. Além disso, também se pode girar o canal em torno de seu próprio eixo para verificar o efeito de inclinação radial do canal no escoamento.

Ao lado do canal há também suportes onde se pode fixar equipamentos de interesse, como o *laser*, a câmera fotográfica, fontes de luz, e outros.

Para adquirir dados da perda de pressão ao longo da seção de testes é utilizado um sensor de pressão diferencial produzido pela Validyne, modelo DP15, compatível com líquidos e gases, com o diafragma N°30, para pressões até 8,6 kPa, com tempo de resposta de 1ms, e distância de 600 mm entre sua entrada e saída.

No lado do canal que permite a visualização do escoamento tem-se fixado um emissor *laser* fabricado pela REO, modelo 31007, do tipo He-Ne, com comprimento de onda 633 nm. No lado oposto está fixado o receptor *laser* correspondente. O sensor fotodiodo da NEWPORT, modelo 818-BB-21, capaz de captar comprimentos de onda de 300 a 1100 nm, de 4 mm, feito de silicone, com tempo de resposta inferior a 0,3 ms. O *laser* foi ajustado para atingir o centro do canal, passando pelas camadas de acrílico, bem como pelo escoamento até atingir o receptor. O receptor converte a intensidade luminosa captada em tensão elétrica proporcional a intensidade, com saída de -10 a 10V, ressaltando que o escoamento no interior do canal interfere fortemente na intensidade luminosa adquirida. Tal tensão elétrica é transmitida a placa de aquisição USB 6009 e adquirida através do software de aquisição e controle em ambiente Labview.

Na saída da seção de testes tem-se uma câmera fotográfica Nikon R2500, com uma lente AF-S Nikkor de 18-55 mm, 3,5-5,6 G. O uso dessa câmera permite o registro dos diferentes padrões de escoamentos encontrados no experimento. Para melhorar a qualidade das fotos, foi utilizado um fundo preto no acrílico inferior e as configurações da câmera foram mudadas iterativamente até chegar a uma imagem satisfatória.

Para realizar o controle da bomba, bem como o registro das medições de pressão, temperatura e do laser, foi implementado um software em ambiente Labview capaz de adquirir dados a uma taxa de 1000 pontos por segundo, além de registrar os valores dos rotômetros de ar e de água, inseridos manualmente pelo usuário.

3.1. Calibração dos sistemas de medição

O rotômetro de água é tem um medidor de 150 mm, capaz de medir vazões de 96 a 1881 litros por minuto. Dessa forma seu disco começa a se mover com a vazão de 81 Lpm e cada milímetro é um acréscimo proporcional na vazão, chegando a 150 mm, correspondente a 1881 litros por minuto. Sua precisão é garantida pelo fabricante, sendo apenas conferida no laboratório com o uso de uma balança gravimétrica.

No que se refere ao *laser*, o posicionamento do par emissor/receptor é ajustado para se obter um valor máximo de tensão de saída (10mV) para a seção de testes totalmente preenchida com escoamento monofásico água, sendo que o *laser* proveniente do emissor atinge a seção de testes no centro do canal.

Por final, o transdutor diferencial foi calibrado com o auxílio de um calibrador Series CPG 2500 da Mensor, com precisão de 0,01% da medição e resolução de 6 dígitos, para até 110 kPa. Deve-se ressaltar que toda o processo de calibração foi realizado em uma sala com a temperatura controlada no Laboratório de Metrologia da USP. Foram geradas pequenas pressões crescentes dentro da nossa faixa de uso, de 0 a 8600 Pa. Os pontos (pressão x tensão) adquiridos durante a calibração estão expressos na Tabela 1 e ilustrados na Figura 4, obtendo-se a curva de calibração da Equação (10) através de uma regressão linear, usando o método dos mínimos quadrados.

$$Y = 1530,2 \cdot x - 19,998 \quad (10)$$

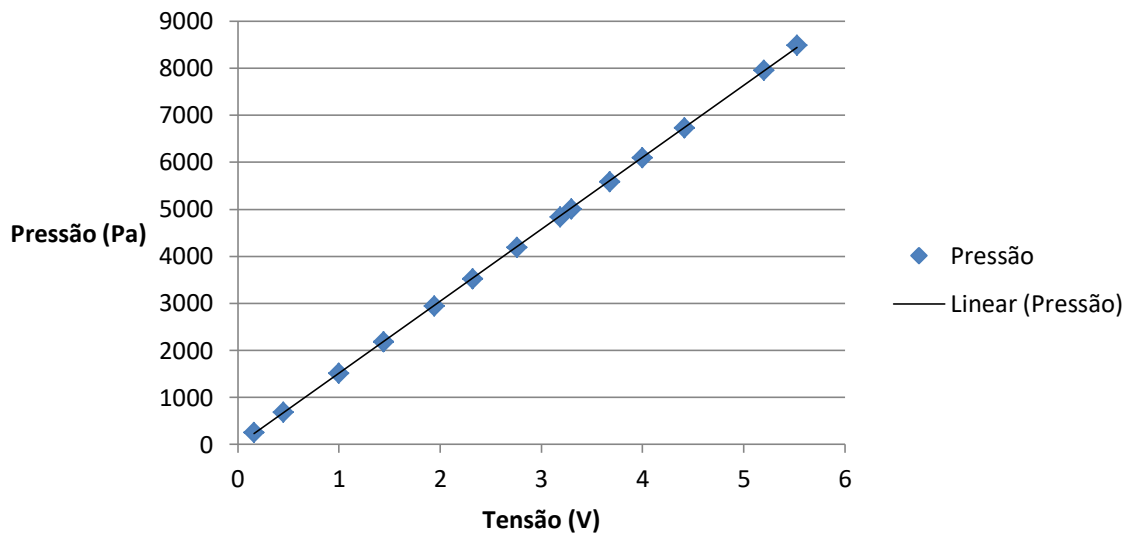


Figura 4 – Curva de calibração do transdutor diferencial.

3.1.1. Queda de pressão em escoamento monofásico

Para avaliar a influência do efeito de rotação do eixo transversal da seção de testes na queda de pressão total do escoamento, foram analisados escoamentos monofásicos com inclinação de 0° , 15° , 30° e 45° , variando a velocidade mássica a um máximo de $35 \text{ kg/m}^2\text{s}$, atingindo um número de Reynolds máximo de 3200. A Figura 5 apresenta os dados experimentais adquiridos.

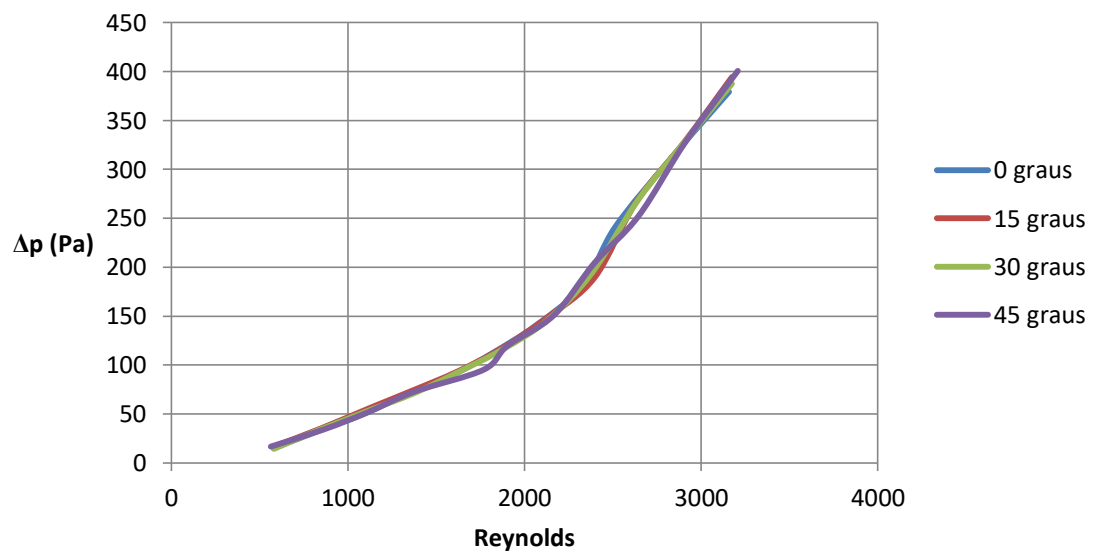


Figura 5 – Queda de pressão monofásica para inclinações de 0° , 15° , 30° e 45° pelo número de Reynolds do escoamento.

Do gráfico, pode-se observar uma variação na taxa da perda de pressão quando escoamento atinge Reynolds de 2300. Isso é esperado, visto que nessa região o escoamento transiciona do regime laminar para o turbulento, aumentando gradiente de pressão.

Vale destacar uma comparação entre os resultados experimentais obtidos para as diferentes inclinações com os resultados obtidos por Loyola (2015) usando o mesmo canal.

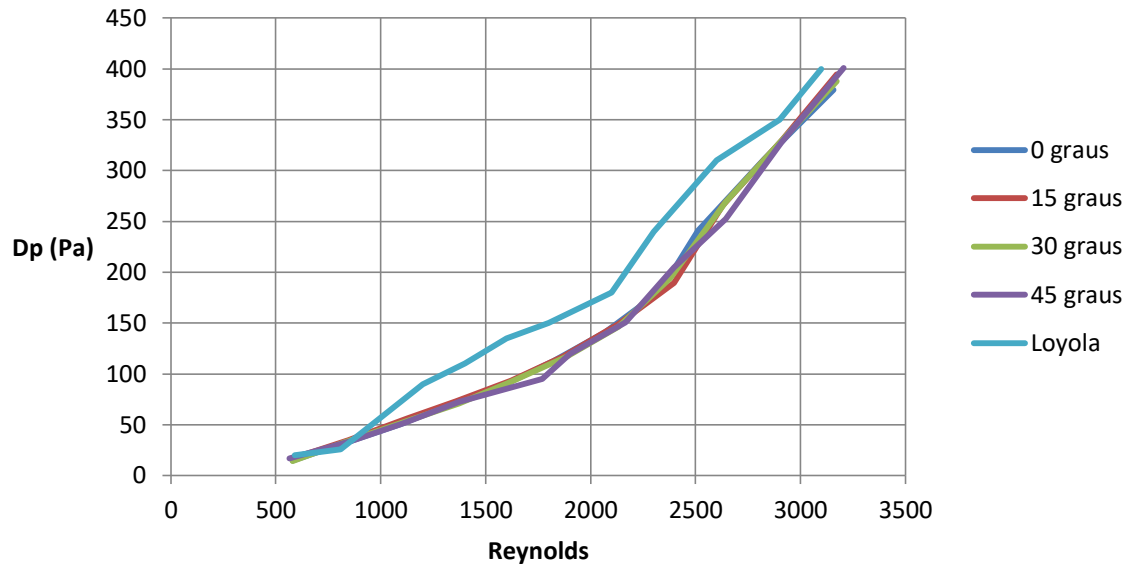


Figura 6 – Queda de pressão dos experimentos realizados e dos resultados obtidos por Loyola (2015).

A Figura 7 apresenta uma comparação dos dados experimentais com os dados obtidos por Loyola (2015), com uma variação de $\pm 20\%$.

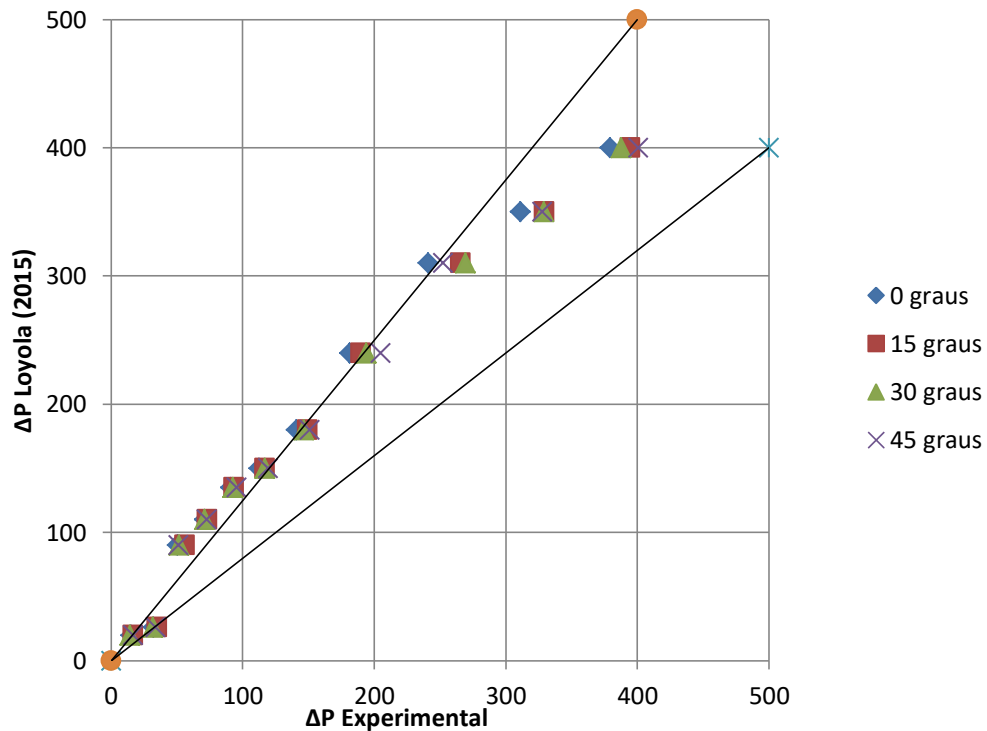


Figura 7 – Comparação dos resultados obtidos neste experimento com os obtidos por Loyola.

Vale destacar que, embora haja uma diferença entre os resultados obtidos aqui e os de Loyola (2015), essa diferença não chega a ser muito grande, e suas retas possuem inclinações parecidas.

A comparação entre os resultados obtidos para as diferentes rotações mostrou que as curvas foram praticamente idênticas, sem deslocamentos de curvas e com inclinações muito semelhantes durante toda a evolução do número de Reynolds. Portanto, a rotação do canal não causou nenhum efeito considerável na perda de pressão para escoamento monofásico líquido.

Por final, tem-se que o transdutor apresenta uma relação coerente para adquirir a perda de pressão nos experimentos avaliados.

3.1.2. Padrões de escoamento avaliados

Neste estudo, classificamos os padrões encontrados em 4 categorias: Bolhas dispersas, bolhas alongadas, pistonado e ondulado.

O padrão bolhas dispersas ocorre quando há formação de bolhas bem espalhadas na parte superior do escoamento, todas de tamanho relativamente pequeno e com frequência de formação praticamente constante ao longo do tempo.

Para o padrão bolhas alongadas, as bolhas continuam a se concentrar na parte superior do escoamento, mas passam a se aglutinar em bolhas maiores, mais longas. Neste caso, a frequência de formação de bolhas fica menos definida, variando muito ao longo do tempo.

No padrão pistonado há a formação de pistões de ar, os quais passam a ocupar toda a seção transversal do canal, e possuem comprimento da ordem de 5 diâmetros. Por essa razão, a água passa a sofrer intermitências de frequência variável no tempo.

Por final, no escoamento ondulado (embora seja mais conhecido como estratificado-ondulado, definimos esse padrão apenas de ondulado, visto que não foi observado um escoamento puramente estratificado) ocorre quando o escoamento estratificado alcança altas velocidades, e ocorre agitações na fase líquida, formando ondas.

3.2. Pós-processamento dos sinais do *laser*

Para analisar a frequência de formação de bolhas no canal, foi utilizado o *laser* localizado próximo ao fim do canal de escoamento. O *laser* é posicionado de forma que o receptor apresente saturação no sinal de saída, para escoamento monofásico água (+10V adquiridos na placa de aquisição de dados), como mostrado na Figura 8.

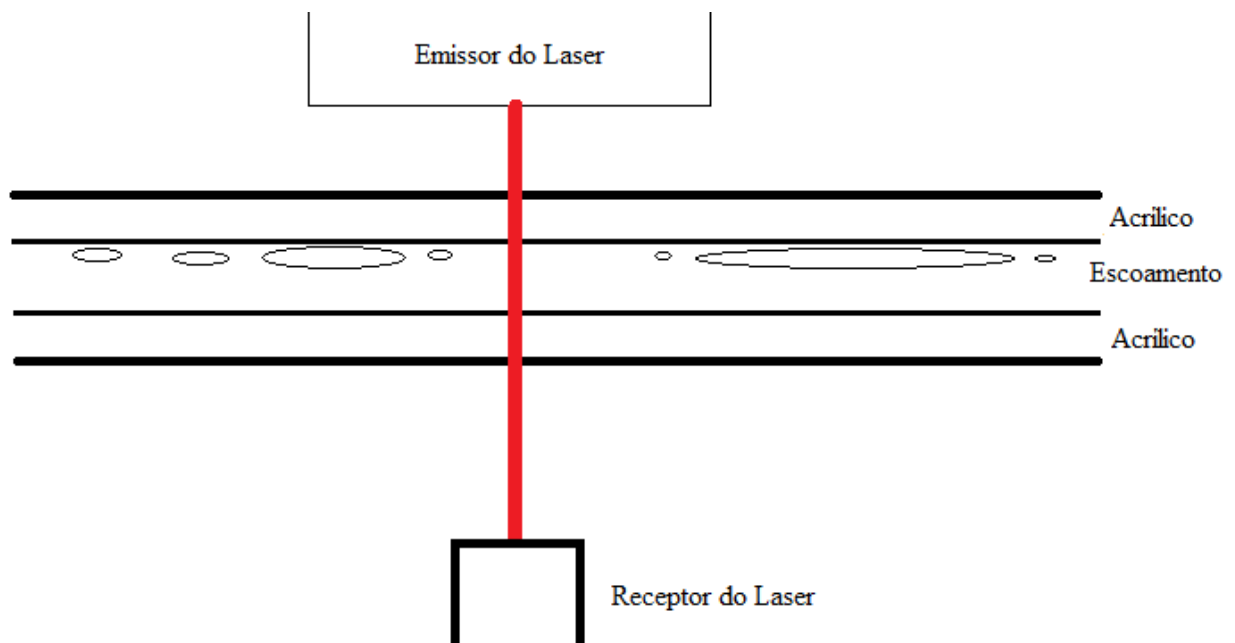


Figura 8 – Esquema de montagem do sistema receptor de laser e do canal de testes.

Para realizar uma análise na frequência de passagem de bolhas, a fim de caracterizar o padrão de escoamento, primeiramente realizou-se uma análise da frequência do sinal do laser.

Para tal, normaliza-se e digitaliza o sinal adquirido para valores entre -1 e +1, obtendo um sinal centralizando em torno de 0 (retirando a componente contínua do sinal e reduzindo a interferência de ruídos).

Com o sinal normalizado, é aplicada a transformada rápida de Fourier (FFT, do acrônimo do inglês *Fast Fourier Transform*) para obter a frequência de passagem de bolhas. Destaca-se que a transformada de Fourier consiste em um método para transformar um sinal do domínio temporal para o domínio da frequência. Embora tenha sido originalmente criado para funções contínuas, ela é comumente usada para análise de sinais discretos, como a transformada discreta de Fourier, tal como descrito na Equação (11).

$$\text{FFT} = \frac{1}{N} \sum_{x=1}^N f(x) e^{-\frac{i2\pi}{N}} \quad (11)$$

Onde $f(x)$ é o valor do sinal avaliado, N é uma potência de 2, sendo escolhida sempre a maior potência de 2 menor do que o número total de valores obtidos, e i é a unidade imaginária.

Apesar da FFT apresentar as frequências características que compõem o sinal, não se pode avaliar o instante em que cada frequência ocorreu. Para suprir tal necessidade, pode-se utilizar a transformada de Gabor (uma transformada tempo-frequência), que divide os valores da FFT encontrada em janelas com formato de Gaussianas e analisa as frequências em cada instante de tempo, tal como descrito na Equação (12).

$$G(\text{FFT}) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{N} \sum_{x=1}^N f(x) e^{-\frac{i2\pi}{N}} g(x, t) dt \quad (12)$$

Onde g é a função gaussiana Gaussiana, definida na Equação (13).

$$g(x, t) = \left(\frac{\pi}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}} * \exp\left(\frac{(x-t)^2}{4*\alpha}\right) \quad (13)$$

Onde α é o tamanho da janela desejado. Esse tamanho depende de fatores como o número de dados obtidos, e a precisão desejada para a análise do tempo e da frequência.

Para exemplificar o uso da transformada de Gabor e das FFT, criamos uma função f , resultado da soma de senos com frequência de 1, 5, 10 e 20 Hz, definida pela Equação (14). A Figura 9 mostra o gráfico da função, enquanto a FFT gerada dessa função é mostrada no gráfico da Figura 10.

$$f(t) = \text{sen}(t) + \text{sen}(5 * t) + \text{sen}(10 * t) + \text{sen}(20 * t) \quad (14)$$

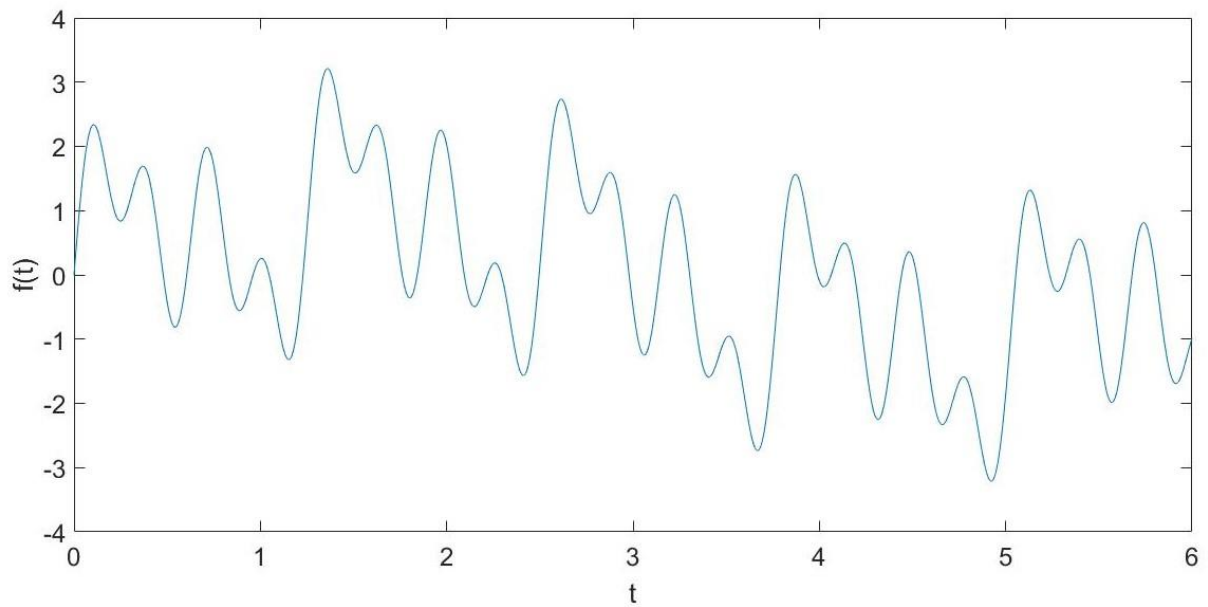


Figura 9 – Função f(t).

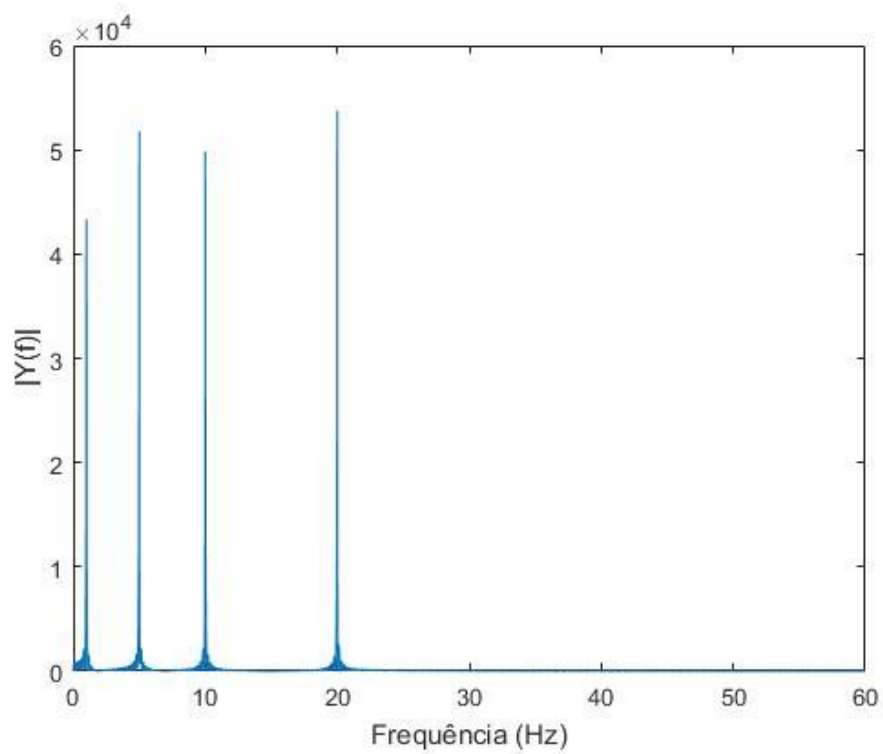


Figura 10 – FFT da função f (t).

A FFT gerada nos mostrou claramente as frequências de 1, 5, 10 e 20 Hz usadas para criar a função, se mostrando perfeitamente apta para o seu uso.

Para avaliar a influência do parâmetro α na transformada de Gabor, as Figura 11, 12, 13 e 14 apresentam a transformada de Gabor de $f(t)$ para o parâmetro α igual a 0,1; 1,0; 5,0 e 10,0, respectivamente.

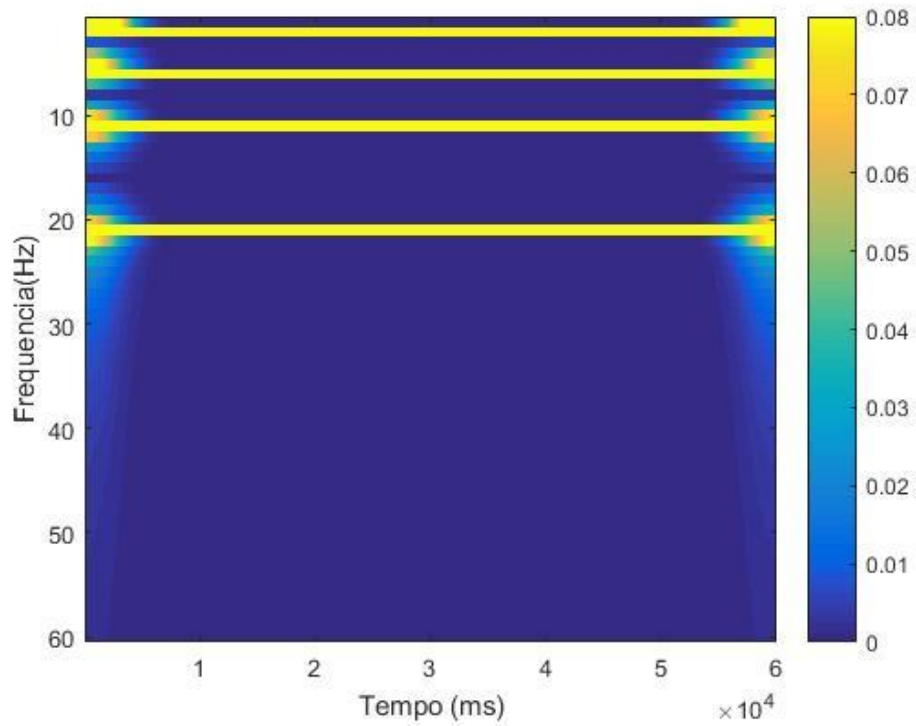


Figura 11 – Transformada de Gabor de $f(t)$ para $\alpha=0,1$.

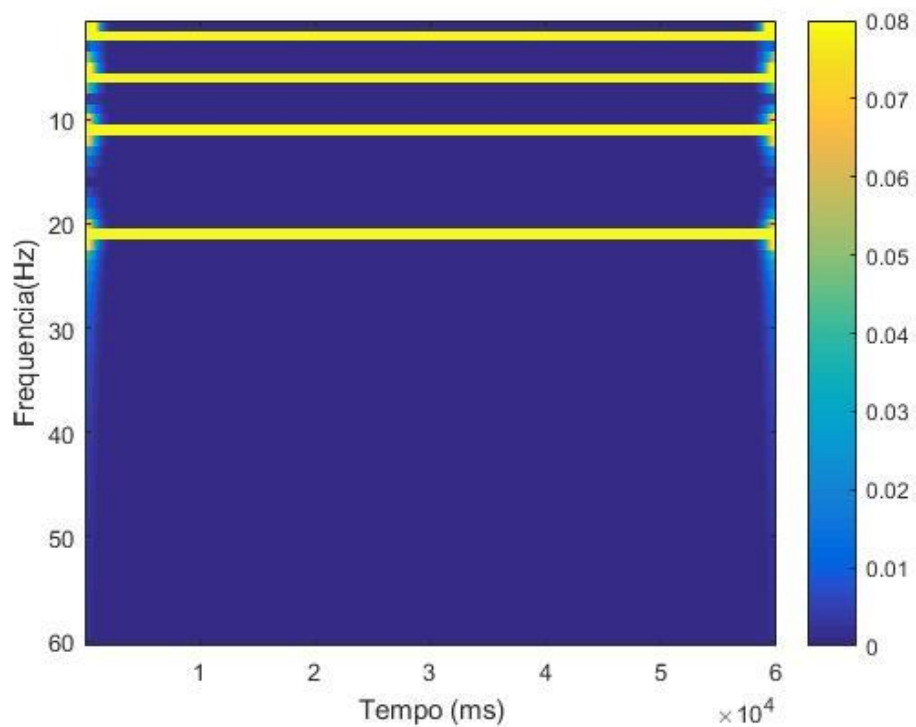


Figura 12 – Transformada de Gabor de $f(t)$ para $\alpha=1,0$.

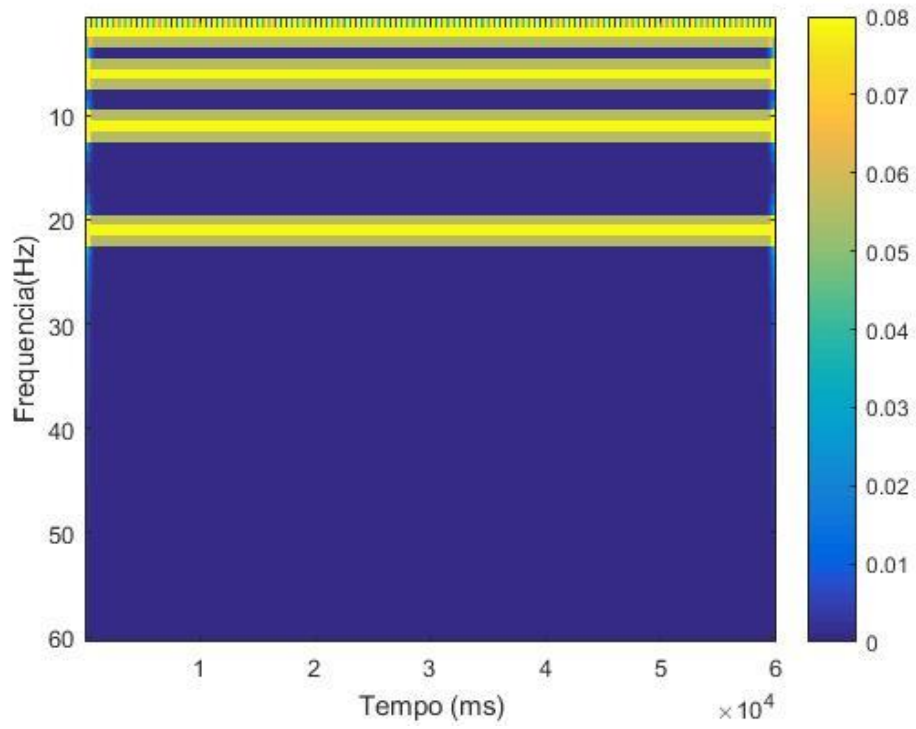


Figura 13 – Transformada de Gabor de $f(t)$ para $\alpha=5,0$.

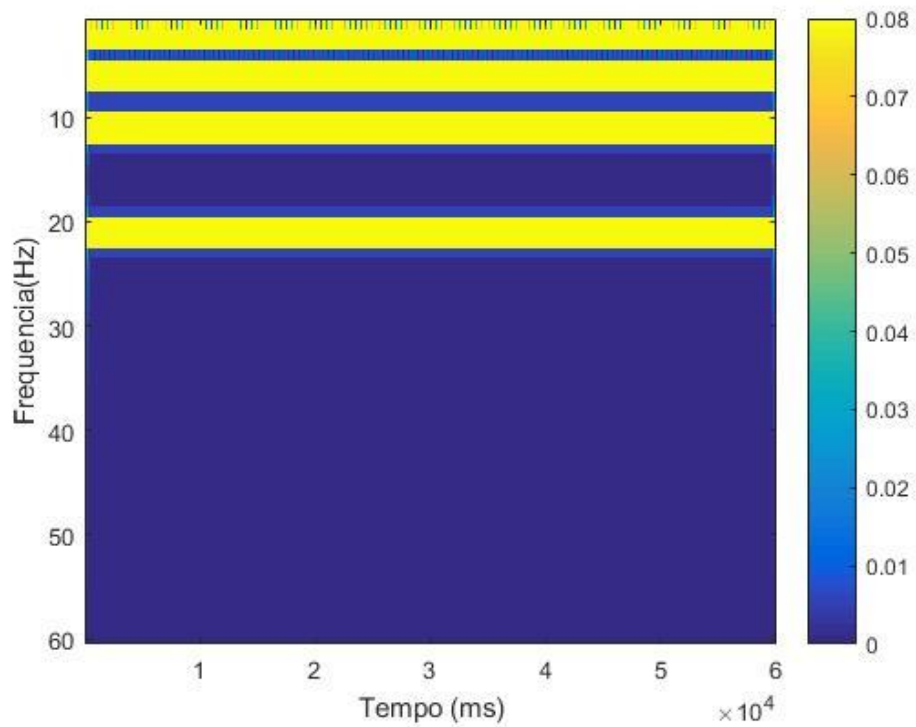


Figura 14 – Transformada de Gabor de $f(t)$ para $\alpha=10$.

Os valores encontrados para as frequências foram deslocados com relação ao esperado, o que é causado pelo erro do tamanho da janela de análise, sendo muito próximo ao correto. É observável dos gráficos que um valor menor de α fornece uma boa definição na frequência encontrada, mas pode gerar problemas na determinação do tempo obtido, o que é observável especialmente nas bordas dos gráficos. Por outro lado, um valor mais elevado para α nos dá uma melhora considerável na definição do tempo, todavia uma menor definição da frequência. Para diferentes aplicações, as necessidades de definição do tempo e da frequência podem variar, o que exige tamanhos de α diferentes. Por isso, além da análise visual qualitativa, foram realizadas também correlações cruzadas com o intuito de testar sua capacidade de reconhecer o padrão de escoamento a partir do sinal do laser.

Para se definir o padrão, foi utilizada uma correlação cruzada entre as transformadas de Gabor do escoamento a ser analisado com um escoamento com padrão conhecido. Inicialmente se define um tamanho de tempo j da janela para se realizar a comparação através de um processo iterativo, uma vez escolhido, se pega uma janela com esse tamanho do sinal de padrão, à partir de um instante inicial t com um número de linhas i igual ao da transformada original e um número de colunas j . Essa janela em seguida é normalizada, dando origem à matriz $u(t)$. Em seguida, se normaliza o sinal da Gabor do escoamento a ser analisado. Pega-se então uma janela de j colunas dessa Gabor a partir do instante inicial t , sendo esta a matriz $v(t)$. Como mostrado na Equação (15), o valor da correlação cruzada no instante t é dado pela somatória de todos os pontos da matriz gerada pela multiplicação ponto a ponto de $u(t)$ por $v(t)$.

$$c(t) = \sum_1^i \sum_1^j u(t) \otimes v(t) \quad (15)$$

Após a aquisição desse ponto, desloca-se as colunas das matrizes Gabores originais para uma para a esquerda e se repete o processo, agora para o instante $t+1$. O valor final da correlação cruzada C é dado pelo somatório dos valores do vetor $c(t)$ para todos os valores de t , como mostrado na Equação (16).

$$C = \sum_{t=1}^{t=i} c(t) \quad (16)$$

Um maior valor para a correlação cruzada nos indica que as frequências encontradas no escoamento se assemelham àquelas do escoamento a que se está comparando, o que pode indicar que ambos possuem o mesmo padrão.

4. Resultados e Discussão

Em todos os experimentos realizados foram adquiridos dados durante 60 segundos, a uma taxa de aquisição de 1000 pontos por segundo. Para determinar a queda de pressão, foi realizada a média aritmética simples dos pontos adquiridos.

Para avaliar a queda de pressão em escoamentos bifásicos, foram realizados experimentos estabelecendo valores fixos de velocidade mássica de água (142, 244, 448 e 651 $\text{kg/m}^2\text{s}$) e variou-se a velocidade superficial de ar.

As Figuras 15, 16, 17 e 18 apresentam os resultados experimentais adquiridos para queda de pressão em escoamentos bifásicos e também uma aproximação do Modelo Homogêneo. Nota-se que a queda de pressão observada foi muito inferior à esperada com o uso do Modelo Homogêneo, o qual tem uma taxa de incremento elevada, especialmente no começo, enquanto o experimental se mostrou quase constante em todos os casos em comparação.

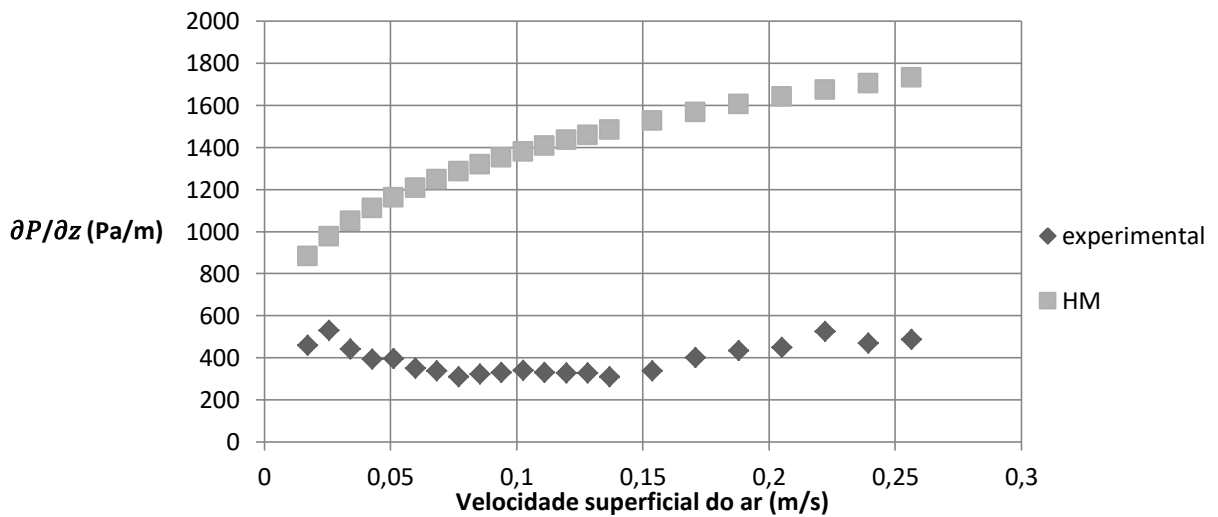


Figura 15 – Queda de pressão para $142 \text{ kg/m}^2\text{s}$ em função da velocidade superficial do ar.

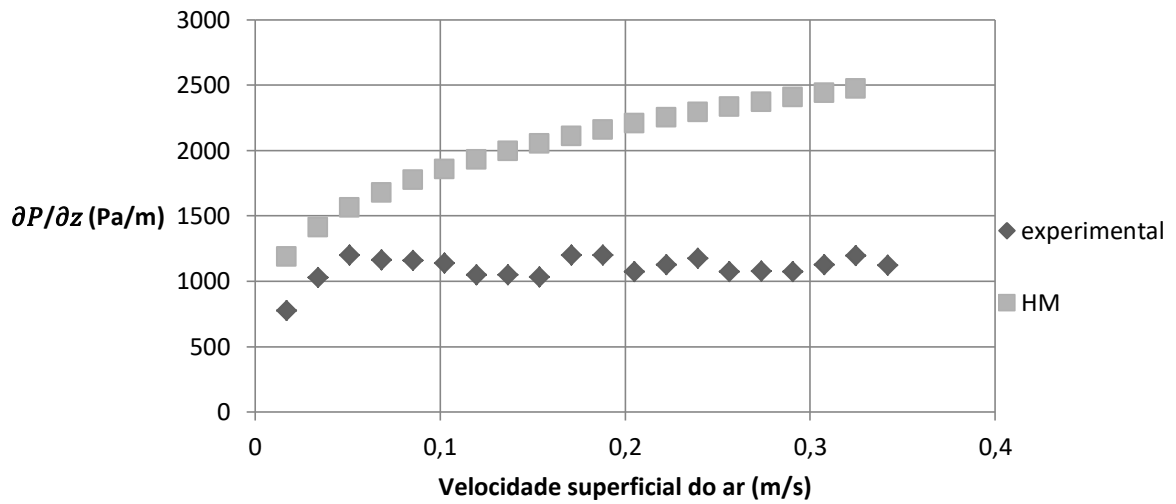


Figura 16 – Queda de pressão para $244 \text{ kg/m}^2\text{s}$ em função da velocidade superficial do ar.

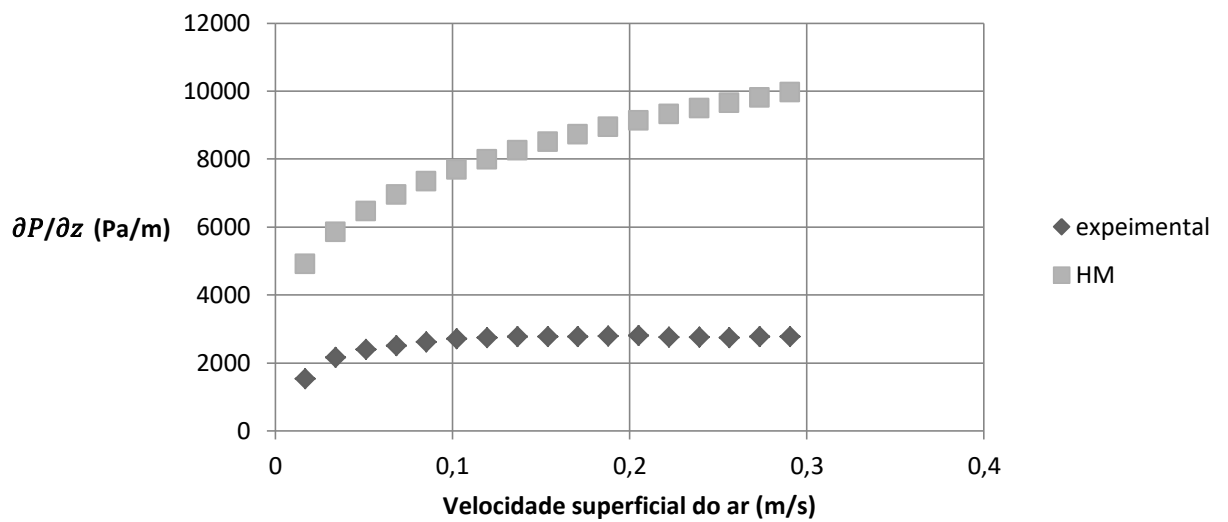


Figura 17 – Queda de pressão para $447 \text{ kg/m}^2\text{s}$ em função da velocidade superficial do ar.

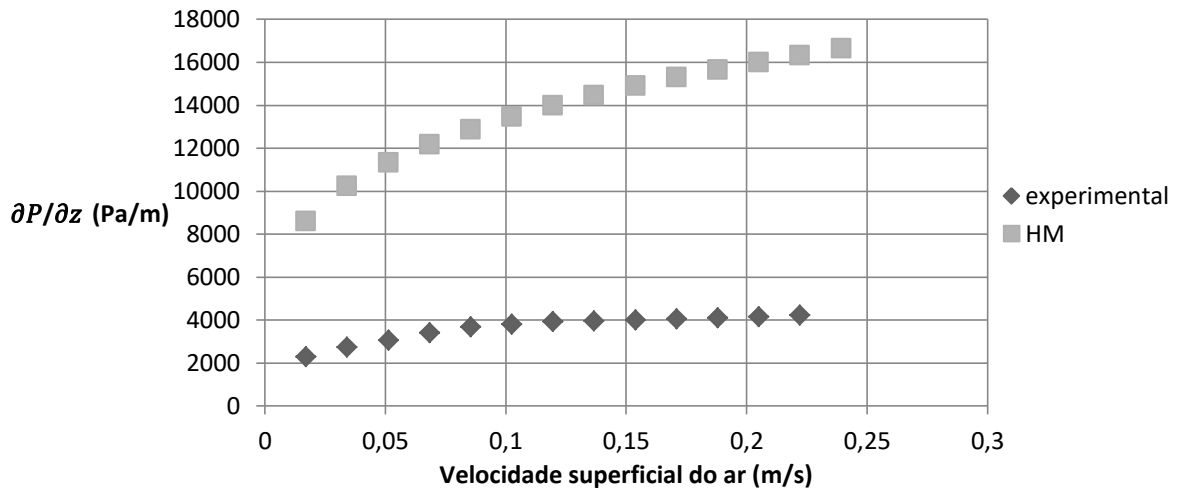


Figura 18 – Queda de pressão para $651 \text{ kg/m}^2\text{s}$ em função da velocidade superficial do ar.

4.1. Padrões de escoamento observados experimentalmente

O resultado nos deu um mapa dos padrões de escoamento encontrados no experimento. Para a classificação dos escoamentos usamos a câmera fixada no fim do canal para fotografá-los, variando os intervalos de captura de imagem e quantidade de luz iterativamente até obter um bom resultado. Para se obter as classificações, foi importante obter também fotos dos escoamentos de um ponto de vista horizontal para que a altura atingida pelas bolhas fosse observada, o que não é possível com a mesa em sua posição original sem inclinação. Portanto, a mesa foi inclinada em torno de seu eixo 90° e as vazões de água e ar foram repetidas para a obtenção das fotos.

A Tabela 1 mostra as classificações atribuídas em função das velocidades mássicas de água e velocidade da fase de ar.

	$G=142 \text{ kg/m}^2\text{s}$	$G=244 \text{ kg/m}^2\text{s}$	$G=447 \text{ kg/m}^2\text{s}$	$G=651 \text{ kg/m}^2\text{s}$
Bolhas dispersas	Não acontece	$J_G < 0,034$	$J_G < 0,06$	$J_G < 0,10$
Bolhas alongadas	$J_G < 0,05$	$0,085 \geq J_G \geq 0,034$	$0,10 \geq J_G \geq 0,06$	$0,16 \geq J_G \geq 0,10$
Pistonado	$0,13 \geq J_G \geq 0,05$	$0,26 \geq J_G \geq 0,085$	$0,27 \geq J_G \geq 0,10$	$J_G \geq 0,16$
Ondulado	$J_G > 0,13$	$J_G > 0,26$	$J_G > 0,27$	Não acontece

Tabela 1 – relação entre as velocidades mássicas de água e velocidades superficiais de ar para o qual cada padrão de escoamento ocorre.

O padrão de bolhas dispersas ocorre apenas para vazões pequenas de ar e altas de água, sendo que o mesmo não se mostra para $142 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água, e apenas para uma faixa muito estreita de vazões de ar de $244 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $447 \text{ kg/m}^2\text{s}$, sendo mais observável apenas para $651 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

Em seguida, bolhas alongadas também ocupam uma faixa muito estreita, mas pistonado ocupa a maior parte dos escoamentos medidos em todos os casos, sendo que para $651 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água, o padrão pistonado segue até o transdutor chegar em seu limite.

Por fim, o ondulado só é observado quando a vazão de ar é muito grande, e a de água é muito pequena, não sendo observado para $651 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água.

Imagens captadas do escoamento, tanto para vistas laterais quanto superiores do escoamento são apresentadas nas Figuras 19 a 26.

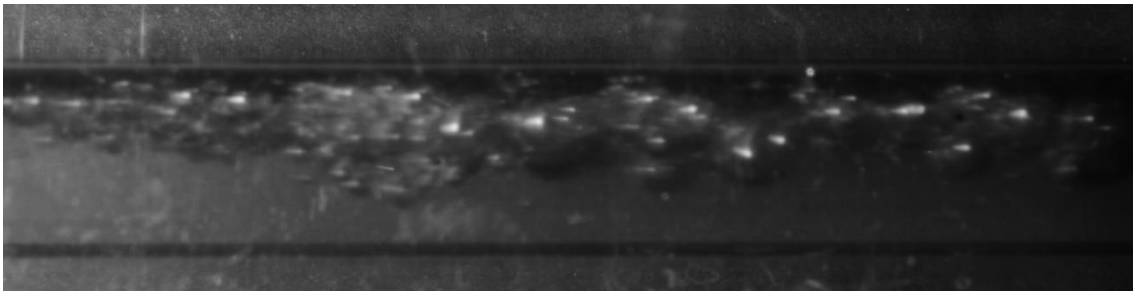


Figura 19 – Foto lateral de escoamento com bolhas dispersas.



Figura 20 – Foto superior de escoamento com bolhas dispersas.



Figura 21 – Foto lateral de escoamento com bolhas alongadas.

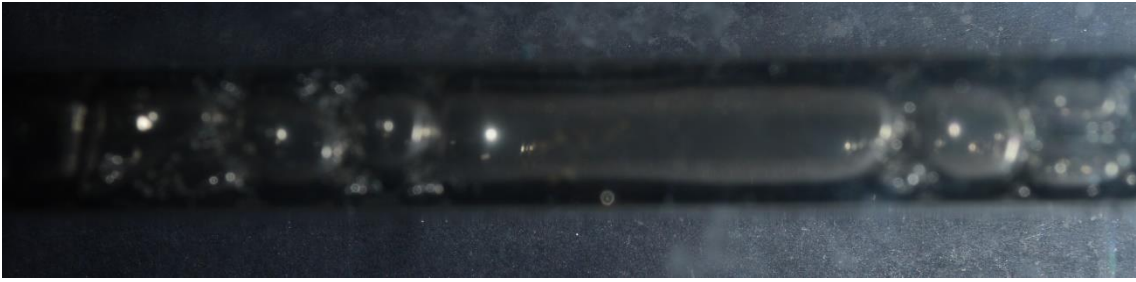


Figura 22 – Foto superior de escoamento com bolhas alongadas.

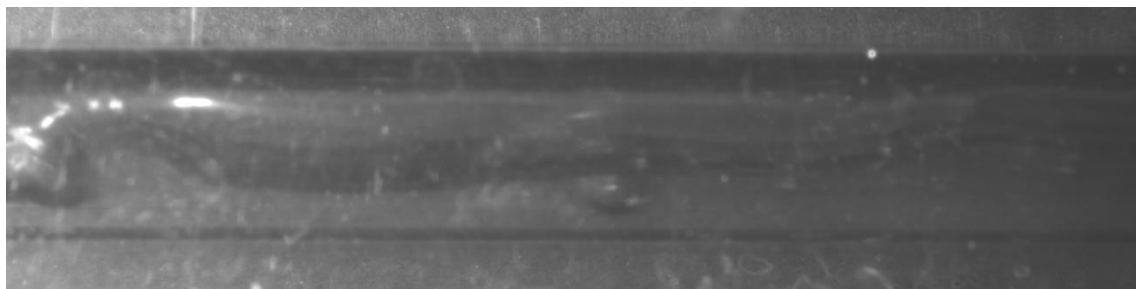


Figura 23 – Foto lateral de escoamento ondulado.



Figura 24 – Foto superior de escoamento ondulado.

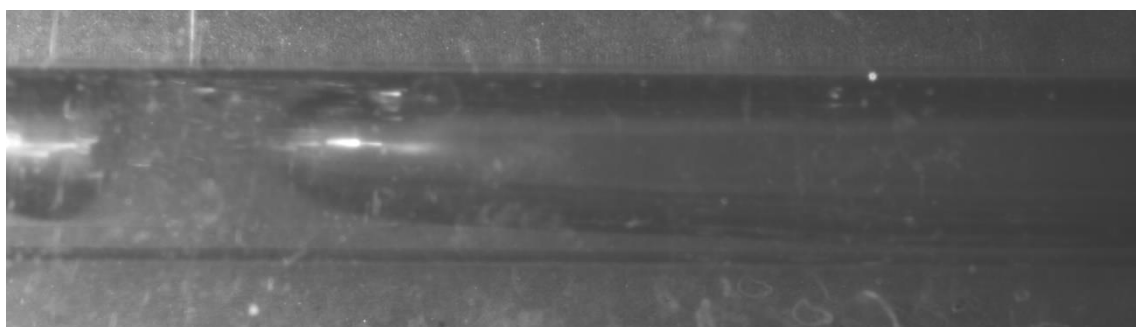


Figura 25 – Foto lateral de escoamento pistonado.



Figura 26 – Foto superior de escoamento pistonado.

A Figura 27 apresenta um agrupamento dos padrões de escoamento em um mapa de escoamento considerando a velocidade mássica da água e a velocidade da fase ar, mostrando regiões linearmente separáveis entre cada fase.

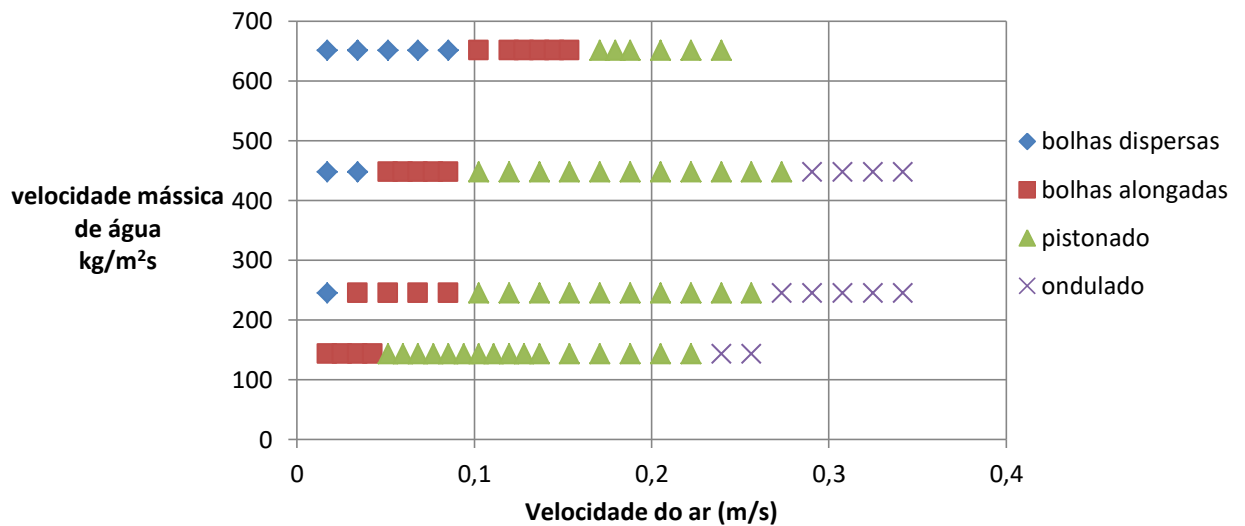


Figura 27 – Mapa dos padrões de escoamento em função da velocidade mássica de água e velocidade da fase de ar.

4.2. Análise tempo-frequência.

Nessa análise, inicialmente foram adquiridos os sinais do laser. Os resultados serão apresentados de acordo com o padrão de escoamento.

Para o padrão de bolhas dispersas, foram escolhidas as velocidades de 0,017 e 0,034 m/s de ar, ambos com vazões de 447 kg/m²s de água, e 0,017 e 0,051 m/s de ar, os dois com vazão de 651 kg/m²s de água.

Para o padrão de bolhas alongadas, vamos usar os escoamentos de 0,043 m/s de ar e 142 kg/m²s de água, 0,051 m/s e 0,068 m/s de ar, ambas com 447 kg/m²s de água, e 0,085 m/s de ar e 651 kg/m²s de água.

Para o padrão pistonado, escolhemos as vazões de 0,051 m/s de ar e 142 kg/m²s de água, 0,085 m/s e 0,137m/s de ar, com vazão de 244 kg/m²s de água, e 0,188 m/s de ar e 651 kg/m²s de água.

Por fim, para o padrão ondulado, temos as seguintes vazões: 0,222 m/s de ar e 1425 kg/m²s de água, 0,256 m/s e 142 kg/m²s de água, 0,256 m/s de ar 244 kg/m²s de água, e 0,291 m/s de ar e 244 kg/m²s de água.

Nas Figuras 28, 30, 32 e 34 tem-se os sinais originais do laser para os padrões bolhas dispersas, bolhas alongadas, pistonado e ondulado respectivamente. Para facilitar a visualização temporal, essas figuras contém os dados dos primeiros 5 segundos de escoamento.

Já nas Figuras 29, 31, 33 e 35, tem-se os gráficos das transformadas de Gabor dos padrões seguindo a mesma ordem.

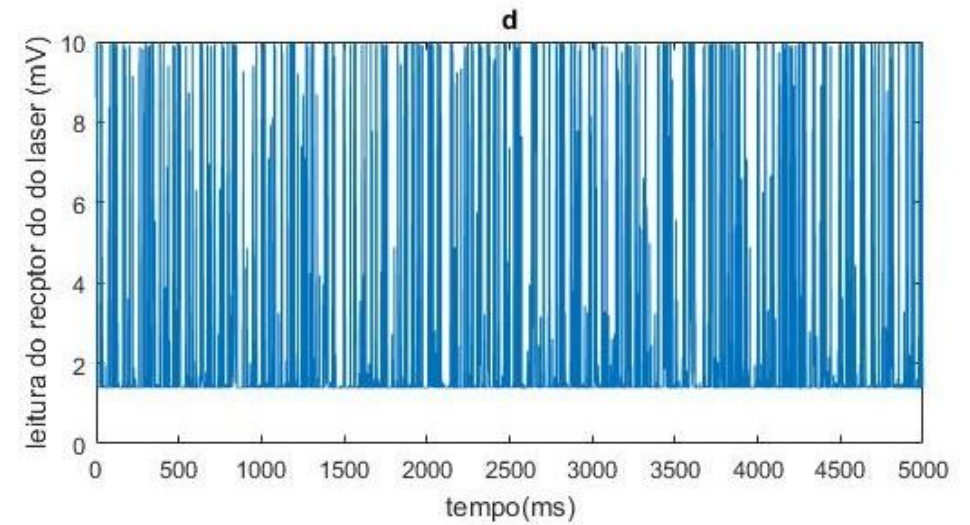
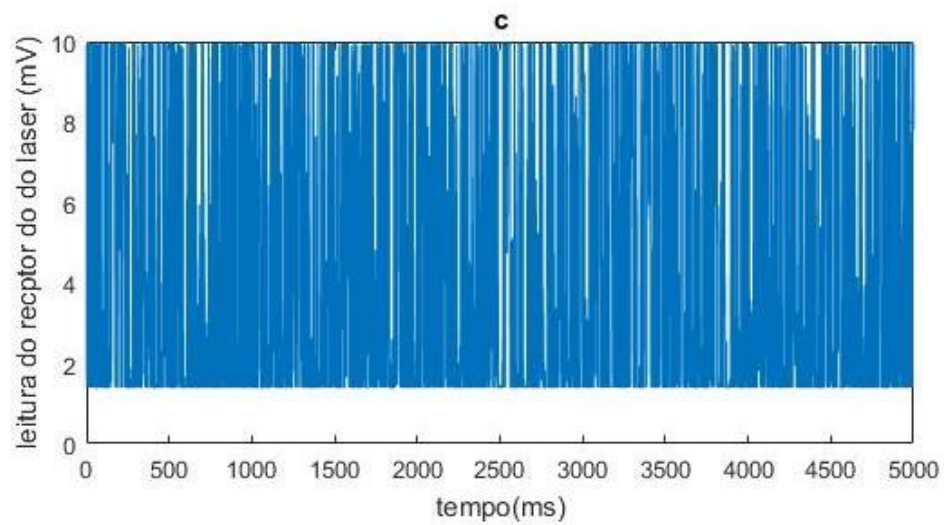
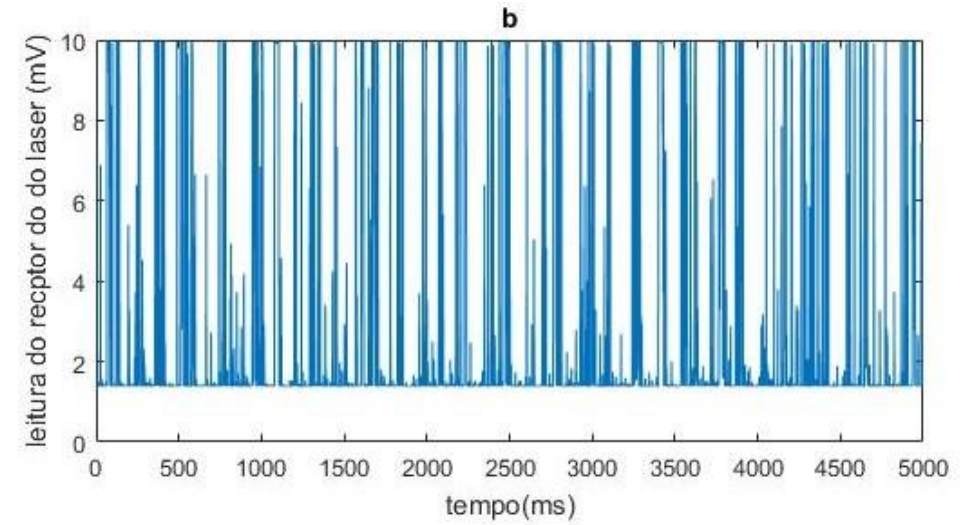
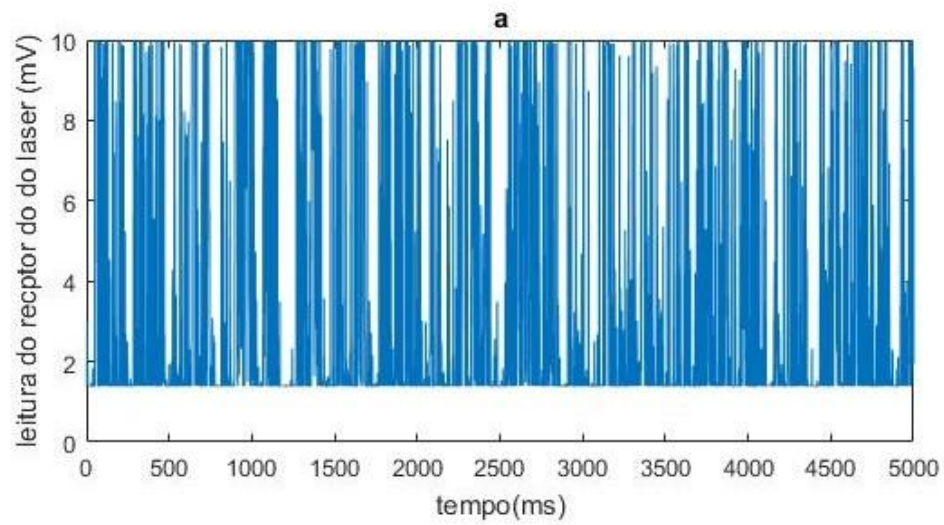


Figura 28 – Sinais originais do laser de escoamentos do padrão bolhas dispersas, com as vazões (a) $447 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,017 \text{ m/s}$ de ar, (b) $447 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,034 \text{ m/s}$ de ar, (c) $651 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,017 \text{ m/s}$ de ar e (d) $651 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,052 \text{ m/s}$ de ar.

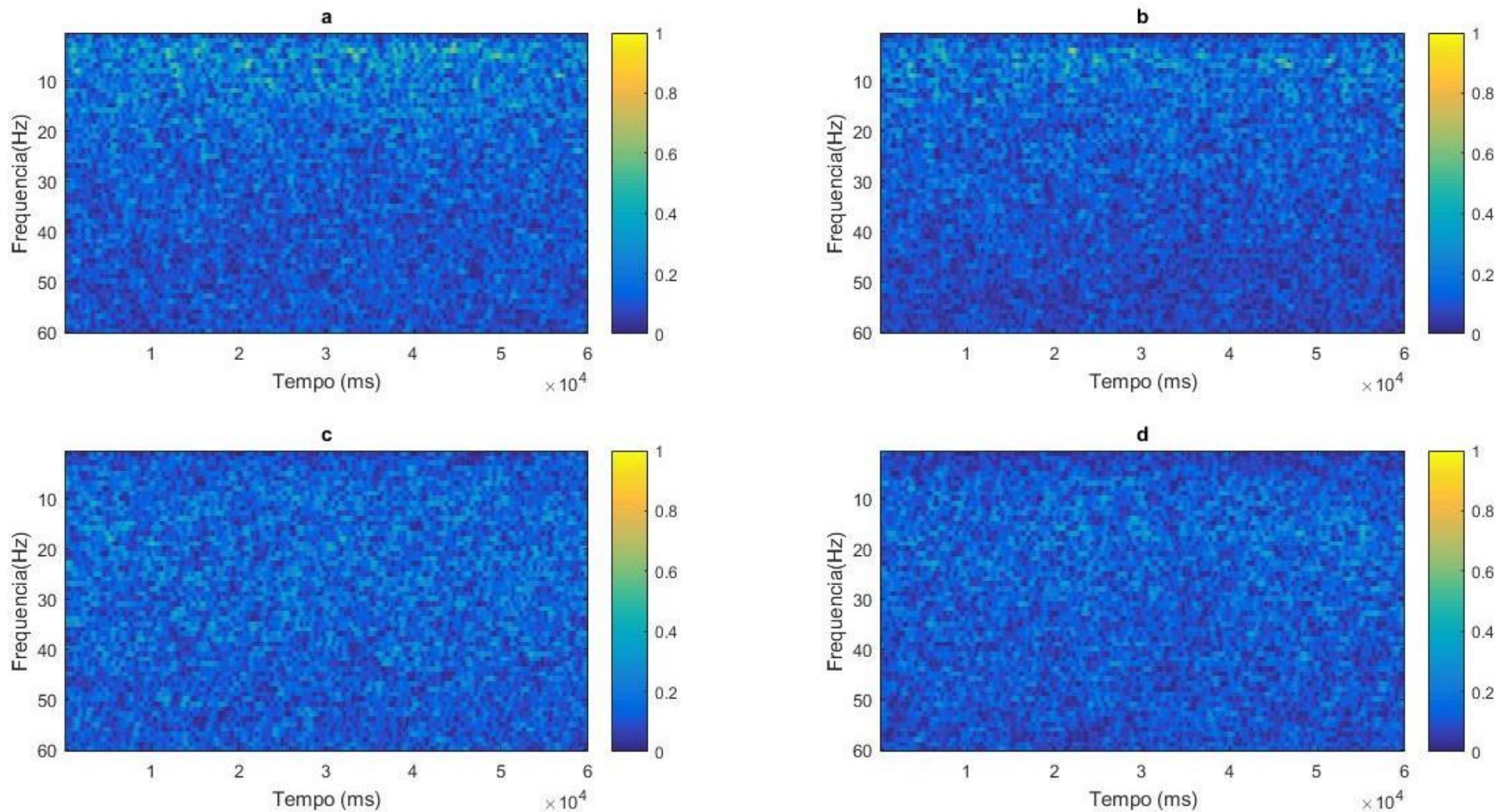


Figura 29 – Gráficos das transformadas de Gabor para escoamentos do padrão bolhas dispersas, com vazões de (a) $447 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,017 \text{ m/s}$ de ar, (b) $447 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,034 \text{ m/s}$ de ar, (c) $651 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,017 \text{ m/s}$ de ar e (d) $651 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,052 \text{ m/s}$ de ar.

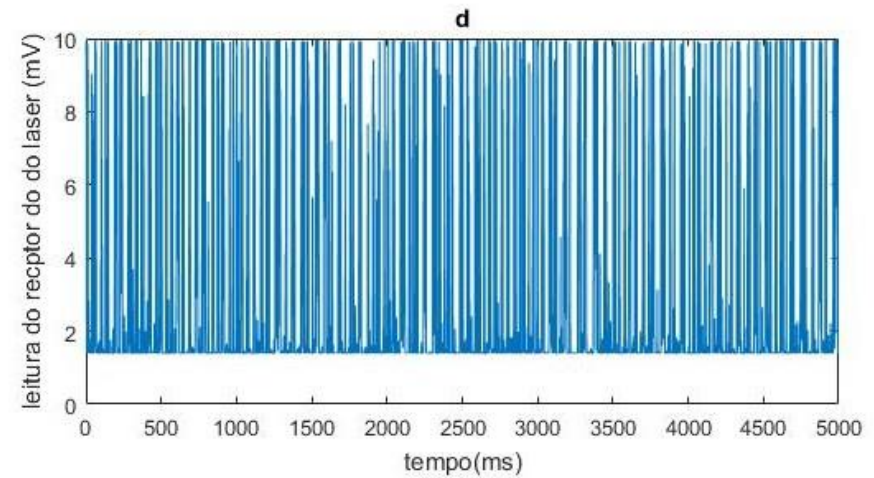
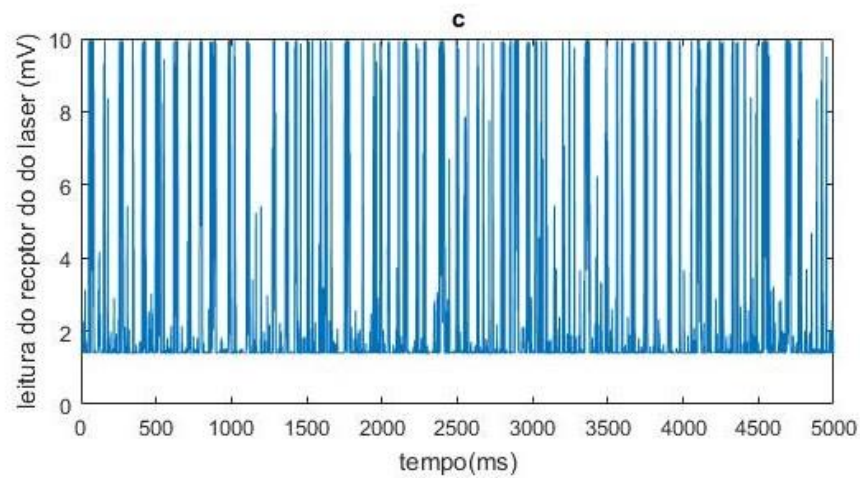
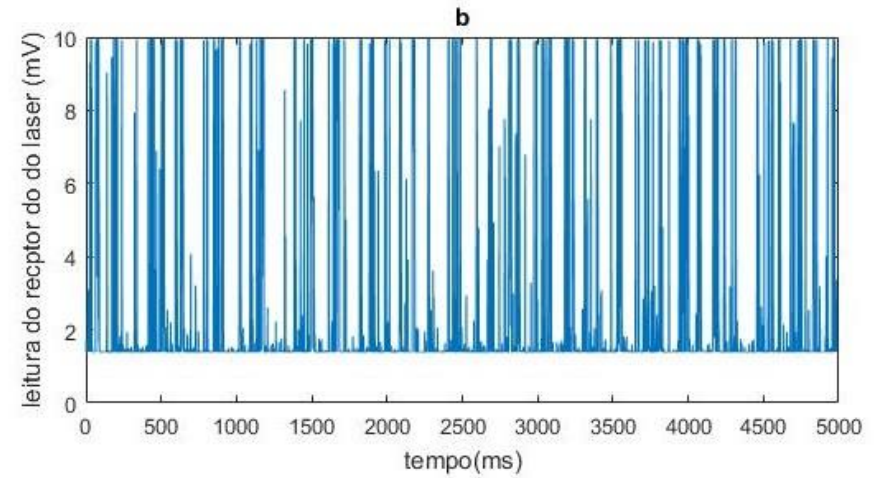
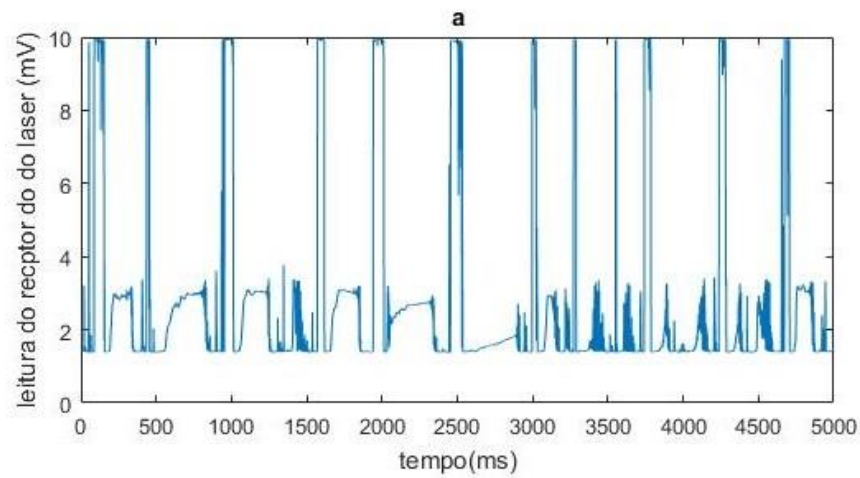


Figura 30 – Sinais originais do laser de escoamentos do padrão bolhas alongadas, com as vazões (a) 142 kg/m²s de água e 0,043 m/s de ar, (b) 447 kg/m²s de água e 0,051 m/s de ar, (c) 447 kg/m²s de água e 0,068 m/s de ar e (d) 651 kg/m²s de água e 0,085 m/s de ar.

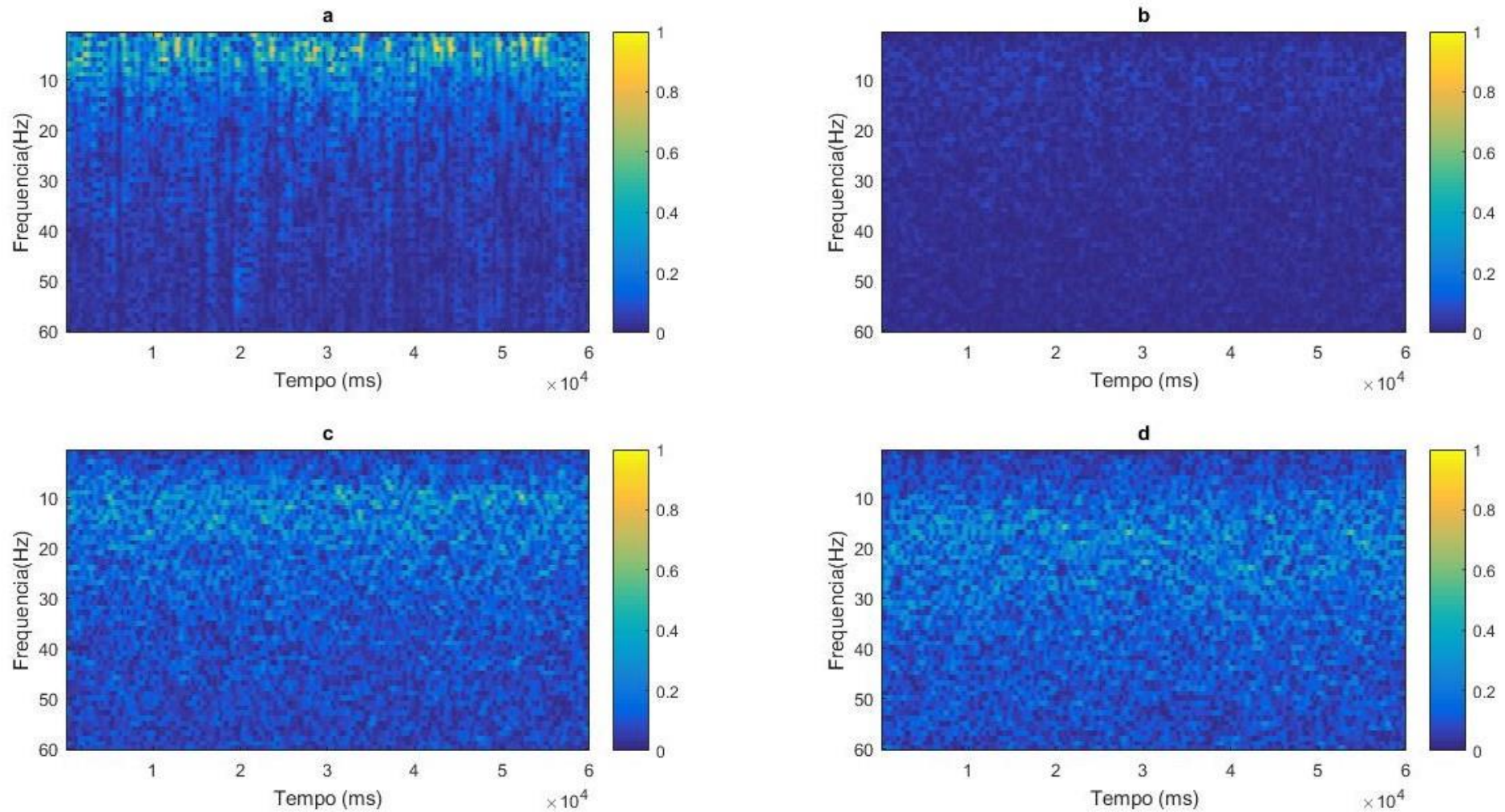


Figura 31 – Gráficos das transformadas de Gabor para escoamentos do padrão bolhas alongadas, com vazões de **(a)** 142 kg/m²s de água e 0,043 m/s de ar, **(b)** 447 kg/m²s de água e 0,051 m/s de ar, **(c)** 447 kg/m²s de água e 0,068 m/s de ar e **(d)** 651 kg/m²s de água e 0,085 m/s de ar.

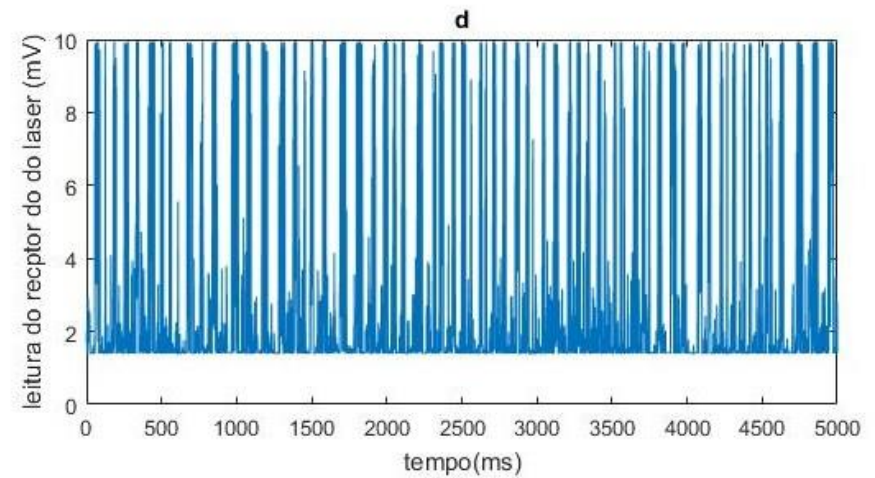
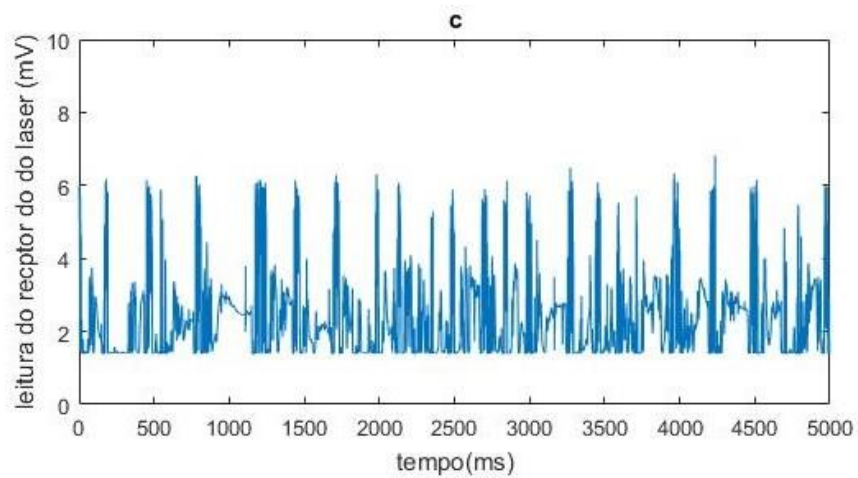
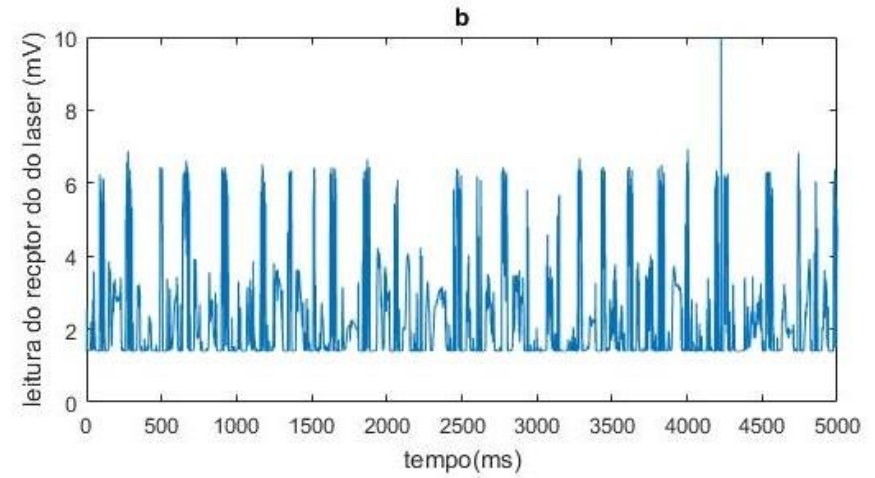
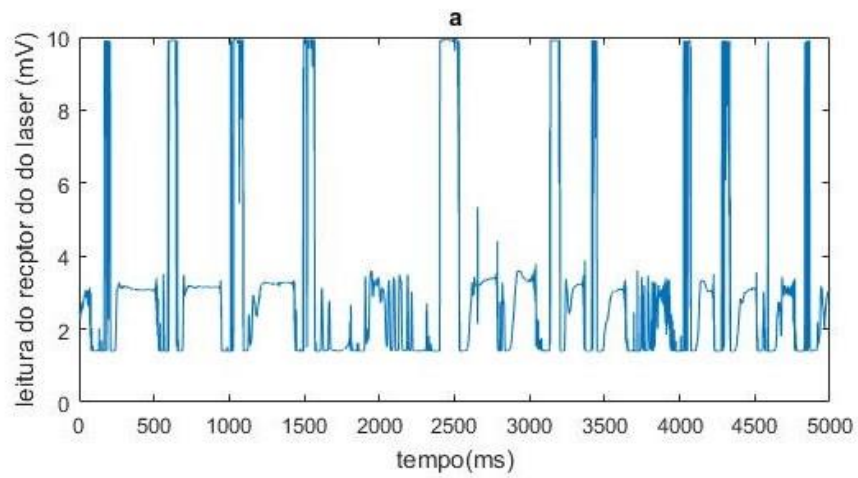


Figura 32 – Sinais originais do laser de escoamentos do padrão pistonado, com as vazões (a) 142 kg/m²s de água e 0,051 m/s de ar, (b) 244 kg/m²s de água e 0,085 m/s de ar, (c) 244 kg/m²s de água e 0,137 m/s de ar e (d) 651 kg/m²s de água e 0,188 m/s de ar.

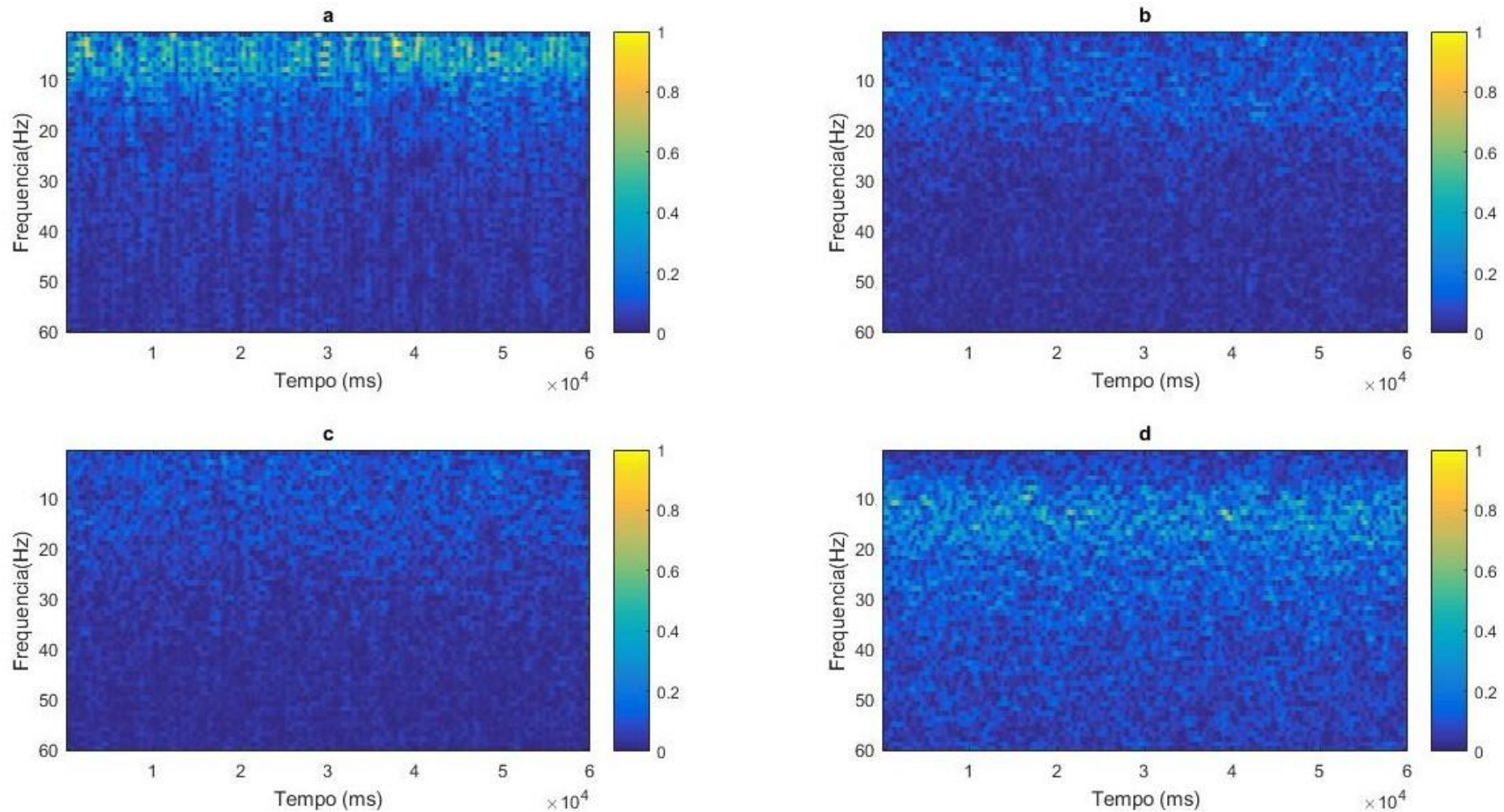


Figura 33 – Gráficos das transformadas de Gabor para escoamentos do padrão pistonado, com vazões de (a) $142 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,051 \text{ m/s}$ de ar, (b) $244 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,085 \text{ m/s}$ de ar, (c) $244 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,137 \text{ m/s}$ de ar e (d) $651 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,188 \text{ m/s}$ de ar.

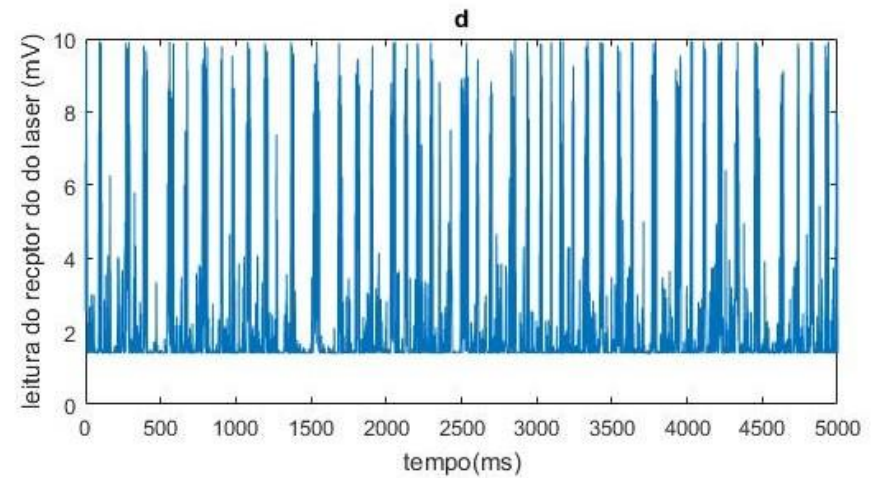
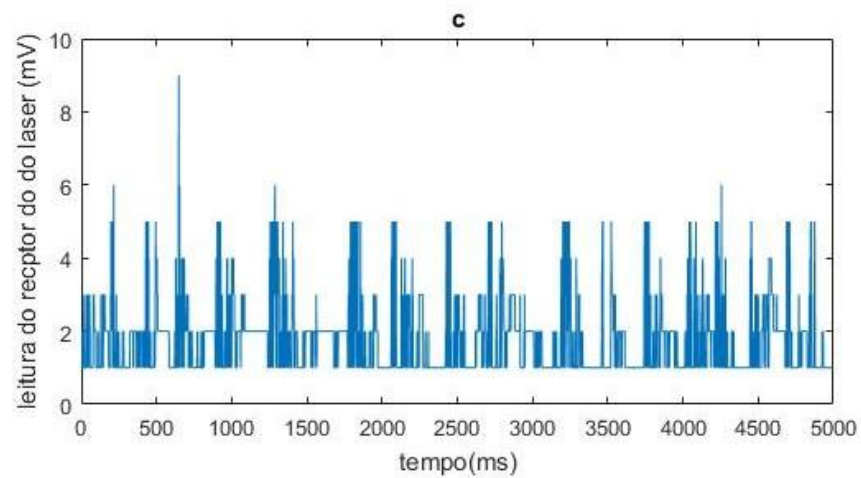
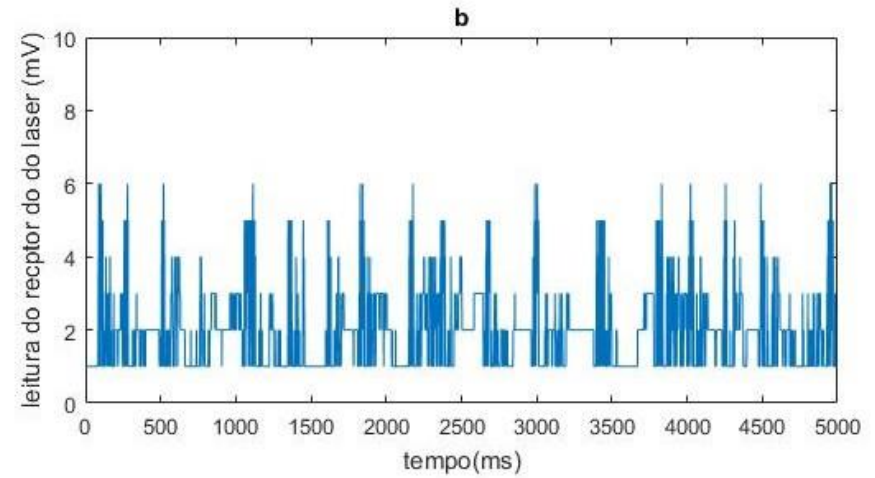
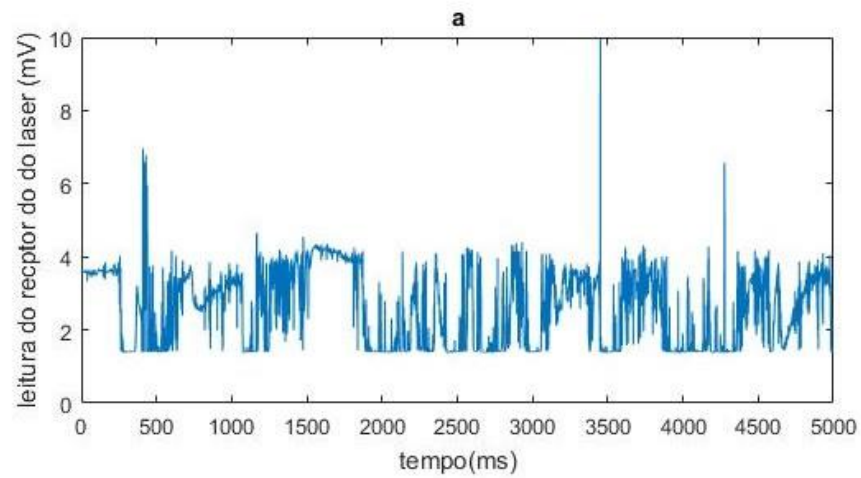


Figura 34 – Sinais originais do laser de escoamentos do padrão ondulado, com vazões de **(a)** $142 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,222 \text{ m/s}$ de ar, **(b)** $142 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,256 \text{ m/s}$ de ar, **(c)** $244 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,256 \text{ m/s}$ de ar e **(d)** $244 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,291 \text{ m/s}$ de ar.

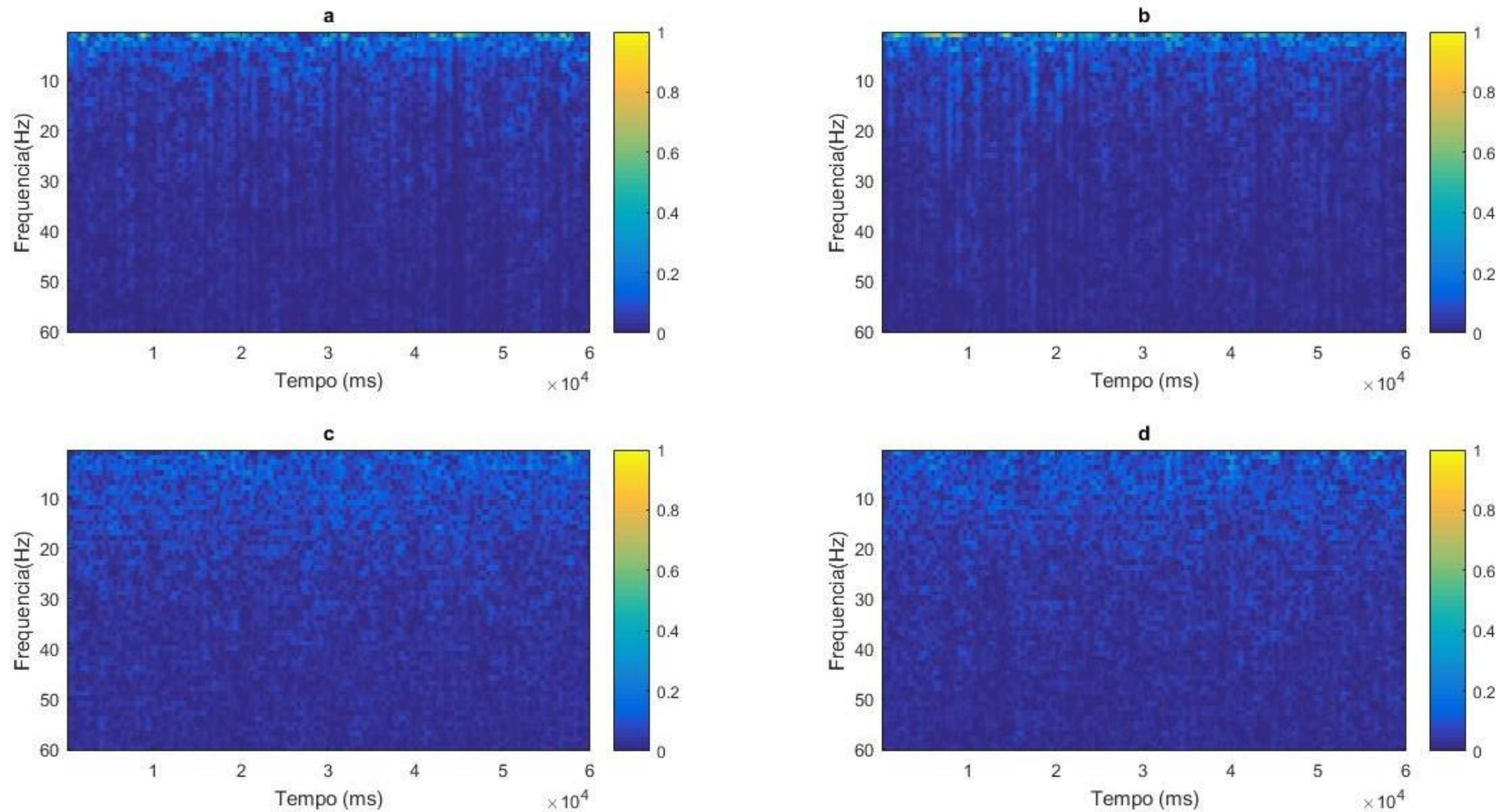


Figura 35 – Gráficos das transformadas de Gabor para escoamentos do padrão ondulado, com vazões de (a) $142 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,222 \text{ m/s}$ de ar, (b) $142 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,256 \text{ m/s}$ de ar, (c) $244 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,256 \text{ m/s}$ de ar e (d) $244 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de água e $0,291 \text{ m/s}$ de ar.

É possível notar que o padrão de bolhas dispersas cria transformadas de Gabor com frequências bem espalhadas no tempo.

No caso das bolhas alongadas, começa a haver uma concentração das frequências em faixas que variam de 10 a 20 Hz conforme aumentam as vazões, e essa faixa se mantém praticamente constante em todo o tempo em que é medida.

Para o padrão pistonado, há também uma clara concentração em uma faixa fixa durante o tempo. Neste caso, porém, é bem claro que essa faixa está mais estreita, o que implica que a frequência de formação de bolhas está mais clara.

No caso do padrão ondulado, é visível que as frequências se concentram em níveis inferiores, também em uma faixa bem estreita, sendo que essa faixa se desloca conforme as vazões aumentam.

Visualmente, é possível diferenciar as transformadas de Gabor dos padrões bolhas dispersas e pistonado entre si e também em comparação com os outros dois. No entanto, é difícil diferenciar bolhas alongadas e ondulado. Isso se dá porque a formação de bolhas no padrão bolhas alongadas segue um padrão semelhante à passagem de ondas de água no padrão ondulado. Por isso, suas transformadas de Gabor acabam sendo muito semelhantes.

Para realizar uma análise quantitativa, foi realizada uma correlação cruzada. Para tal, define-se um escoamento de cada padrão para ser o filtro. As vazões escolhidas para filtros são $651 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,017 \text{ m/s}$ para bolhas dispersas, $651 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,102 \text{ m/s}$ para bolhas alongadas, $142 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,051 \text{ m/s}$ para pistonado, e $142 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,256 \text{ m/s}$ para ondulado. Serão comparadas com as transformada de Gabor de $447 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,034 \text{ m/s}$ para bolhas dispersas, $142 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,043 \text{ m/s}$ para bolhas alongadas, $244 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,085 \text{ m/s}$ para pistonado, e 244 kg/s e $0,291 \text{ m/s}$ para ondulado. O filtro utilizado em cada correlação será identificado por BD, BA, PS e ON para bolhas dispersas, bolhas alongadas, pistonado e ondulado, respectivamente.

Os gráficos das correlações cruzadas dos filtros no tempo são apresentados nas Figuras 36, 37, 38 e 39.

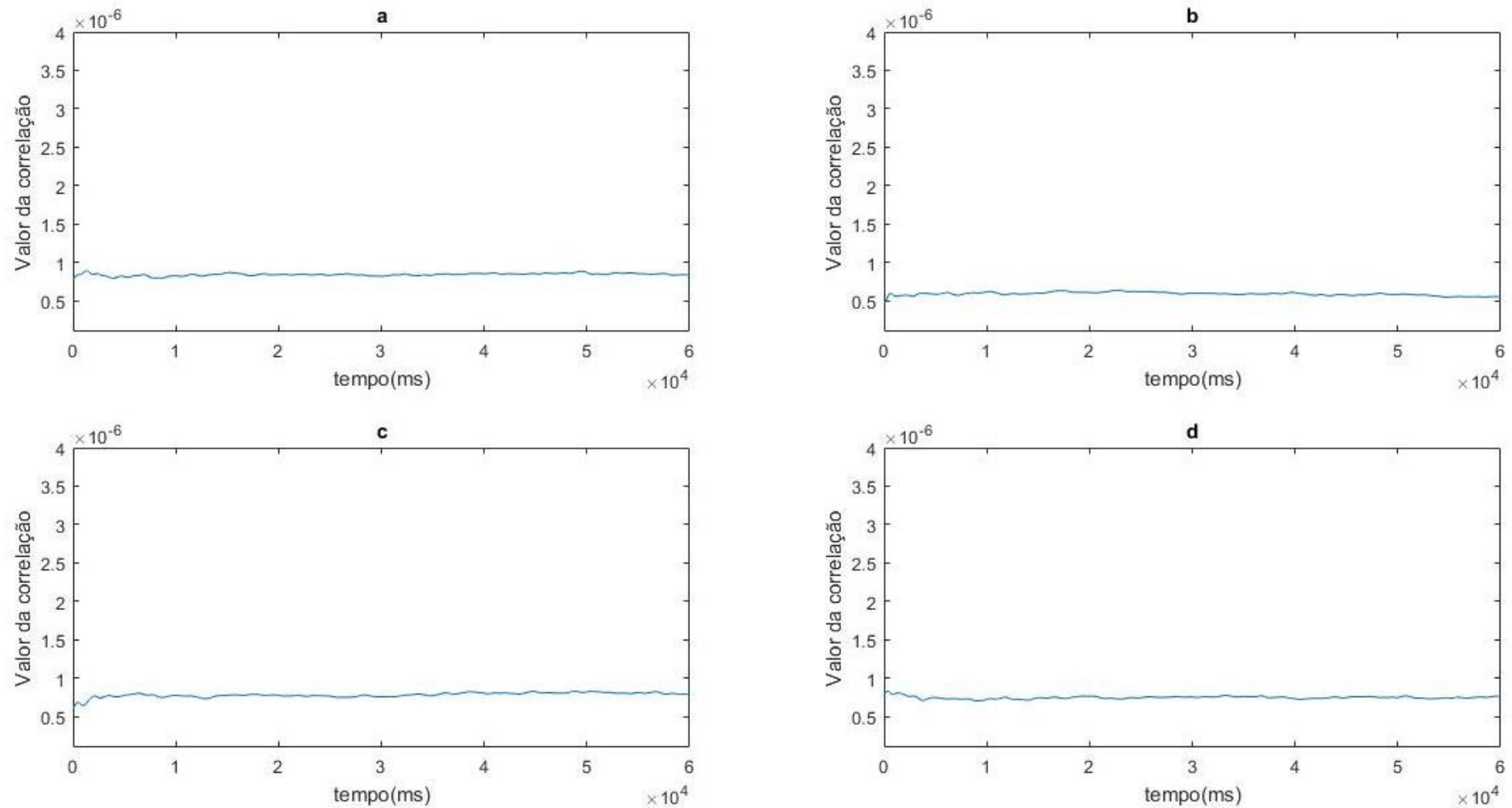


Figura 36 – Gráficos das correlações do filtro do padrão bolhas dispersas com escoamentos das vazões (a) $447 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,034 \text{ m/s}$ (b) $142 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,043 \text{ m/s}$ (c) $244 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,085 \text{ m/s}$ (d) $244 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,291 \text{ m/s}$.

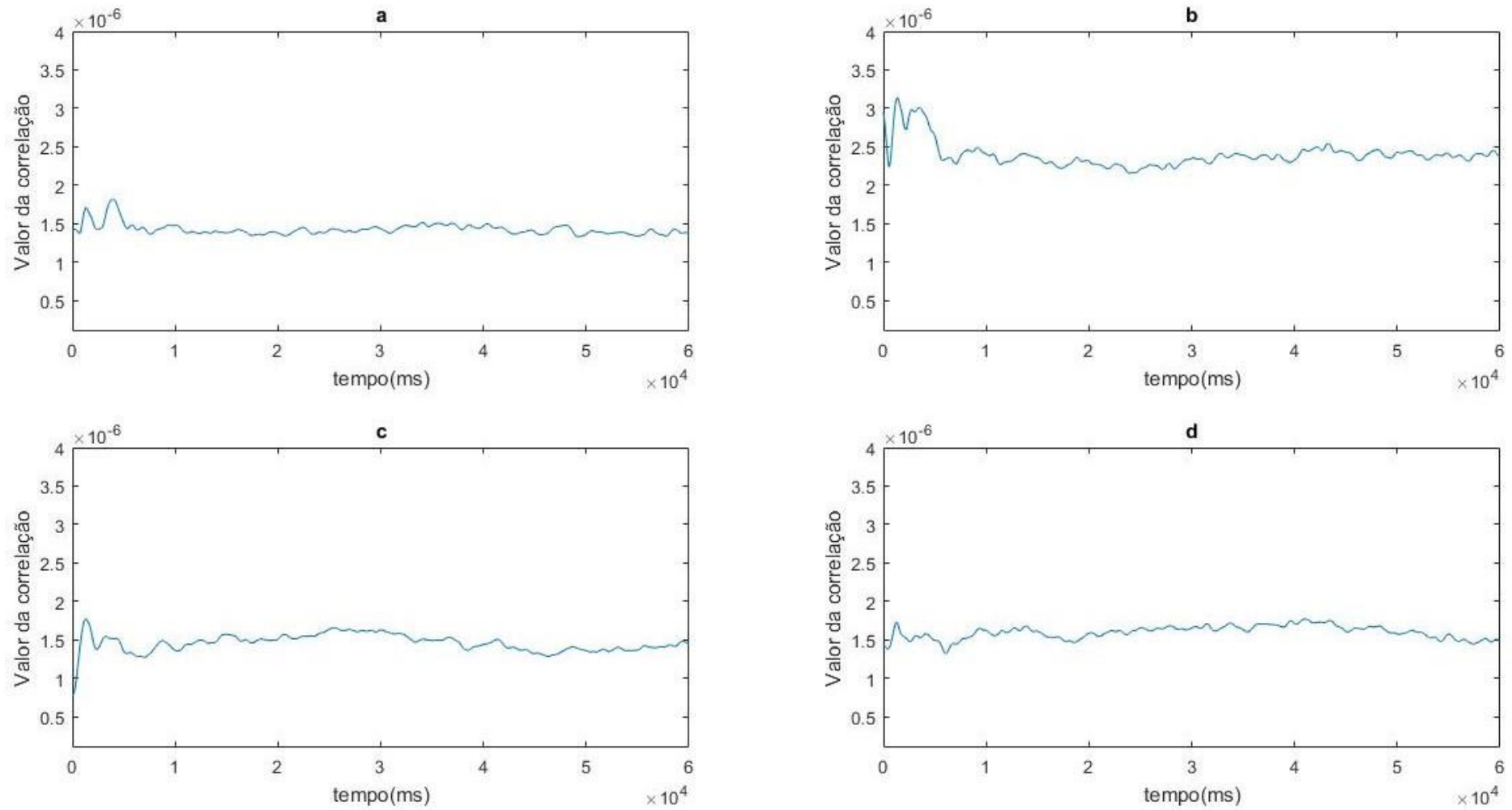


Figura 37 – Gráficos das correlações do filtro do padrão bolhas alongadas com escoamentos das vazões (a) 447 kg/m²s e 0,034 m/s (b) 142 kg/m²s e 0,043 m/s (c) 244 kg/m²s e 0,085 m/s (d) 244 kg/s e 0,291 m/s.

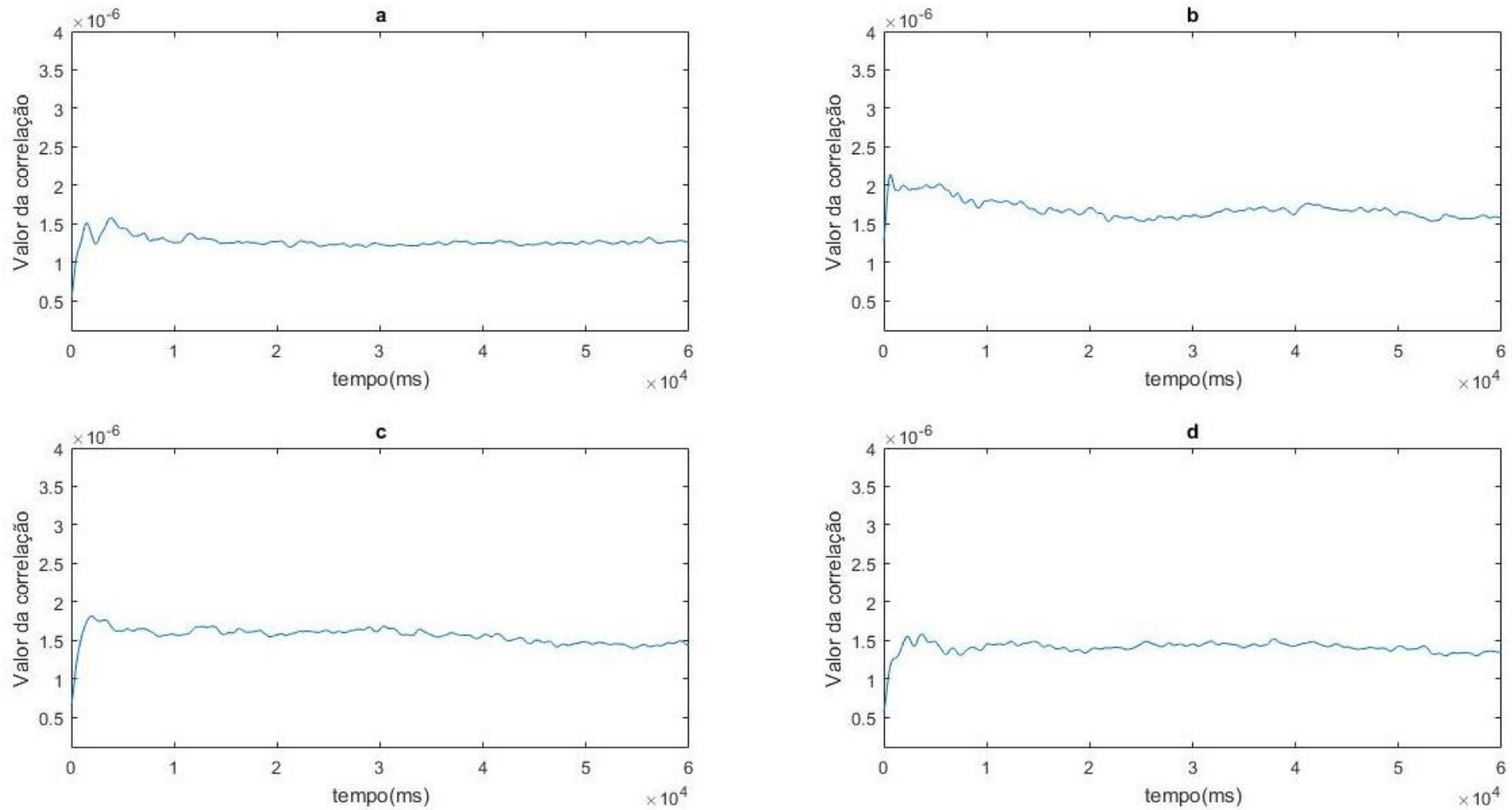


Figura 38 – Gráficos das correlações do filtro do padrão pistonado com escoamentos das vazões (a) $447 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,034 \text{ m/s}$ (b) $142 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,043 \text{ m/s}$ (c) $244 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,085 \text{ m/s}$ (d) $244 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,291 \text{ m/s}$.

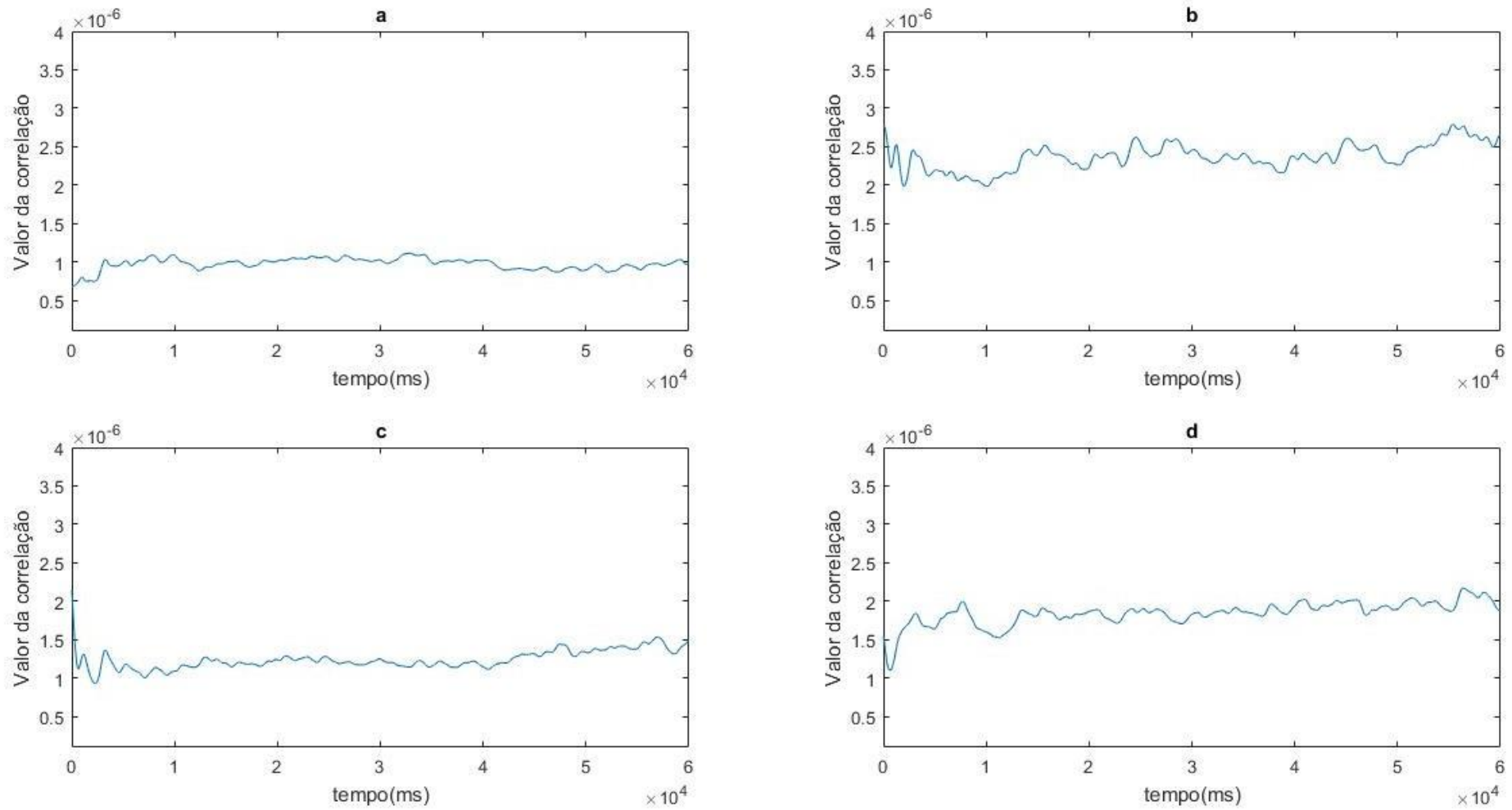


Figura 39 – Gráficos das correlações do filtro do padrão ondulado com escoamentos das vazões **(a)** $447 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,034 \text{ m/s}$ **(b)** $142 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,043 \text{ m/s}$ **(c)** $244 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,085 \text{ m/s}$ **(d)** $244 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,291 \text{ m/s}$.

Após realizar a correlação cruzada, somaram-se todos os valores ponto a ponto para se ter a energia da correlação cruzada, sendo possível identificar os filtros que mais se adaptaram a cada sinal. Os resultados estão expressos na Tabela 2.

	Filtro utilizado			
	BD	BA	PS	ON
BD	0,0506	0,0856	0,0760	0,0586
BA	0,0355	0,1436	0,1014	0,1423
PS	0,0470	0,0876	0,0936	0,0844
ON	0,0449	0,0959	0,0845	0,1107

Tabela 2 – Valores encontrados para as correlações de cada padrão de escoamento.

Os filtros BD e BA tiveram correlação máxima com seus respectivos escoamentos, por uma boa margem. No entanto, PS e ON obtiveram melhor correlação com o escoamento de bolha alongadas.

Para os escoamentos comparados, Bolhas dispersas teve máxima semelhança com o filtro BA, de fato sua semelhança mínima foi com o filtro BD. Bolhas alongadas também teve seu máximo com BA, com uma boa diferença para os outros. Para pistonado, tivemos resultados satisfatórios, com uma margem de 7,7% para o segundo colocado. Por fim, ondulado se mostrou reconhecível também, sua margem foi de 13,3%, sendo esta a melhor de todas as comparações.

A correlação cruzada nos deu resultados bons na maioria dos casos, mas com erros no caso do escoamento BD, e uma margem muito pequena para o escoamento PS. Embora mostre um possível futuro, é necessário notar que essa correlação cruzada não leva em conta qualquer possível deslocamento da concentração de frequências causado pelo aumento das vazões do escoamento, por isso só se mostra aplicável quando os escoamentos comparados possuem vazões semelhantes.

5. Conclusão

O estudo da queda de pressão em escoamentos bifásicos usando o manômetro diferencial nos mostrou resultados pouco condizentes com o esperado pelo método homogêneo, o que mostra que esse método é pouco aplicável para casos de dutos de pequenas dimensões, em que não há a formação de gotículas de água.

O estudo também nos possibilitou a criação de um mapa para os padrões de escoamento encontrados. O mapa pode ser aplicado e comparado com outros para escoamentos em dutos de tamanhos semelhantes.

A correlação cruzada apresentou resultados bons na maioria dos casos, mas com erros no caso do escoamento BD, e uma margem muito pequena para o escoamento PS. Embora mostre um possível futuro, é necessário notar que essa correlação cruzada não leva em conta qualquer possível deslocamento da concentração de frequências causado pelo aumento das vazões do escoamento, por isso só se mostra aplicável quando os escoamentos comparados possuem vazões semelhantes.

Referências Bibliográficas

- Baker, O. (1954). Simultaneous Flow of Oil and Gas. **Oil and Gas Journal**. v.53. p.185-195.
- Cheng, L.; Ribatski, G.; Thome, J. (2008). Two-phase flow patterns and flow-pattern maps: fundamentals and applications. *Applied Mechanics Reviews*, v.61, n.5, p.050802.
- Choi, C.; Kim, M. (2011). Flow pattern based correlations of two-phase pressure drop in rectangular micro channels. **International Journal of Heat and Fluid Flow**. v.32, n.6, p.1199-1207.
- Collier, J. G.; Thome, R. J. Convective Boiling and Condensation. Oxford: Oxford University Press, 1994. 644 p.
- Dong, X. et al. (2015). Oil–water two-phase flow velocity measurement with continuous wave ultrasound Doppler. **Chemical engineering science**. V.135. p.155–165.
- Duarte, L. G. C. Medição da fração de vazio em tubos de pequeno diâmetro. 2002. 179f . Tese (engenharia mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2002.
- Ghiaasiaan, S. M. Two-Phase Flow, Boiling, and Condensation in Conventional and Miniature Systems. New York: Cambridge University Press, 2008. 613 p.
- Guillizzonni, M. (2013) Flow pattern identification in gas–liquid flows by means of phase density imaging, *International Journal of Multiphase Flow*. v51 p.1–10.
- Lockhart, R.W. ; Martinelli, R.C. (1949) Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two component flow in pipes. *Chemical Engineering Progress symposium series*. v. 45. p. 39-48.
- Loyola, F. A. Estudo do efeito da inclinação no escoamento bifásico em canal retangular com dimensões características da transição entre micro e macro escala. 2015. 236f. Dissertação (engenharia mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos. 2015.
- Mandhane, J.M. Gregory, G. A. Aziz, K. (1974). A flow pattern map for gas—liquid flow in horizontal pipes **International Journal of Multiphase Flow**. v1. p. 537-553.
- Massignam, J. P.D. et al. Medição da fração de vazios em escoamentos bifásicos borbulhantes utilizando ultra-som In: **PDPetro**, 4, 2007. Campinas.
- Monni, G. et al. (2014). Horizontal two-phase flow pattern recognition. **Experimental Thermal and Fluid Science**. v. 59. p. 213-221.
- Selegim, P.J.; Crivelaro, K.O.C.; Hervieu, E. Identificação de regimes de escoamento bifásico horizontal com auxílio de redes neurais In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, 15, 1999. Águas de Lindóia.
- Simpson, H.C. et al. (1977). Two-Phase Flow in Large Diameter Horizontal Lines. Paper H., European Two-Phase Flow Group Meeting. Grenoble.

Zhai, L. S. et al. (2015) Experimental flow pattern map, slippage and time–frequency representation of oil–water two-phase flow in horizontal small diameter pipes. **International Journal of Multiphase Flow**. v.76, p.168-186.

Zhao Y; Bi Q.; Hu R. Recognition and measurement in the flow pattern and void fraction of Gas-liquid two-phase flow in vertical upward pipes using the gamma densitometer. **Applied Thermal Engineering**. v.60. p.398-410.